

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Live working – Minimum approach distances for a.c. systems in the voltage range 72,5 kV to 800 kV – A method of calculation

Travaux sous tension – Distances minimales d'approche pour des réseaux à courant alternatif de tension comprise entre 72,5 kV et 800 kV – Une méthode de calcul





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 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 Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

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.

Liens utiles:

Recherche de publications CEI - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Live working – Minimum approach distances for a.c. systems in the voltage range 72,5 kV to 800 kV – A method of calculation

Travaux sous tension – Distances minimales d'approche pour des réseaux à courant alternatif de tension comprise entre 72,5 kV et 800 kV – Une méthode de calcul

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 13.260; 29.240.20; 29.260.99

ISBN 978-2-83220-717-8

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Terms, definitions and symbols	6
2.1 Terms and definitions	6
2.2 Symbols used in the normative part of the document.....	8
3 Methodology.....	9
4 Factors influencing calculations	10
4.1 Statistical overvoltage	10
4.2 Gap strength	10
4.3 Calculation of electrical distance D_U	11
4.3.1 General equation	11
4.3.2 Factors affecting gap strength	11
5 Evaluation of risks	16
6 Calculation of minimum approach distance D_A	17
Annex A (informative) Ergonomic distance.....	18
Annex B (informative) Overvoltages.....	20
Annex C (informative) Dielectric strength of air	24
Annex D (informative) Gap factor k_g	26
Annex E (informative) Allowing for atmospheric conditions	28
Annex F (informative) Influence of floating conductive objects on the dielectric strength	32
Annex G (informative) Live working near contaminated, damaged or moist insulation	40
Bibliography.....	45
Figure 1 – Illustration of two floating conductive objects of different dimensions and at different distances from the axis of the gap.....	13
Figure 2 – Typical live working tasks.....	15
Figure B.1 – Ranges of u_{e2} at the open ended line due to closing and reclosing according to the type of network (meshed or antenna) with and without closing resistors and shunt reactors.....	22
Figure F.1 – Influence of the length of the floating conductive objects – phase to earth rod-rod configuration – 250 μ s / 2 500 μ s impulse.....	35
Figure F.2 – Influence of the length of the floating conductive objects – phase to phase conductor-conductor configuration – 250 μ s / 2 500 μ s impulse	36
Figure F.3 – Reduction of the dielectric strength as a function of the length D for constant values of β – Phase to earth rod-rod configuration.....	37
Figure F.4 – Reduction of the dielectric strength as a function of the length P for constant values of β – Phase to phase conductor-conductor configuration	37
Figure G.1 – Strength of composite insulators affected by simulated conductive and semi-conductive defects	43
Table 1 – Average k_A values	12
Table 2 – Floating conductive object factor k_f	14
Table B.1 – Classification of overvoltages according to IEC 60071-1	20

Table D.1 – Gap factors for some actual phase to earth configurations	27
Table E.1 – Atmospheric factor k_a for different reference altitudes and values of U_{g0}	30
Table G.1 – Example of maximum number of damaged insulators calculation (gap factor 1,4)	41
Table G.2 – Example of maximum number of damaged insulators calculation (gap factor 1,2)	42

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**LIVE WORKING –
MINIMUM APPROACH DISTANCES FOR A.C. SYSTEMS
IN THE VOLTAGE RANGE 72,5 kV TO 800 kV –
A METHOD OF CALCULATION**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61472 has been prepared by technical committee 78: Live working.

This third edition cancels and replaces the second edition of IEC 61472 published in 2004. It constitutes a technical revision.

This document has been prepared according to the requirements of IEC 61477: *Live working – Minimum requirements for the utilization of tools, devices and equipment*, where applicable.

Significant changes with regard to the second edition are the following:

- clarification of the scope;
- review of the definitions;
- clarification of the methodology of determining whether live working is permissible and the calculation of the minimum approach distances;

- modification of the basic equation for calculation of the minimum approach distance;
- introduction of Table 1 for altitude correction factor simplification k_a ;
- introduction of criteria in presence of composite insulator and clarification on the use of insulator factor k_i ;
- review of the informative Annex F on the influence of floating conductive objects on the dielectric strength;
- review of the informative Annex G on live working near contaminated, damaged or moist insulation.

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

FDIS	Report on voting
78/1004/FDIS	78/1010/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability 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.

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

LIVE WORKING – MINIMUM APPROACH DISTANCES FOR A.C. SYSTEMS IN THE VOLTAGE RANGE 72,5 kV TO 800 kV – A METHOD OF CALCULATION

1 Scope

This International Standard describes a method for calculating the minimum approach distances for live working, at maximum voltages between 72,5 kV and 800 kV. This standard addresses system overvoltages and the working air distances or tool insulation between parts and/or workers at different electric potentials.

The required withstand voltage and minimum approach distances calculated by the method described in this standard are evaluated taking into consideration the following:

- workers are trained for, and skilled in, working in the live working zone;
- the anticipated overvoltages do not exceed the value selected for the determination of the required minimum approach distance;
- transient overvoltages are the determining overvoltages;
- tool insulation has no continuous film of moisture or measurable contamination present on the surface;
- no lightning is seen or heard within 10 km of the work site;
- allowance is made for the effect of conducting components of tools;
- the effect of altitude, insulators in the gap, etc, on the electric strength is taken into consideration.

For conditions other than the above, the evaluation of the minimum approach distances may require specific data, derived by other calculation or obtained from additional laboratory investigations on the actual situation.

2 Terms, definitions and symbols

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

2.1 Terms and definitions

2.1.1

damaged insulator

insulator having any type of manufacturing defect or in-service deterioration which affects its insulating performance

2.1.2

electrical distance

D_U

distance in air required to prevent a disruptive discharge between energized parts or between energized parts and earthed parts during live working

[SOURCE: IEC 60050-651:–, 651-21-12]

2.1.3**ergonomic distance****ergonomic component of distance** D_E

distance in air added to the electrical distance, to take into account inadvertent movement and errors in judgement of distances while performing work

[SOURCE: IEC 60050-651:–, 651-21-13]

2.1.4**fifty per cent disruptive discharge voltage** U_{50}

peak value of an impulse test voltage having a fifty per cent probability of initiating a disruptive discharge each time the dielectric testing is performed

[SOURCE: IEC 60050-604:1987, 604-03-43]

2.1.5**highest voltage of a system** U_s

highest value of operating voltage which occurs under normal operating conditions at any time and any point in the system (phase to phase voltage)

Note 1 to entry: Transient overvoltages due e.g. to switching operations and abnormal temporary variations of voltage are not taken into account.

[SOURCE: IEC 60050-601:1985, 601-01-23, modified – A reference to phase to phase voltage has been added.]

2.1.6**minimum approach distance****minimum working distance** D_A

minimum distance in air to be maintained between any part of the body of a worker, including any object (except tools appropriate for live working) being handled directly, and any part(s) at different electric potential(s)

Note 1 to entry: The minimum approach distance is the sum of the electrical distance appropriate for the maximum nominal voltage and of the selected ergonomic distance.

[SOURCE: IEC 60050-651:–, 651-21-11]

2.1.7**minimum residual insulation length** D_{Lins}

insulation length required to prevent a disruptive discharge between energized parts and earthed parts measured along the insulator length, taking into account the presence of floating conductive objects and of damaged insulator portions

2.1.8**ninety per cent statistical impulse withstand voltage** U_{90}

peak value of an impulse test voltage at which insulation exhibits, under specified conditions, a ninety per cent probability of withstand

Note 1 to entry: This concept is applicable to self-restoring insulation.

[SOURCE: IEC 60050-604:1987, 604-03-42, modified – The definition has been changed to refer specifically to a ninety per cent probability of withstand.]

2.1.9

part

any element present in the work location, other than workers, live working tools and system insulation

2.1.10

per unit value

u

expression of the per unit value of the amplitude of an overvoltage (or of a voltage) referred to $U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$

Note 1 to entry: This applies to u_{e2} and u_{p2} defined in Clause 4.

2.1.11

transient overvoltage

short duration overvoltage of few milliseconds or less, oscillatory or non-oscillatory, usually highly damped

[SOURCE: IEC 60050-604:1987, 604-03-13, modified – The two notes in the original definition have been deleted.]

2.1.12

two per cent statistical overvoltage

U_2

peak value of a transient overvoltage having a 2 per cent statistical probability of being exceeded

2.1.13

work location

any site, place or area where a work activity is to be, is being, or has been carried out

[SOURCE: IEC 60050-651:–, 651-26-03]

2.2 Symbols used in the normative part of the document

A_d	length of damaged insulator or number of damaged units in an insulator of length A_0 , not shunted by long arcing horn or grading ring
A_0	length of undamaged insulator or number of undamaged insulator units not shunted by long arcing horn or grading ring
β	ratio of the total length in the direction of the gap axis of the floating conductive objects (s) to the original air gap length
D	length of the remaining air gap phase to earth
D_A	minimum approach distance
D_E	ergonomic distance
D_U	electrical distance necessary to obtain U_{90}
D_{Lins}	minimum residual insulation length
d_1, d_2, d_3, d_4	distances between the worker(s) and parts of the installation at different electric potentials (see Figure 2)
F	sum of all lengths, in the direction of the gap axis, of all floating conductive objects in the air gap (in metres)

K_s	statistical safety factor
K_t	factor combining different considerations influencing the strength of the gap
k_a	atmospheric factor
k_d	coefficient characterizing the average state of the damaged insulators
k_f	floating conductive object factor
k_g	gap factor
k_i	damaged insulator factor
k_{ic}	damaged composite insulator factor
k_{is}	damaged insulator strings factor
k_s	standard statistical deviation factor
L_f	original air gap length
P	length of the remaining gap phase to phase
r	distance of a conductive object from the axis of the gap
s_e	normalized value of the standard deviation of U_{50} expressed in per cent
U_2	two per cent statistical overvoltage
U_{50}	fifty per cent disruptive discharge voltage
U_{90}	ninety per cent statistical impulse withstand voltage
U_{e2}	two per cent statistical overvoltage between phase and earth
U_{e90}	ninety per cent statistical impulse withstand voltage phase to earth
U_{p2}	two per cent statistical overvoltage between two phases
U_{p90}	ninety per cent statistical impulse withstand between two phases
u_{e2}	per unit value of the two per cent statistical overvoltage phase to earth
u_{p2}	per unit value of the two per cent statistical overvoltage between two phases
U_s	highest voltage of a system between two phases

3 Methodology

The methodology of determining whether live working is permissible and the calculation of the minimum approach distances is based on the following considerations:

- to determine the statistical overvoltage expected in the work location (U_2) and from this, determine the required statistical impulse withstand voltage of the insulation in the work location (U_{90});
- to calculate the minimum residual insulation length D_{Lins} if working next to insulators;
- to calculate the electrical distance D_U required for the impulse withstand voltage U_{90} ;
- to add an additional distance to allow for ergonomic factors associated with live working, such as inadvertent movement.

The minimum approach distance D_A is thus determined by:

$$D_A = D_U (K_s = 10) + D_E \quad (1)$$

where

D_U is the electrical distance necessary to obtain U_{90} ;

D_E is the ergonomic distance and is dependent on work procedures, level of training, skill of the workers, type of construction, and such contingencies as inadvertent movement, and errors in appraising distances (see Annex A for details).

Refer to Clause 5 for application of ergonomic distance.

4 Factors influencing calculations

4.1 Statistical overvoltage

The electrical stress at the work location shall be known. The electrical stress is described as the statistical overvoltage that may be present at the work location. In a three-phase a.c. power system the statistical overvoltage U_{e2} between phase and earth is:

$$U_{e2} = (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{e2} \quad (2)$$

where

$U_s (\sqrt{2}/\sqrt{3})$ is the highest phase to earth peak voltage, of the system expressed in kV, and u_{e2} is the statistical overvoltage phase to earth expressed in per unit.

The statistical overvoltage U_{p2} between two phases is:

$$U_{p2} = (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{p2} \quad (3)$$

where u_{p2} is the statistical overvoltage phase to phase expressed in per unit.

If the per unit phase to phase data are not available, an approximate value can be derived from u_{e2} by the following formula:

$$u_{p2} = 1,35 u_{e2} + 0,45 \quad (4)$$

The transient overvoltages to be considered are the maximum that can occur, either on the installation being worked on or at the work site, whether caused by system faults or by switching (see Annex B).

4.2 Gap strength

For the determination of the electrical distance, the required withstand voltage for live working is taken to be equal to the voltage U_{90} , determined from the general expression

$$U_{90} = K_s U_2 \quad (5)$$

Considering the phase to earth and phase to phase voltages separately and combining equation (5) with equations (2) and (3) gives:

$$U_{e90} = K_s (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{e2} \quad (6)$$

$$U_{p90} = K_s (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{p2} \quad (7)$$

where

K_S is the statistical safety factor (1,0 or 1,1 for formula (5), (6) and (7)) (see Clause 5);

U_{e90} and U_{p90} are respectively the statistical impulse withstand voltages phase to earth and phase to phase, expressed in kV.

4.3 Calculation of electrical distance D_U

4.3.1 General equation

The strength of the gap is influenced by a series of considerations which can be combined in a factor K_t used in the following formula for calculating D_U (in metres):

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

where

F sum of all lengths, in the direction of the gap axis, of all floating conductive objects in the air gap (in metres) (see 4.3.2.4);

U_{90} is the phase to earth (U_{e90}) or the phase to phase (U_{p90}) statistical impulse withstand voltage in kV;

K_t is given by:

$$K_t = k_S k_g k_a k_f k_i \quad (9)$$

4.3.2 Factors affecting gap strength

4.3.2.1 Standard statistical deviation factor k_S

Factor k_S accounts for the statistical nature of the breakdown voltage. Unless the value of the standard deviation, s_e , is known from tests representing the gap configuration, a value of 0,936, based on a standard deviation of 5 %, for positive impulses, can be used (see Annex C).

4.3.2.2 Gap factor k_g

The gap factor k_g takes into account the effect of the gap configuration on the dielectric strength of air (see Annex D).

NOTE 1 Unless an appropriate gap factor can be selected for the structure configurations that exist at the system voltage being considered, a generally conservative value that allows for a variety of configurations is $k_g = 1,2$ for phase to earth and $k_g = 1,45$ for phase to phase.

NOTE 2 CIGRÉ Brochure 72 and IEC 60071-2 provide more information concerning the determination of k_g for various gap configurations.

4.3.2.3 Atmospheric factor k_a

The atmospheric factor takes into account the effect of air density. Air density is influenced by temperature, humidity and altitude. The effect of temperature and humidity is negligible in comparison with the effect of altitude.

The electric strength of the air insulation in the work location is mainly affected by the altitude above sea level. This effect, which varies to some extent with the gap length, or conversely with the withstand voltage, is accounted for by the atmospheric factor k_a . The appropriate value of k_a can be selected from Table 1 of average values or from Table E.1 or calculated for a specific altitude and U_{90} by the method given in Annex E, for a reference altitude below which most live work is done.

Table 1 – Average k_a values

Altitude m	k_a average
0	1,000
100	0,995
300	0,983
500	0,972
1 000	0,941
1 500	0,909
2 000	0,875
2 500	0,841
3 000	0,805

The electrical distance D_U should be increased when live work is carried out in locations higher than the reference altitude in order to account for the lower mean atmospheric pressure. This can be done by multiplying D_U by an altitude correction factor, which can be calculated using the equations given in Annex E.

4.3.2.4 Floating conductive object factor k_f

Floating conductive objects can decrease, or increase, the electric strength of a gap by field distortion.

A conductive object placed between two electrodes at different electric potentials, and not connected to either one, is electrically floating and acquires an intermediate potential. The extent of the influence these floating conductive objects have on the electric strength of the gap varies depending on the number of floating conductive objects, their dimensions, shapes and geometrical positions in the gap. Nevertheless, the presence of the floating conductive object(s) reduces the net electrical length of the air gap.

When calculating the effects of floating conductive objects, all possible disruptive discharge paths should be considered in determining the floating conductive object factor k_f . The sum of all floating conductive objects in the direction of the gap axis constitutes the floating conductive object length, F .

In the most common live line work situations on high voltage lines, the k_f factor depends on the length of the remaining gap and on the lateral distance r of the conductive object from the axis of the gap (see Figure 1). It has to be pointed out that D is obtained by subtracting the length F from the original air gap L_f , i.e. $D = L_f - F$. Annex F provides evaluation criteria of the k_f factor as a function of F and D (P when phase to phase distances are considered), by introducing the parameter

$$\beta = F/(D + F)$$

(or $\beta = F/(P + F)$ when phase to phase distances are considered).

Experimental investigations (see Annex F) have shown that, in the more critical cases representative of live line working configurations, the k_f coefficient may be as low as 0,75 for phase to earth gap distances over 1,2 m.

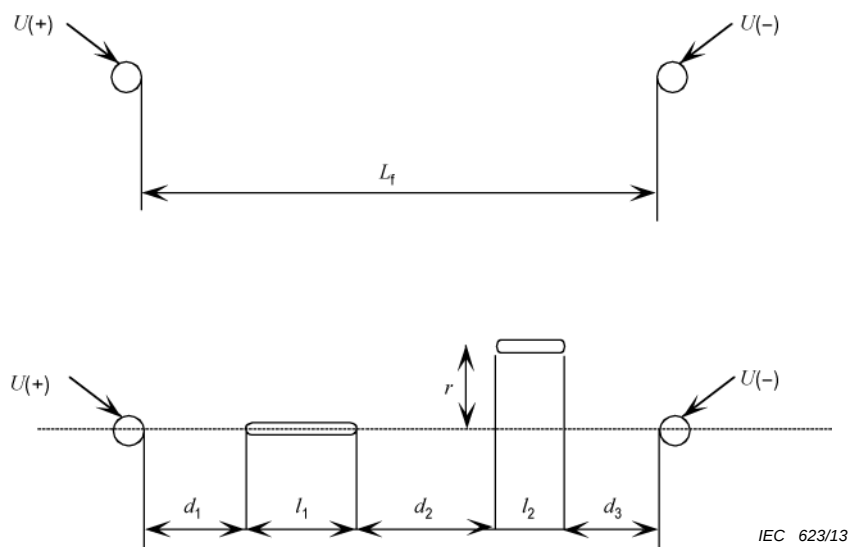


Figure 1 – Illustration of two floating conductive objects of different dimensions and at different distances from the axis of the gap

Table 2 reports a simplified criterion for the k_f determination in dependence of β and L_f . The k_f values are derived from the interpolation of the data shown in Annex F. Table 2 contains the values of β in function of the original gap length L_f rather than in function of the remaining air gap length D because the original gap length L_f is one of the important quantities that characterise the constructed a.c. system.

For long or flat shaped conductive objects situated perpendicular to the air gap, for which no specific experimental data exists, a conservative value $k_f = 0,75$ may be assumed.

Table 2 – Floating conductive object factor k_f

Phase to earth gaps						Phase to phase gaps					
β^b	L_f^a m				k_f	β^b	L_f^a m				k_f
	Over	Up to	Over	Up to			Over	Up to	Over	Up to	
0,1	---	0,9	3,9	---	1	0,05	---	0,9	5,7	---	1
	0,9	3,9	---		0,95		0,9	2,1	3,8	5,7	0,95
0,15	---	0,5	4,7	---	1		0,1	2,1	3,8	---	
	0,5	1	3,3	4,7	0,95	---		0,6	6	---	1
	1	1,2	2,7	3,3	0,9	0,6		1,6	4,6	6	0,95
	1,2	2,7	---		0,85	1,6		2,2	3,6	4,6	0,9
0,2	---	0,4	4,9	---	1	0,2	2,2	3,6	---		0,85
	0,4	0,9	3,7	4,9	0,95		---	0,4	6,3	---	1
	0,9	1	3,1	3,7	0,9		0,4	1,4	5,1	6,3	0,95
	1	1,2	2,6	3,1	0,85		1,4	1,8	4,4	5,1	0,9
	1,2	2,6	---		0,8		1,8	2,3	3,5	4,4	0,85
0,25	---	0,3	5,1	---	1		2,3	3,5	---		0,8
	0,3	0,8	3,8	5,1	0,95						
	0,8	0,9	3,2	3,8	0,9						
	0,9	1,1	2,8	3,2	0,85						
	1,1	1,3	2,4	2,8	0,8						
	1,3	2,4	---		0,75						
NOTE When β values over the ones tabulated are involved, tests or studies are needed in order to consider the actual floating conductive object shape and dimension.											
^a L_f = Original air gap length.											
^b β = Ratio of the total length in the direction of the gap axis of the floating conductive objects (s) to the original air gap length.											

As far as the influence of the distance of the floating conductive objects from the axis of the gap is considered, it may be assumed that the reduction of the electric strength becomes negligible when

$$r > 2,5 F$$

The influence of metallic caps and pins of suspension insulators and conductive objects of similar size, in the vicinity of the insulators, is negligible and shall be ignored.

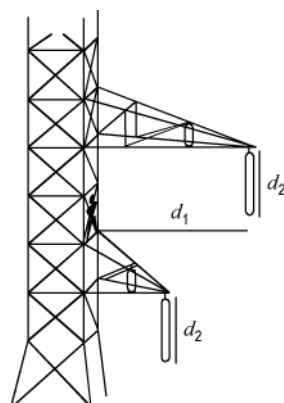
The approach in Annex F gives general criteria for the determination of k_f . The real influence of the floating conductive objects requires a detailed analysis (see Annex F).

Figure 2 illustrates various distinct live working tasks and the configurations in which they can occur. According to the considered configuration, a correct value of k_g and k_f should be determined.

See Annex F for more details.

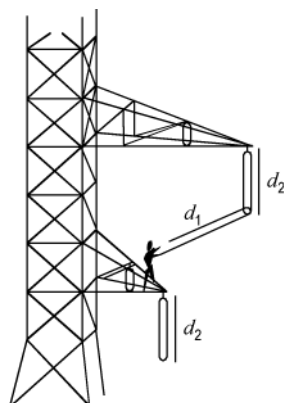
a) Worker not in the air gap

$$d_1 > D_A$$



b) Worker using insulating stick

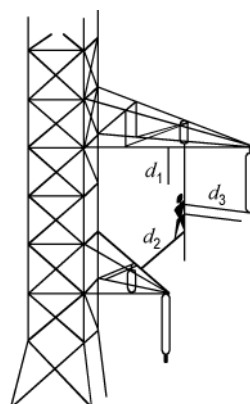
$$d_1 > D_A$$



c) Worker at intermediate potential

The smallest distance between

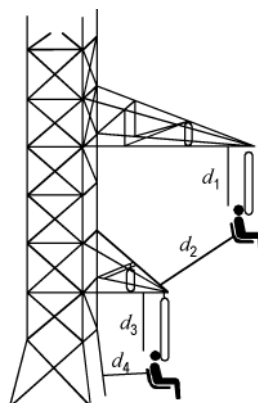
$$d_1 + d_3 \text{ or } d_2 + d_3 > D_A$$



d) Barehand work

The smallest distance between

$$d_1 \text{ or } d_2 \text{ and } d_3 \text{ or } d_4 > D_A$$



IEC 624/13

Figure 2 – Typical live working tasks

4.3.2.5 Damaged insulator factor k_i

When working next to insulators it is necessary to calculate the minimum residual insulation length, D_{Lins} . This is done taking into account the effects of damaged insulators or portion of damaged insulator on the minimum approach distance (refer to Clause 3 for the methodology).

Care shall be taken that the electrical integrity of the insulator assembly is not impaired by tools in parallel, moisture or contamination on the surface and damaged insulators (see Annex G).

The effect of damaged insulation on the withstand voltage in the work location shall be considered by ensuring that a minimum number of undamaged insulator units or insulator length is present before commencing work. The minimum residual insulation length, D_{Lins} , shall be determined from equation (10) using K_t as given in equation (11) and a value of k_i given in the empirically-derived formula (12). The residual insulation length may otherwise be determined from test data or by other means.

$$D_{Lins} = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (10)$$

where

$$K_t = k_s k_g k_a k_f k_i \quad (11)$$

$$k_i = 1 - 0,8 k_d (A_d/A_0) \quad (12)$$

where

A_0 is the length of undamaged insulator or number of undamaged insulator units not shunted by long arcing horn or grading ring;

A_d is the length of damaged insulator or number of damaged units in an insulator of A_0 length or units not shunted by long arcing horn or grading ring;

k_d is a coefficient characterizing the average state of the damaged units;

$k_d = 1$ for toughened glass insulators;

$k_d = 0$ to 1 for porcelain insulators, with $k_d = 0,75$ as an average value;

$k_d = 1,25$ for composite insulators affected by conductive or semiconductive damages (see Annex G).

Refer to Annex G for consideration of arcing horn or grading ring spacing.

NOTE Portions of insulators shielded by horns or rings do not significantly contribute to the dielectric strength of the string, hence damage in this area is less important and these portions can be shorted during work.

5 Evaluation of risks

The overall risk of breakdown of the insulation at the work location is associated with a number of situations described below. These situations, when combined, reduce the overall risk of breakdown. They are as follows:

- the actual system voltage is not always at a maximum value;
- the location of the work is not likely to correspond to the place where a transient overvoltage is at the maximum value;
- the stress of the actual transient overvoltage wavefront is less than the critical front;

- approximately half of the transient overvoltages will be of negative polarity, and are less severe;
- the frequency and amplitude of transient overvoltages are reduced by restricting reclosing of circuit breakers.

Thus, when no ergonomic distance is used, the value of 1,1 is recommended for K_S to reduce the overall risk of breakdown of the insulation to a level that correlates with other electrical work operations.

The overall risk of a breakdown occurring during live working, when an ergonomic distance D_E is incorporated, will be lower because an overvoltage is unlikely to arise at the work location at that instant where the ergonomic distance is entirely breached by inadvertent movement of the worker or object. Because of this, a value of $K_S = 1,0$ can be used when a defined ergonomic distance D_E is included and is great enough that the value of D_A is always greater than the value of D_A (when D_E is zero) with D_U calculated using $K_S = 1,1$ i.e.:

$$D_A = D_{U(K_S = 1,0)} + D_E > D_{U(K_S = 1,1)}$$

where $D_{U(K_S = 1,0)}$ and $D_{U(K_S = 1,1)}$ are D_U calculated using $K_S = 1,0$ and $K_S = 1,1$ respectively.

6 Calculation of minimum approach distance D_A

The following example is provided for demonstrating the use of equation (8) only and does not suggest proper or typical selection of k values, u_{e2} , or other factors.

The electrical distance D_U is calculated (in metres) from:

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080 K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

where

F is the floating conductive object length (see 4.3.2.4);

$U_{90} = K_S U_2$ (from equation (5));

K_t is obtained in equation (9) $K_t = k_s k_g k_a k_f k_i$.

After selecting an appropriate value for the ergonomic distance D_E (see Clause 5 and Annex A), the minimum approach distance D_A can then be determined by equation (1):

$$D_A = D_{U(K_S=1,0)} + D_E$$

NOTE The value chosen for the ergonomic distance differs between users. It generally falls in the range of 0,2 m to 1 m (see Clause 5 and Annex A).

In this example, electrical distance D_U is calculated for $K_S = 1,0$; $k_s = 0,936$; $k_g = 1,2$; $k_a = 0,941$ (from Table 1 for 1 000 m); k_f and $k_i = 1,0$, $U_S = 525$ kV, $u_{e2} = 2,2$, $F = 0$ and $D_E = 0,3$ m.

$$D_U = 2,787 \text{ m (2,8 m)}$$

$$D_A = 2,8 \text{ m} + 0,3 \text{ m} = 3,1 \text{ m}$$

Annex A **(informative)**

Ergonomic distance

A.1 Overview

Two approaches, or a blend of both, can be used to establish an ergonomic distance:

- specify only an absolute minimum approach distance and let the skilled worker decide the extra distance required for the particular job to be done;
- specify a complete minimum approach distance allowing a sufficient safety margin to account for all possible contingencies.

A number of factors have to be considered before specifying the minimum approach distance, or commencing work close to a live conductor. As it is impractical and inappropriate to recommend an ergonomic distance here, the following points are provided as guidelines for consideration by individual organisations.

A.2 Training, knowledge and skill

Basic to live working is knowledge of the hazards and means of personal protection, by minimum approach distances and other methods. Workers need to be thoroughly trained in live work and in the job at hand. During work, attention needs to be shared between the work being performed and respecting the minimum approach distance. Adequate training and practice in the work procedure will reduce the possibility of attention being diverted from respecting the minimum approach distance by unexpected situations.

A.3 Protective barriers

A barrier is an obstacle that is in place to reduce or eliminate the ergonomic distance requirement. It limits the distance workers can reach or approach to anything that is at a different electric potential. A barrier could be metallic or non-metallic material.

A.4 Possibility of error

The possibility of errors being committed during the work depends on the work procedure being used, personal factors, effects of the environment and the extent to which the workers actions are monitored by others.

A.5 Work procedure

Different work positions and methods will require different allowances for unintentional movement. The stability of the worker's position can also vary from task to task, e.g. working above the earth, compared with working on the earth. A complex or strenuous job is also more likely to divert the worker's attention away from observing the minimum approach distance.

Because of these factors, consideration could be given to using a different ergonomic distance for different work situations or procedures.

A.6 Personal factors

A worker's physical, mental and emotional states are also possible causes for unintentional movement. These factors are, in turn, influenced by the duration and strenuousness of the job, for instance. Live working requires constant attention, both to the procedures and the minimum approach distance, attention which can be readily distracted by personal factors. For this reason, self control and safety awareness are essential skills to work at the minimum approach distance.

A worker's ability to judge the minimum approach distance correctly is also important. For this reason it may be beneficial to increase the ergonomic distance with the voltage. However, too large a distance at high voltages will make small components on the live conductors difficult to see, and tools heavier to handle.

Workers should not wear clothing with loose parts that could fall, blow or swing close to the live conductors. This includes equipotential bonding leads of conductive suits.

A.7 Environmental factors

Certain environmental conditions are generally taken into account by prohibiting work at the minimum approach distance under those conditions. For instance, work is normally not permitted during nearby thunderstorms, or when there is a continuous film of water on the surface of insulating tools.

Adverse conditions may also be created by other environmental conditions, either directly, or by diverting attention away from the authorized work procedures. Strong winds move conductors, supports or equipment (e.g. aerial devices) dangerously. Dust storms are an eye hazard. Ice on structures will make footing insecure. Woodpecker holes present a climbing hazard. Mist or sea spray may pose a hazard to system or tool insulation. Smooth surfaces may be slippery. Darkness or glare may impair vision. Consideration should also be given to the effect of high temperature and humidity to worker fatigue. These are some of the environmental influences on work close to live conductors, some of which will need to be taken into account when establishing minimum approach distances.

A.8 Monitoring

To warn workers of dangerous situations arising during the work, it can be sometimes beneficial to require continuous monitoring by an observer. Failing that, the workers should be encouraged to describe aloud to one another each step in the work procedure before taking it. The procedure to be followed should also be detailed and discussed between the foreman and workers before commencing work.

Annex B (informative)

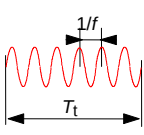
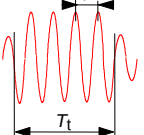
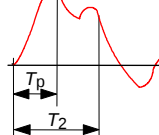
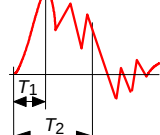
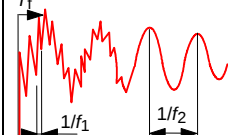
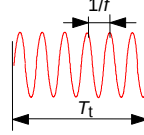
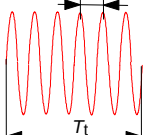
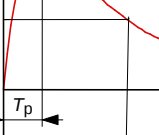
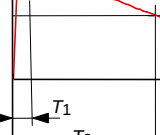
Overvoltages

B.1 The different types of overvoltages

The overvoltage values are expressed in p.u., and 1 p.u. is equal to $U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$ (see 2.1.10).

According to IEC 60071-1, voltages and overvoltages are divided in the classes shown in Table B.1.

Table B.1 – Classification of overvoltages according to IEC 60071-1

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \text{ }\mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 }\mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \text{ }\mu\text{s} < T_1 \leq 20 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ }\mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes	 $f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 }\mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 50 \text{ }\mu\text{s}$	a
Standard withstand voltage test	a	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a

^a To be specified by the relevant apparatus committees.

For live working applications, the overvoltages of major concern, in the voltage range of interest, are the slow front overvoltages due to switching operations. Fast front transients, such as lightning overvoltages, are not generally of importance, since live work is not normally performed under conditions of inclement weather. Lightning may cause flashover at the strike location. Otherwise the resulting overvoltage is attenuated such that the impulse level will not result in a flashover at the work location, that is, at distances over 10 km. Permanent and temporary low frequency overvoltages are usually also not of concern, since they are not critical for the air gaps which are required to withstand switching overvoltages during live work.

In unusual circumstances, significant low frequency overvoltages may arise due to ferro-resonance of network elements in unstable configurations. This hazard should be addressed by procedures which ensure that the phenomenon is avoided.

B.2 Transient slow-front overvoltages

Slow-front overvoltage amplitudes depend on many parameters such as the characteristics of the system, the point of the system, the type of event considered. Moreover, even at the same point and for the same family of events, the overvoltages have a statistical nature. So slow-front overvoltage amplitudes are evaluated on the basis of a statistical approach: reference is usually made to the overvoltage having the probability of 2 % to be reached or exceeded (U_{e2} for phase to earth and U_{p2} for phase to phase) and to the standard deviation of the statistical distribution, assumed as gaussian, σ .

The most common overvoltage families are examined in the following.

B.2.1 Origin and typical values

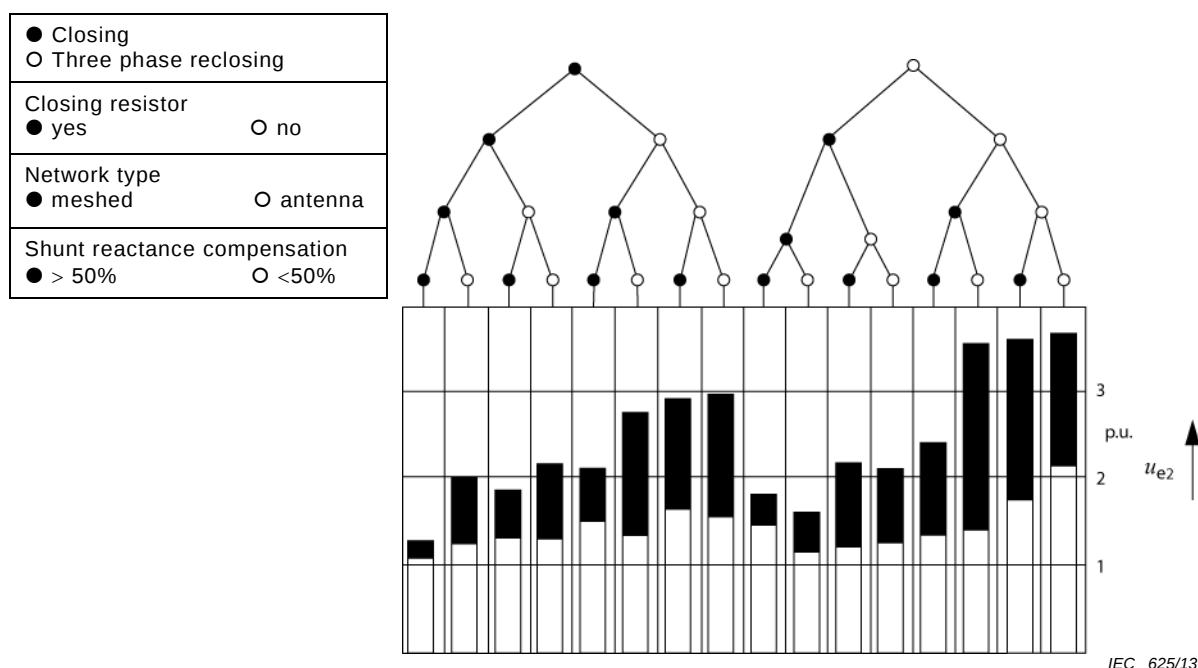
B.2.1.1 Phase to earth overvoltages

Closing and reclosing overvoltages are among the most frequent type of overvoltages.

The amplitudes of the phase to earth overvoltages depend on many parameters: feeding network (short circuit power, zero to positive sequence impedance ratio, configuration, actual voltage level on the feeding), switched line (length, electrical characteristics, level of residual voltage left by previous energization), line shunt compensation, energized parallel lines, circuit breakers (pole span, prestrike, phase angle at the instant of switching, closing resistors), point along the switched line (the voltage distribution along the line is rising from the substation to the opposite end).

Figure B.1 summarizes the maximum amplitude ranges of phase to earth overvoltages at line energization depending on the various conditions considered. The range of u_{e2} is quite large ranging from about 1,2 to about 2,8 for closing operations and from about 1,5 to about 3,8 for reclosing operations.

Other means to reduce overvoltages, not considered in Figure B.1, are surge arresters, co-ordinating gaps or synchronized switching.



NOTE The highest levels correspond to the longest line.

Figure B.1 – Ranges of u_{e2} at the open ended line due to closing and reclosing according to the type of network (meshed or antenna) with and without closing resistors and shunt reactors

Overvoltages due to opening capacitive loads are usually less severe than those due to closing. A conservative estimate of their value may be thus obtained from closing overvoltage values.

Overvoltages from fault initiation may reach 1,6 p.u. to 1,7 p.u. in normal operating conditions, and their amplitudes may not be easily mitigated.

Overvoltages from fault clearing may reach 1,7 p.u. to 1,8 p.u.

B.2.1.2 Phase to phase overvoltages

As for phase to earth, the amplitude U_{p2} of the phase to phase overvoltages depends markedly on the reduction means adopted.

Normally, when no reduction means are adopted or when the overvoltages are controlled by closing resistors, the relation between the phase to phase overvoltage and the phase to earth one may be given by the following relation:

$$U_{p2} = 1,35 U_{e2} + 0,45$$

with a standard deviation:

$$\sigma_{pp} = \sigma_{pe} \sqrt{2}$$

The relationship may be different when the overvoltages are controlled by surge arresters.

B.2.2 Overvoltages under abnormal conditions

Among the possible abnormal conditions which can lead to very high overvoltages, restrikes between the contacts of circuit breakers during opening is considered, and in particular the following conditions may be of concern:

- single or three-phase opening of no load lines;
- three-phase clearing of phase-to-earth fault.

Such abnormal behaviour may lead to overvoltage amplitudes of the same order or even higher than those under three-phase reclosing.

However, the restrike probability of circuit breakers is normally low, and is very low for the modern circuit breaker. So the low probability of these events is not such as to influence the probability distribution of the family considered (opening or fault clearing) and thus the relevant U_{e2} value.

B.3 Control of overvoltages for live working

As shown previously, depending on the nominal voltage of the network, the ratio of the slow-front overvoltage maximum amplitude and the maximum voltage of the system can vary widely depending on the control philosophy adopted, which may change with the system voltage.

Many live working procedures inhibit closing or reclosing operations during live work. In this case, only overvoltages due to opening, fault initiation and fault clearing should be considered and their value may vary in a wide range (from about 1,6 p.u. to 2,8 p.u.).

Furthermore, it has to be considered that overvoltage control techniques are applied for the high system voltages which are not applied in the lower system voltages: thus generally u_{e2} (p.u.) decreases when the system voltage is increased.

In general, the amplitude of overvoltages depends on many parameters and needs an in-depth analysis for the specific system considered. This is the reason why overvoltage values are not proposed in this annex.

Finally, a further approach to controlling worksite overvoltages is to be mentioned, which consists of installing temporary voltage-limiting devices for the duration of the work. The voltage-limiting device often used is the rod-rod gap, which is installed on the phase on which live work is performed, preferably on immediately adjacent structure(s). This gap, which was conceived and first used in the late 1960s, is portable and is installed only for the duration of the live work.

Other means to reduce overvoltages are surge arresters or synchronized switching. Metal oxide varistor or MOV arresters are preferable to protective air gap because they reduce overvoltages without causing operation of relaying equipment and circuit breakers.

Annex C (informative)

Dielectric strength of air

The shape of a standard switching impulse used for tests has a 250 µs time-to-crest and a 2 500 µs tail. The switching overvoltages arising on operating power systems have a time-to-crest ranging from 50 µs to 2 000 µs. The time-to-crest of this overvoltage has a considerable influence on the disruptive withstand voltage U_{50} of an air gap and varies with the air gap distance. The magnitude of the voltage is least at a so-called critical time-to-crest. A waveform with a critical time-to-crest should be assumed in determining the minimum approach distance.

As a result of numerous switching impulse tests, air gaps can be characterized by the minimum strength observed for the critical time-to-crest of the transient overvoltage, as a function of the geometrical characteristics of the air gap, which are mainly the gap spacing and the electrode configuration. Among different gaps of the same spacing, d (in metres), the positively stressed rod-plane gap has the lowest strength and is used as a reference. For practical rod-plane gaps of length between 0,5 m and 12 m, the positive-polarity critical-front-time dielectric strength U_{50RP} is given by (formula 3 of CIGRÉ Brochure 151):

$$U_{50RP} = 1\,080 \ln(0,46d + 1) \text{ kV} \quad (\text{C.1})$$

For other gap configurations, and to take account of other effects, the statistical withstand voltage U_{90} can be determined by applying a factor K_t as follows:

$$U_{90} = K_t U_{50RP} \quad (\text{C.2})$$

that is:

$$U_{90} = K_t 1\,080 \ln(0,46d + 1) \quad (\text{C.3})$$

By transforming equation (C.3) and taking into account the floating conductive object distance F , one obtains equation (8) for the electrical distance D_U .

For each gap distance, and under the same atmospheric conditions, there is a statistical variation in breakdown voltage. The probability of breakdown is usually assumed to have a normal (Gaussian) distribution based on tests. The conventional deviation of this distribution varies with waveform, polarity of the overvoltage, gap geometry and atmospheric conditions.

The relationship between the statistical withstand voltage U_{90} and the 50 % disruptive discharge voltage U_{50} is:

$$U_{90} = U_{50} - 0,0128 s_e U_{50} \quad (\text{C.4})$$

where s_e is the normalized value of the standard deviation of U_{50} expressed in percent. Defining k_s as:

$$k_s = 1 - 0,0128 s_e \quad (\text{C.5})$$

equation (C.4) becomes:

$$U_{90} = k_s U_{50} \quad (\text{C.6})$$

Unless the value of s_e is known from tests representative of the gap configuration and distance concerned, a value of $s_e = 5 \%$ should be assumed. Equation (C.5) then becomes:

$$k_s = 0,936 \quad (\text{C.7})$$

Annex D (informative)

Gap factor k_g

One of the greatest influences on the electrical strength of gaps above 1 m is the shape and size of the energized and the earthed conductive parts. The weakest of the gap configurations is the rod-plane with a positive switching impulse applied to the rod.

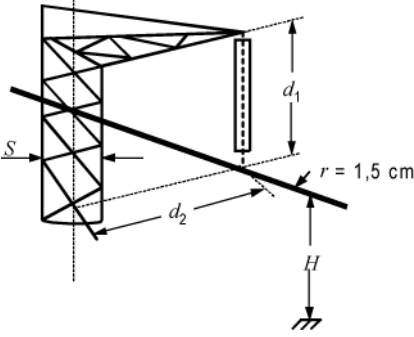
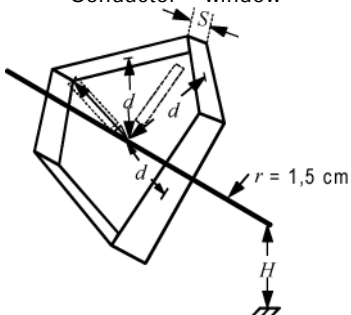
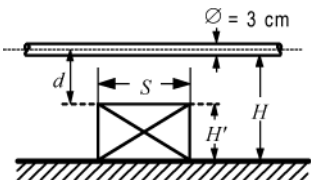
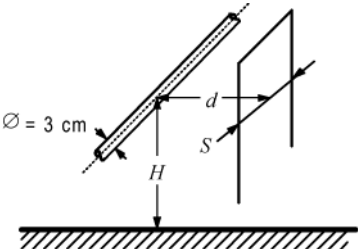
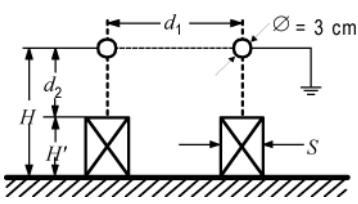
If the earthed conductive part is different from a plane or the live conductive part is larger than a rod, U_{50} is greater than for the rod-plane configuration by a so-called "gap factor" k_g . The smaller the earthed conductive part (e.g., tower, bus support structure) and the further it is from the earth plane, the greater the value of k_g , up to the limit where the configuration becomes an isolated conductor-rod gap, which has the greatest electrical strength.

Typical gap factor values for common configurations are shown in Table D.1, reproduced from CIGRÉ 72, and also in IEC 60071-2. Table D.1 also gives expressions for the gap factor k_g (shown here as " k ") permitting its calculation for different gap configurations. Refer to CIGRÉ 72 for further details regarding determination of the gap factor.

It is suggested that a gap factor be chosen from the range of values given in Table D.1 (for phase to earth configurations), to calculate the electrical distance. Under certain circumstances, such as a conductor dead-ending on a wide structure and having no grading rings (unlikely for systems above 300 kV), or for work near conductors passing over large structures, the gap factor may be as low as 1,1. Conversely, for narrow structures, the gap factor may approach 1,6. The gap factor may be general and may cover several structure types.

For phase to phase configuration, the range of the gap factor is 1,45 to 1,6.

Table D.1 – Gap factors for some actual phase to earth configurations

Configuration	Formula	Typical value
Conductor – cross-arm 	$k = 1,45 + 0,015 \left(\frac{H}{d_1} - 6 \right) + 0,35 \left(e^{-8S/d_1} - 0,2 \right) + 0,135 \left(\frac{d_2}{d_1} - 1,5 \right)$ Applicable in the range: $d_1 = 2 \text{ m to } 10 \text{ m}$ $d_2/d_1 = 1 \text{ to } 2$ $S/d_1 = 0,1 \text{ to } 1$ $H/d_1 = 2 \text{ to } 10$	$k = 1,45$
Conductor – window 	$k = 1,25 + 0,005 \left(\frac{H}{d} - 6 \right) + 0,25 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Applicable in the range: $d = 2 \text{ m to } 10 \text{ m}$ $S/d = 0,1 \text{ to } 1$ $H/d = 2 \text{ to } 10$	$k = 1,25$
Conductor – lower structure 	$k = 1,15 + 0,81 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1167} + 0,02 \frac{H'}{d} - A \left[1209 \left(\frac{H'}{H} \right)^{116} + 0,03 \left(\frac{H'}{H} \right) \right] \left(0,67 - e^{-2S/d} \right)$ where $A = 0$ if $S/d < 0,2$ and $A = 1$ if $S/d > 0,2$ Applicable in the range: $d = 2 \text{ m to } 10 \text{ m}$, $S/d = 0 \text{ to } \infty$, $H'/H = 0 \text{ to } 1$	$k = 1,15$ for conductor-plane to 1,5 or more
Conductor – lateral structure 	$k = 1,45 + 0,024 \left(\frac{H'}{H} \right) - 6 + 0,35 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Applicable in the range: $d = 2 \text{ m to } 10 \text{ m}$, $S/d = 0,1 \text{ to } 1$, $H/d = 2 \text{ to } 10$	$k = 1,45$
Rod – rod structure (open switchgear) 	Horizontal rod-rod-structure $k_1 = 135 - 0,1 \frac{H'}{H} - \left(\frac{d_1}{H} - 0,5 \right)$ Rod-lower structure $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H} - A 1093 \frac{H'}{H} \left(0,549 - e^{-3S/d_2} \right)$ where $A = 0$ if $S/d_2 < 0,2$ and $A = 1$ if $S/d_2 > 0,2$ Applicable in the range: (k_1) $d_1 = 2 \text{ m to } 10 \text{ m}$, $d_1/H = 0,1 \text{ to } 0,8$, $d_1 < d_2$ (k_2) $d_2 = 2 \text{ m to } 10 \text{ m}$, $S/d_2 = 0 \text{ to } \infty$, $d_2 < d_1$	$k_1 = 1,3$ $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H}$

Annex E (informative)

Allowing for atmospheric conditions

E.1 Overview

The insulation strength of a given air gap increases with air density and with the humidity of the air up to the point where condensation forms on insulator surfaces. The empirically determined electrical strength of particular gaps, as described by equation (C.1) for instance, is normally applicable at standard atmospheric conditions (20 °C, 101,3 kPa, 11 g/m³ humidity). But, for minimum approach distances to be appropriate for all anticipated atmospheric conditions, the range of influence of these three atmospheric factors on the electrical strength of the air gap shall be known.

The method used here, to allow for adverse atmospheric conditions, is as defined in IEC 60060-1. Accordingly, the atmospheric correction factor K is given by:

$$K = k_1 k_2$$

where

K is k_a ;

k_1 is the air density correction factor;

k_2 is the humidity correction factor.

E.2 Air density

The effect of air density is accounted for by the relative air density δ given by:

$$\delta = (p/p_0) [(273 + t_0)/(273 + t)]$$

where

t and p are the actual temperature and barometric pressure;

t_0 and p_0 are the standard temperature and pressure of 20 °C and 101,3 kPa.

Hence:

$$\delta = 2,89 p/(273 + t)$$

The air density correction factor k_1 depends on the gap configuration and type of overvoltage which can be accounted for by an exponent m applied on the relative air density, i.e.:

$$k_1 = \delta^m$$

The combination of temperature and air pressure giving the lowest air density and hence the lowest gap breakdown voltage is high temperature and low pressure. However, the highest expected temperature and lowest pressure are unlikely to occur simultaneously.

CIGRÉ 72 proposes two more accurate methods of correcting for air density: a physical method, and the following empirical expression which is based on investigations conducted up to 3 000 m and was derived for positive switching impulses to fit data for various air gap configurations:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{0,8 [1 + T (1 - \delta)] (\delta - 0,2 g_0)}{(1 - 0,2 g_0)} + 0,2 \quad (\text{E.1})$$

where U_0 is the breakdown voltage in standard conditions, in kilovolts.

$$T = 1,4 \frac{1 - 0,8 g_0}{1 - 0,2 g_0} (k_g)^{1,6} \quad (\text{E.2})$$

$$g_0 = \frac{U_0}{500 d \left[1 + \frac{k_g - 1}{3} \right]} \quad (\text{E.3})$$

where d is the air gap length, in metres.

E.3 Humidity

The effect of humidity on the breakdown voltage is complex. It is usually accounted for by a factor defined as k in IEC 60060-1, the value of which is empirically related to humidity, and an exponent w , which depends on the gap length and configuration, and on the waveshape. Thus, the humidity correction factor k_2 is:

$$k_2 = k^w$$

The value of w , as well as the exponent m for the relative air density, can be determined by the methods given in IEC 60060-1.

E.4 Altitude

The electrical strength of an air gap is weakened at higher altitude, due to the reduced air pressure, although the reduced temperature and humidity have a modifying effect. The reduction in pressure with altitude can be calculated from the expression:

$$p/p_0 = e^{-(H/8150)} \quad (\text{E.4})$$

where H is the height above sea level, in metres.

The mean air pressure at a certain altitude can then be assumed to be the standard pressure (101,3 kPa) corrected for altitude, with variations in pressure occurring around this value.

However, because the average temperature and humidity generally decrease with altitude, the overall atmospheric correction factor k_a should take this into account. The temperature and humidity variations are likely to vary depending on geographical location, and a precise value of the mean correction factor for the altitude of a given location can only be determined by analysis of local weather data. The correction factor determined in this way also depends on the gap length and configuration, and overvoltage wavefront.

To avoid having to apply an altitude correction for every installation in a power system, a common correction factor is usually taken for all installations at elevations up to an appropriate reference altitude, below which most of the power system is located. Other correction factors can then be determined for further ranges of altitude above this reference altitude. A reference altitude of 1 000 m is suggested here since it is commonly used. But some power systems are situated at altitudes well below the 1 000 m elevation; thus

Table E.1 shows values for lower altitudes so that a higher and less restrictive value of k_a can then be used.

E.5 Total atmospheric correction factor

The total correction factor can be described statistically by a mean value k_a and a relatively small normalized standard deviation of up to about 1,5 %. The normalized standard deviation s_a of k_a can be combined with the deviation of the air gap breakdown voltage s by:

$$s_t = \sqrt{(s_a^2 + s^2)}$$

Since the s_a of 1,5 % is small compared with the suggested value of s of 5 %, it has only little effect on the total deviation s_t . It should be noted, however, that for altitudes above about 1 000 m, s_a may have values greater than 1,5 %.

The values of k_a given in Table E.1 can be derived using equations (E.1) to (E.4), based on standard temperature and humidity (20 °C and 11 g/m³) and using equation (8) with $k_g = 1,2$ to determine the factor g_0 . Note that larger gap lengths give larger values of k_a .

It has been found that when k_a is calculated using actual climate data from meteorological stations located at different altitudes (instead of assuming standard values of humidity and temperature of 11 g/m³ and 20 °C), the values of k_a are higher than the value calculated above, so that the calculated values of k_a are probably conservative. More precise, and probably higher, values of k_a can be determined by analysis of actual meteorological data.

Table E.1 – Atmospheric factor k_a for different reference altitudes and values of U_{90}

Altitude m	Range of U_{90} kV						
	<199	200-399	400-599	600-799	800-999	1 000-1 199	>1 200
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,990	0,992	0,993	0,995	0,996	0,998	0,999
300	0,970	0,975	0,980	0,984	0,988	0,992	0,995
500	0,950	0,958	0,966	0,973	0,980	0,985	0,991
1 000	0,901	0,916	0,931	0,944	0,955	0,966	0,976
1 500	0,853	0,875	0,894	0,912	0,928	0,943	0,956
2 000	0,807	0,833	0,857	0,879	0,899	0,917	0,933
2 500	0,763	0,792	0,820	0,845	0,868	0,888	0,908
3 000	0,720	0,752	0,782	0,810	0,835	0,858	0,880

E.6 Method of calculation of values in Table E.1

The following steps were used to calculate each of the values given in Table E.1:

- a) U_{90} is the lower value in the range (e.g. 200 kV in the 200 kV to 399 kV range);
- b) $U_0 = U_{50} = U_{90} / 0,936$ is the breakdown voltage for standard conditions;
- c) let $k_g = 1,2$;
- d) $d = 2,17 \left[e^{\frac{U_{90}}{1080 k_s k_g}} - 1 \right]$ (equation (8)), i.e. the gap with $k_g = 1,2$ that would withstand U_{90} at standard atmospheric conditions ($k_s = 0,936$);
- e) calculate g_0 using equation (E.3);
- f) calculate T using equation (E.2);
- g) calculate $\delta (= p/p_0)$ for the altitude using equation (E.4) (this assumes that δ changes only with mean pressure and there is no change in mean temperature with altitude);
- h) calculate $k_a (= U/U_0)$ using equation (E.1).

Annex F (informative)

Influence of floating conductive objects on the dielectric strength

F.1 Effect of tools for live working

During live working, the strength of the system insulation can be reduced by the introduction, into the air gap, of tools with metallic fittings or various conducting equipment required for the work in progress. During bare hand work, the worker in conductive clothing is transferred, at a given time, from the earthed structure to the live conductor, and vice versa. Furthermore, when the worker is at the conductor, the conductor-earth air gap is changed, which may alter the gap factor and the dielectric strength depending on the size and position of the conductive objects introduced into the air gap.

The influence of tools or worker cannot be correctly calculated and consequently it should be determined by laboratory tests on representative configurations.

The electrical strength of tools for live working is also reduced by wetting, although this can be combated, for some tools used for work up to medium voltage only, by the use of weather sheds. Proper coating of the surface is also a valid technique (e.g. the use of silicone coatings). In any case, the surface of all tools shall always be kept clean and in good condition.

F.2 Small conductive pieces

The length of the air gap is reduced by the length (along the gap axis) of conductive pieces introduced into, or already present in, the gap. These pieces can be introduced or present at the live end or the dead end of the insulation, or they can be at a floating electric potential within the gap. But, whatever the location, the strength of the gap decreases as the number and/or length of the pieces increase. Consequently, it is important that any conductive components be as small and few as possible.

To take into account the presence of these small conductive pieces, it is sufficient, from a practical point of view, to subtract the sum of their maximum lengths F measured along the gap axis, from the overall length of the air gap L_f and to determine the resulting breakdown voltage of the air gap using the equation:

$$U_{50} = 1\,080 \ln(0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.1})$$

where L_f and F are expressed in metres.

NOTE The floating conductive object factor k_f is equal to 1 when the length of the floating conductive object is lower or equal to 10% of air gap.

F.3 Large conductive objects

F.3.1 General electric field considerations

The presence of a worker in the air gap, or of conductive objects of large dimension L compared to the length of the air gap, creates a distortion of the electric field in the gap.

In this case, and depending on the size and shape of the floating conductive object and its position in the gap, the field distortion can lead to either a decrease or an increase in the

strength of the gap. The most severe conditions leading to decrease in strength are obtained when:

- the object has protrusions on the side facing the earthed structure;
- the object is on or near the gap axis;
- the distance between the object and the live conductor lies between a quarter and a third of the total air gap length.

As for small conductive pieces, it is easier to compare this strength to one of an air gap having the total length of air equal to $L_f - L$, or $L_f - F$.

The minimum strength of the gap in the presence of a floating conductive object can then be predicted by equation (F.2), where k_f is a constant applicable to floating conductive objects.

$$U_{50} = 1080 k_f \ln (0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.2})$$

The floating conductive object factor k_f depends on a large number of parameters. For long-shaped conductive objects whose largest dimension is within a direction parallel to the air gap, or for conductive objects whose three dimensions are of the same order of magnitude, it is possible, to a certain extent, to predict values for k_f . This is possible through the analysis and generalisation reported in F.3.2 based on information currently available.

However, such a generalization is not valid for large flat conductive objects perpendicular to the air gap. (i.e β is almost nil, while k_f can be as low as 0,75). In the absence of relevant test data and analysis, k_f is best determined using test configurations representative of actual live line work operations.

F.3.2 Analysis of experimental data

F.3.2.1 General

Most studies have shown that switching impulses of positive polarity are more critical than those of negative polarity, although the observed percentage decrease in dielectric strength of gaps with conductive objects is greater when they are stressed with negative polarity impulses than with positive polarity impulses.

Floating conductive objects have two main influences:

- they reduce the net air gap. This reduction can be very significant in the case of physically large conductive objects. This effect is taken into account by considering the dielectric strength of the resulting net air gap (or reduced length $L_f - F$). The reduced length $L_f - F$ is obtained by subtracting the length of the conductive objects from the original air gap without the object;
- they may affect the dielectric strength of the resulting net air gap, characterised by a reference gap factor k_g , due to the modification of the field distribution within the gap. This effect is taken into account by introducing the correction coefficient k_f .

The influence of floating conductive objects is quite complicated since it depends on a number of parameters, as shown in the following.

F.3.2.2 The influence of the position of the object within the gap

All the tests performed in different studies show that the withstand voltage of a clearance containing a floating conductive object is reduced.

When phase to earth configurations are considered, the minimum strength is reached when the floating conductive object is in the vicinity of the live electrode.

When phase to phase configurations are considered, the minimum strength is reached when the floating conductive object is in the vicinity of the positive electrode.

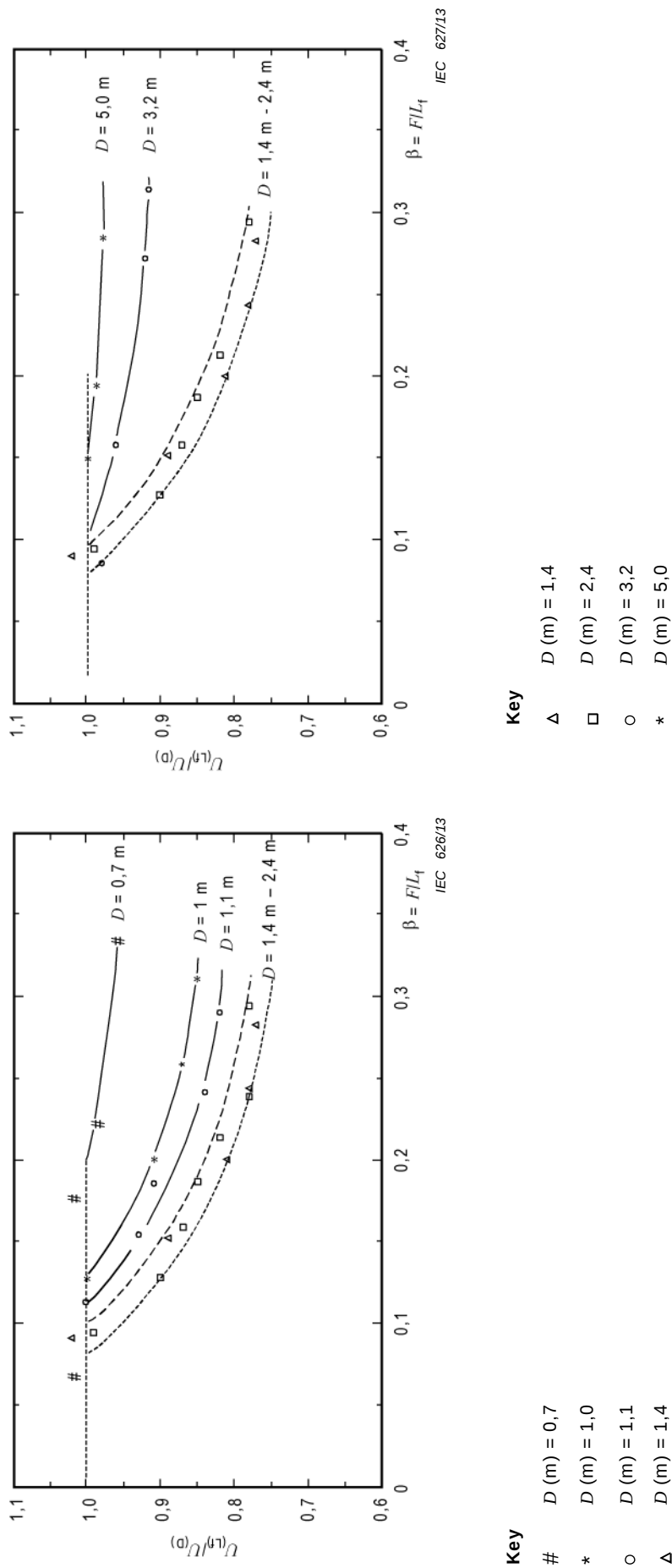
F.3.2.3 The influence of the length of the floating conductive objects

Figures F.1 and F.2 present the reduction in the discharge voltage of the air gap due to alteration in the electric field caused by the presence of floating conductive objects of different lengths in critical position along the axis of the gap.

The graph in Figure F.1, which gives the k_f value based on phase to earth rod-rod configuration previously considered as a function of the ratio $\beta = F/(D + F)$, (or $\beta = F/L_f$), indicates that, in the presence of a conductive object along the air gap in the critical position, the alteration in the electric field produces a reduction in dielectric strength that is affected by β . For each value of D tested, the effect of reducing the dielectric strength is practically nil for $\beta < 0,1$, and then increases progressively when β is increased, with a tendency toward saturation for large values of β .

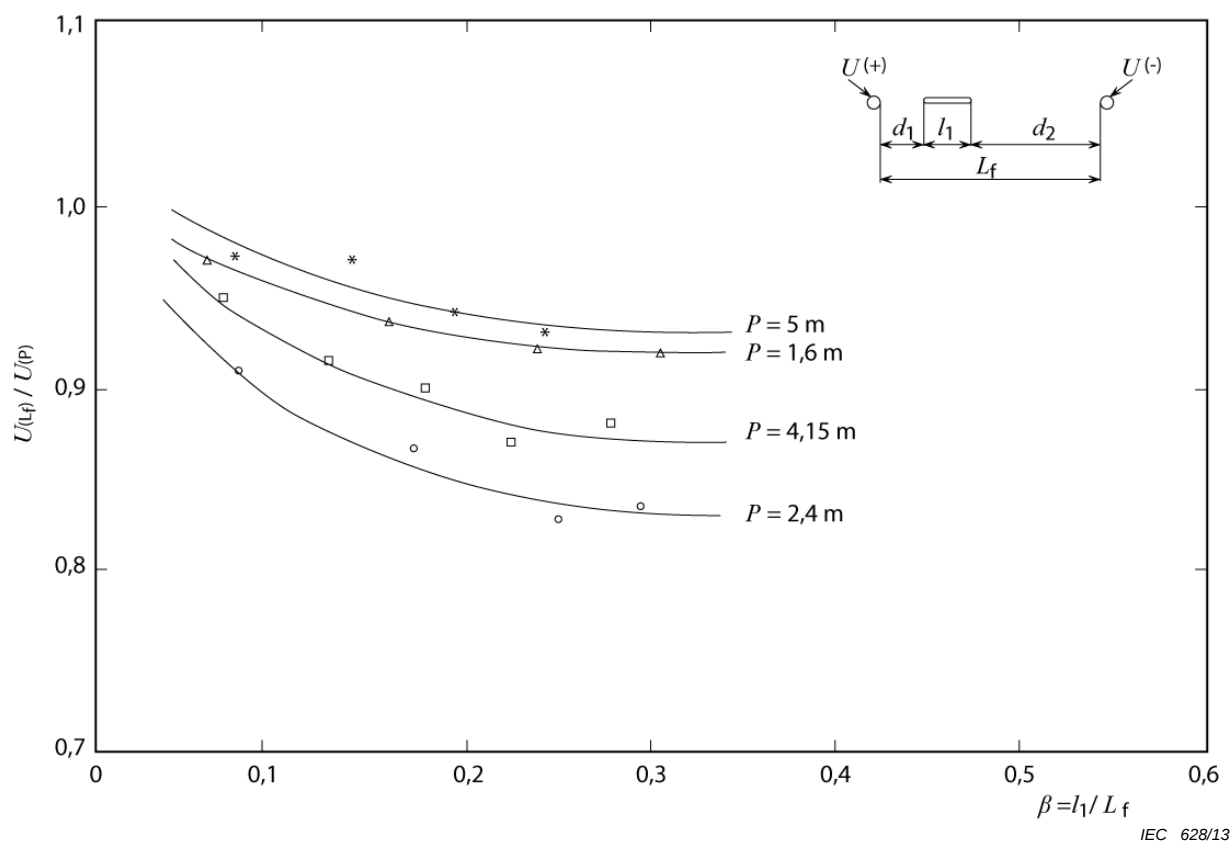
In Figure F.2 is shown the behaviour of a phase to phase conductor-conductor configuration.

NOTE The length of the floating conductive object F is always added when calculating the electrical distance D_U (see Equation (8) of 4.3.1).



NOTE See Clause 2 for symbols.

Figure F.1 – Influence of the length of the floating conductive objects – phase to earth rod-rod configuration – 250 μs / 2 500 μs impulse



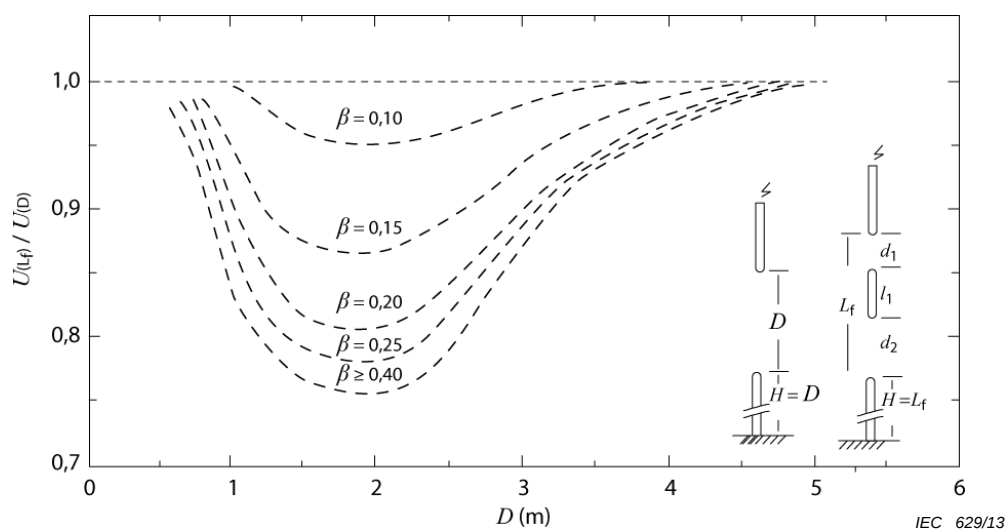
$d_1 + d_2 = P = \text{constant}$
 $\beta = d_1 / L_f = 0,15$ (critical value)

NOTE See Clause 2 for symbols.

Figure F.2 – Influence of the length of the floating conductive objects – phase to phase conductor-conductor configuration – 250 μs / 2 500 μs impulse

F.3.2.4 The influence of the length of the remaining air gap (D or P)

Examples of the influence of D or P are shown in Figures F.1 and F.2. For a fixed β value, the influence of floating conductive objects shows, both for phase to earth and phase to phase, a U shape (see Figures F.3 and F.4). The minimum of k_f (maximum influence of the floating conductive objects) is reached for lengths of the remaining air gap equal to 2 m and 3 m respectively for phase to earth (D) and phase to phase (P) configurations.

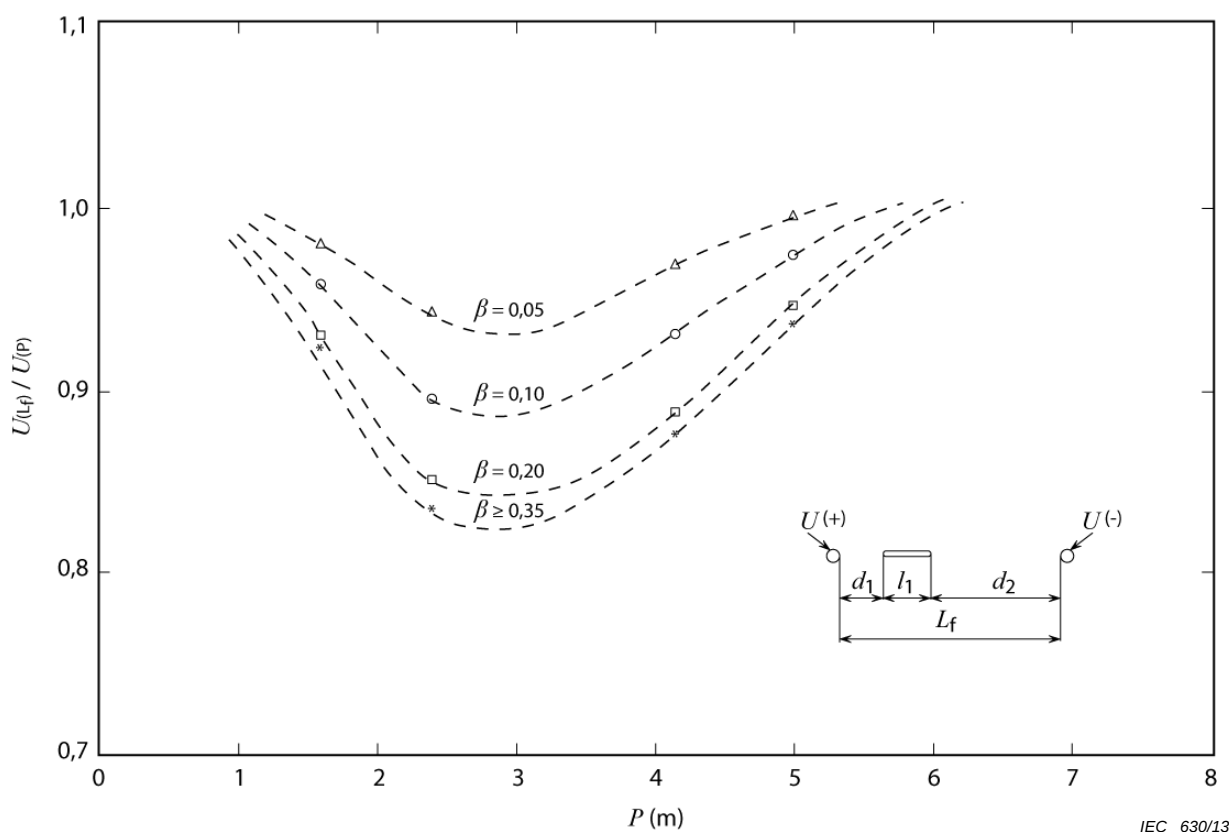


$$d_1 + d_2 = D$$

$$Y = d_1 / L_f = 0,3 \text{ (critical value)}$$

NOTE See Clause 2 for symbols.

Figure F.3 – Reduction of the dielectric strength as a function of the length D for constant values of β – Phase to earth rod-rod configuration



$$\beta = l_1 / L_f$$

$$d_1 + d_2 = P$$

$$Y = d_1 / L_f = 0,15 \text{ (critical value)}$$

NOTE See Clause 2 for symbols.

Figure F.4 – Reduction of the dielectric strength as a function of the length P for constant values of β – Phase to phase conductor-conductor configuration

F.3.2.5 The influence of the shape and number of objects in the gap

The examination of experimental data leads to the following considerations:

- the presence of multiple conductive bodies along the air gap, rather than just one, the largest, in the critical position, seems, as compared with the latter conditions, to involve a smaller reduction in the dielectric strength of the air gap;
- conductive objects shaped like a double T, being of large transverse dimensions as compared with the bar (as much as 10 times greater), given the same length measured along the axis of the air gap, seem to produce reductions in dielectric strength comparable to those caused by the bar itself. Otherwise, when the air clearance is divided by a perfectly spherical conductive object, the alteration in the electric field appears to be virtually nil.

F.3.2.6 The influence of the displacement from the gap axis

The reduction in dielectric strength caused by the conductive object would seem to be cancelled out when that object, moved parallel to itself, is shifted a distance r away from the axis of the air gap in such a way to have $r > 2,5 F$.

F.3.2.7 The influence of the gap factor k_g

The influence increases with increasing gap factor and is higher for phase to earth than for phase to phase configurations.

F.3.3 Evaluation of the influence of floating conductive objects on the switching impulse dielectric strength

The application of equation (F.2) requires the evaluation of k_f . The most direct approach is to derive generalisation by interpolation and extrapolation of the available experimental data.

As an example, a 5th grade polynomial may be used, to interpolate with good accuracy the results of Figure F.3 (phase to earth configurations), for β values higher than 0,1 and D values lower than 4 m:

$$k_{f(\beta=0,4)} = 0,0026D^5 - 0,033D^4 + 0,124D^3 - 0,049D^2 - 0,415D + 1,225$$

$$k_f \cong \left[1 - \left(1 - k_{f(\beta=0,4)} \right) \left(1 - e^{-2\alpha(\beta-0,1)} \right) \right]$$

with D in metres and with the following limitations:

- for β values lower than 0,1, k_f is equal to 1 independently of D ;
- for D values higher than 4 m, it is assumed that k_f is equal to 1.

A similar relationship may be derived to interpolate the data shown in Figure F.4 (phase to phase configurations).

F.3.4 Large floating conductive objects requiring special consideration

Helicopters have been used for live working throughout the world for more than 30 years. Due to their size, dimensions and the presence of rotors, they constitute a special case of large conductive objects in the air gap. The effect of the helicopter on the electrical characteristics of the gap may vary with the helicopter type and will be dependent on the size of the helicopter and possible suspended conductive loads (basket, platform, busbar, etc).

There are also other influences such as coning (mechanical flexing) of the blades, triboelectric effect (acquired charge due to rotation of the rotor blades), downwash effect, etc.

There is some published test data from laboratory tests on selected types of helicopters and work platforms; however the data are not sufficiently abundant to develop general characterization of various types of helicopters used for specific live work applications.

Other considerations should be made when suspending large conductive objects by crane. These situations require special analysis and are beyond the development of floating conductive object factor proposed by this annex.

Annex G (informative)

Live working near contaminated, damaged or moist insulation

G.1 Contaminated insulation

When contamination is present, the response of wet external insulation to power frequency voltage becomes important and may dictate external insulation design. Flashover of the insulation generally occurs when the surface is contaminated and becomes moist due to light rain, snow, dew or fog, unless significant washing occurs.

Live working may be carried out with wet contaminated insulators provided that:

- the actual creepage length of the insulators in the work location has been checked, taking into account design length, operating voltage, and possible reduction by damaged insulators;
- the level of contamination and humidity existing when live working is to be done has been checked and found to be within the conditions assumed for design purposes and allowed for the work method and procedures used. Contamination flashover is a gradual process, preceded by visible scintillation, audible discharges and eventual partial flashover, so there may be prior warning. If these phenomena occur, live work should not be carried out.

G.2 Damaged cap and pin insulators

A large amount of live working is devoted to the replacement of damaged cap and pin insulator units or strings. Thus, it is important to know the extent of insulation damage that allows work on or near the insulation system without risk of flashover. The residual electrical strength of a string of cap and pin insulators that includes damaged units can vary significantly depending upon the type of insulators, the number and location of the damaged units, and their degree of damage.

The general trend of these variables is as follows.

- The strength reduction is significantly larger with glass than with porcelain insulators. This is due to the fact that pre-stressed toughened glass insulators always shatter completely, leaving a bare hub, while porcelain insulators may be broken in different ways, so that the strength depends very much on the portion of porcelain skirts that remains.
- The worst position for damaged units is generally near the line end. The string strength is higher if the same number of damaged units is at the structure end, and still higher if they are in the middle of the string. The exact conditions for the maximum reduction in insulation strength remaining depends on the electric field distribution along the string, that is, the length of the string, the type fittings at the line end (e.g. grading rings) and the type of structure.

Obviously the larger the number of damaged units, the greater the reduction of strength. But even if all the insulators are damaged, a dry insulator string still maintains at least 20 % of its strength. The variation of the strength as a function of the type and number of damaged units can be assumed to be linear as a first approximation, and analysis of a large amount of test data leads to equation (G.1).

$$k_{is} = 1 - 0,8 k_d (A_d/A_0) \quad (G.1)$$

where

A_d is the number of damaged insulators in the string;

A_0 is the number of insulators in the string;

k_d is assumed 1,0 for glass and 0,75 for porcelain;

k_{is} is the damaged insulation string factor.

An example of the determination and use of k_{is} in calculating the allowable number of damaged units in the string follows.

Calculate D_{Lins} required for the number of damaged units in the string.

$$D_{Lins} = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (G.2)$$

Table G.1 shows D_{Lins} for a 220 kV system with a required withstand voltage for live working (U_{90}) of 565 kV peak using 14 insulator units. Assume $k_a = 0,931$, $k_g = 1,4$, $k_s = 0,936$, $k_f = 1,0$ and k_{is} calculated using (G.1). Values of the required minimum residual system insulation length D_{Lins} can then be calculated from equation (G.2) for glass and for porcelain insulators.

$$U_{90} = 565 \text{ kV}$$

$$K_t = k_s k_g k_a k_f k_{is} = 1,22 k_{is}$$

k_{is} as calculated by (G.1).

The length of a string of 14 insulators (146 mm each) is 2,04 m. A D_{Lins} of less than or equal to the string length establishes the maximum number of damaged insulators in the string that will provide the withstand required by U_{90} .

**Table G.1 – Example of maximum number of damaged insulators calculation
(gap factor 1,4)**

A_d	Glass				Porcelaine		
	A_d/A_0	k_{is}	K_t	D_{Lins}	k_{is}	K_t	D_{Lins}
1	0,071	0,943	1,15	1,24	0,957	1,19	1,2
2	0,143	0,886	1,081	1,35	0,914	1,12	1,3
3	0,214	0,829	1,01	1,47	0,872	1,06	1,38
4	0,286	0,771	0,94	1,61	0,828	1,01	1,47
5	0,357	0,714	0,871	1,79	0,786	0,96	1,58
6	0,429	0,657	0,801	<u>2,0</u>	0,743	0,906	1,7
7	0,5	0,6	0,732	2,26	0,7	0,854	1,83
8					0,66	0,805	<u>1,98</u>
9					0,614	0,749	2,19

Table G.1 indicates that the maximum number of damaged glass insulators is 6 while 8 can be damaged in the porcelain string and have a withstand of 565 kV.

Table G.2 calculates the same for a structure having a gap factor of 1,2.

**Table G.2 – Example of maximum number of damaged insulators calculation
(gap factor 1,2)**

	Glass				Porcelain		
A_d	A_d/A_o	k_{is}	K_t	D_{Lins}	k_{is}	K_t	D_{Lins}
1	0,071	0,943	0,984	1,52	0,957	1,00	1,49
2	0,143	0,886	0,927	1,64	0,914	0,956	1,6
3	0,214	0,829	0,867	1,8	0,872	0,912	1,68
4	0,286	0,771	0,806	<u>1,98</u>	0,828	0,866	1,8
5	0,357	0,714	0,747	2,2	0,786	0,822	<u>1,93</u>
6					0,743	0,777	2,08

In this case, 4 damaged glass insulators and 5 damaged porcelain insulators become the limit.

G.3 Damaged composite insulators

When live work is to be performed in presence of composite insulators, it is important to know the maximum extent of insulation damage that still allows operation in safety condition on or near the insulation, avoiding the risk of flashover. The residual electric strength of a composite insulator that includes damages can vary significantly depending upon the type of damage, the axial length and location of damages.

The general trend of these variables is as follows.

- The strength reduction is significantly larger with conductive or semiconductive defects. This is for example the case of tracking with carbonization of the housing of the insulator.
- The worst position for damages is generally near the line end. The insulator strength is higher if the extent of damages is at the structure end, and still higher if it is in the middle of the insulator. The exact conditions for the maximum reduction in insulation strength remaining depends on the electric field distribution along the insulator, that is, the length of the insulator, the type fittings at the line end (e.g. grading rings) and the type of structure.

Obviously the larger the extent of the damage, the greater is the reduction of the strength. When the worst damage is considered (conductive damage), and when it involves the whole insulation length, the strength of a composite insulator becomes null.

In Figure G.1 results of experimental activity on composite insulators affected by simulated conductive and semiconductive defects are shown. The strength of an insulator affected by a defect (U_d) is referred to the strength of the corresponding sound insulator (U_o), and the defect length in axial direction (l_d) is referred to the whole insulating length of the insulator (l_o). The analysis of the test data leads to assume, as conservative condition corresponding to conductive defects, a linear variation of the strength expressed by equation (G.3).

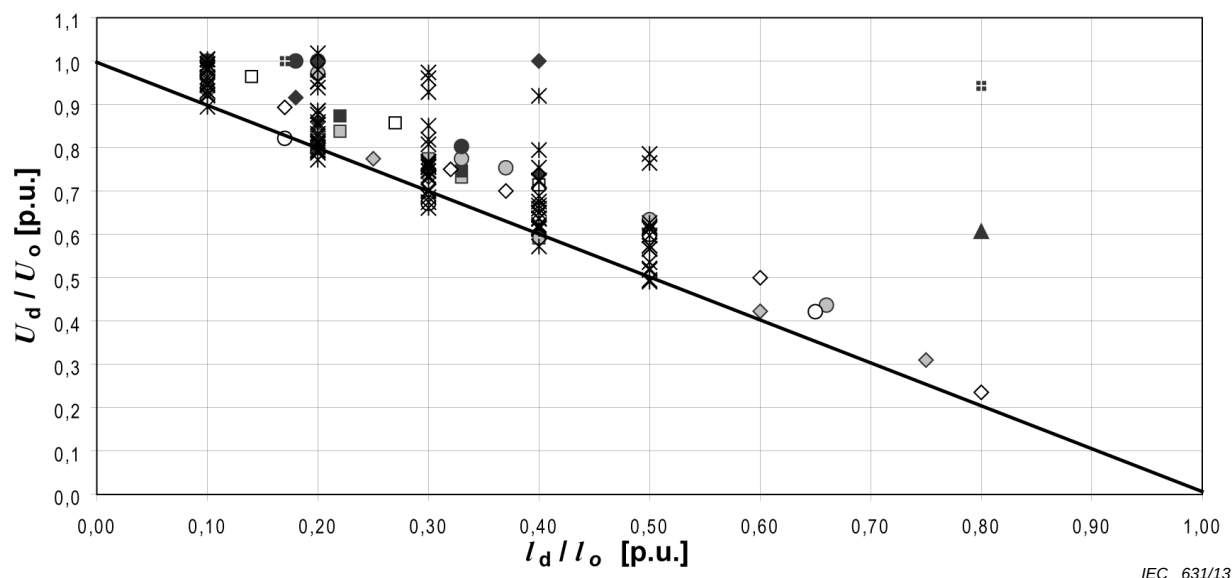
$$k_{ic} = 1 - (l_d/l_o) \quad (G.3)$$

where

l_d is the damage length in insulator axial direction;

l_o is the insulating length of the insulator;

k_{ic} is the damaged composite insulator factor.



Key

- | | |
|---------------------|------------------------------|
| ◇ conductive 150 kV | ◆ semiconductive 150 kV |
| ◻ conductive 150 kV | ■ semiconductive 150 kV |
| ● conductive 150 kV | ● semiconductive 150 kV |
| ◇ conductive 380 kV | ▲ semiconductive 380 kV |
| ◻ conductive 380 kV | ■ semiconductive 380 kV |
| ○ conductive 380 kV | * conductive 150 kV – 380 kV |

Figure G.1 – Strength of composite insulators affected by simulated conductive and semi-conductive defects

Below is an example of the determination of the maximum allowable value of k_{ic} obtained by calculating the allowable length of conductive damages on composite insulator.

Calculate the defect length that leads to a required D_{Lins} equal to the insulating length of the insulator ($D_{Lins} = l_o$).

$$l_{dmax} = l_o \left[1 - \frac{U_{90}}{[1.080 \ln(0.46(l_o - F) + 1)] k_s k_g k_a k_f} \right] \quad (G.4)$$

Live works are performed in safety condition in presence of defects of length lower than the calculated figure l_{dmax} .

In a 220 kV system with a required withstand voltage for live working (U_{90}) of 565 kV peak, a composite insulator which total length ($l = 2.04$ m) is the same of 14 cap and pin insulator units may be adopted. The insulating distance of the insulator (l_o) is equal to 1.86 m. Assume $k_a = 0.931$, $k_s = 0.936$ and $k_f = 1.0$. The values of the maximum defect length, that corresponds to the minimum required insulation length D_{Lins} equal to l_o , can be calculated from equation (G.4) assuming the actual gap factor of the tower configuration. Results of calculation with k_g typical of insulation configuration ($k_g = 1.4$ and $k_g = 1.2$) are reported in the following.

$$l_{dmax}(k_g=1.4) = 0.57 \text{ m}$$

$$l_{dmax}(k_g=1.2) = 0.357 \text{ m}$$

G.4 Insulating phase to earth transition for optical fibre cables

The assessment of a specific factor k_i for these insulating phase to earth transitions for optical fibre cables is under consideration.

For the types of transition made of rigid hollow core insulators, the formula (G.3) for composite insulators can be applied.

Bibliography

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org>)

IEC 60050-651, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 651: Live working* ¹

IEC 60060-1:2010, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60071-1:2006, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60071-2:1996, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

IEC 60743, *Live working – Terminology for tools, equipment and devices* ²

IEC 61477:2009, *Live working – Minimum requirements for the utilization of tools, devices and equipment*

CIGRÉ, Brochure No. 72:1992, *Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of the external insulation*

CIGRÉ, Brochure No. 151:2000, *Guidelines for insulation coordination in live working*

¹ Edition 2, to be published.

² Edition 3, to be published.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	48
1 Domaine d'application	50
2 Termes, définitions et symboles	50
2.1 Termes et définitions	50
2.2 Symboles utilisés dans la partie normative du document	52
3 Méthodologie	53
4 Facteurs intervenant dans les calculs	54
4.1 Surtension statistique	54
4.2 Tenue de l'intervalle	54
4.3 Calcul de la distance électrique D_U	55
4.3.1 Equation générale	55
4.3.2 Facteurs influençant la tenue de l'intervalle	55
5 Evaluation des risques	60
6 Calcul de la distance minimale d'approche D_A	61
Annexe A (informative) Distance ergonomique	63
Annexe B (informative) Surtensions	65
Annexe C (informative) Tenue diélectrique de l'air	69
Annexe D (informative) Facteur d'intervalle k_g	71
Annexe E (informative) Prise en compte des conditions atmosphériques	73
Annexe F (informative) Effet des objets conducteurs à potentiel flottant sur la tenue diélectrique	77
Annexe G (informative) Travaux sous tension près des isolations polluées, détériorées ou humides	85
Bibliographie	90
Figure 1 – Illustration de deux objets conducteurs à potentiel flottant de différentes dimensions et à des distances différentes de l'axe de l'intervalle	57
Figure 2 – Tâches types de travail sous tension	59
Figure B.1 – Plages de u_{e2} en bout de ligne ouverte due à la fermeture et au réenclenchement conformément au type de réseau (maillé ou antenne) avec et sans résistances de fermeture et inductances shunt	67
Figure F.1 – Influence de la longueur des objets conducteurs à potentiel flottant – configuration tige-tige entre phase et terre – impulsion de 250 μ s / 2 500 μ s	80
Figure F.2 – Influence de la longueur des objets conducteurs à potentiel flottant – configuration conducteur-conducteur entre phases – impulsion de 250 μ s / 2 500 μ s	81
Figure F.3 – Réduction de la tenue diélectrique en fonction de la longueur D pour une valeur constante de β – Configuration tige-tige entre phase et terre	82
Figure F.4 – Réduction de la tenue diélectrique en fonction de la longueur P pour une valeur constante de β – Configuration conducteur-conducteur entre phases	82
Figure G.1 – Tenue des isolateurs composites affectés par des défauts conducteurs et semi-conducteurs simulés	88
Tableau 1 – Valeurs moyennes de k_a	56
Tableau 2 – Facteur d'objet conducteur à potentiel flottant k_f	58
Tableau B.1 – Classification des surtensions conformément à la CEI 60071-1	65

Tableau D.1 – Facteurs d'intervalle pour des configurations entre phase et terre réelles.....	72
Tableau E.1 – Facteur atmosphérique k_a pour différentes altitudes de référence et valeurs de U_{g0}	75
Tableau G.1 – Exemple de calcul du nombre maximal d'isolateurs détériorés (facteur d'intervalle 1,4).....	86
Tableau G.2 – Exemple de calcul du nombre maximal d'isolateurs détériorés (facteur d'intervalle 1,2).....	87

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRAVAUX SOUS TENSION – DISTANCES MINIMALES D'APPROCHE POUR DES RÉSEAUX À COURANT ALTERNATIF DE TENSION COMPRISE ENTRE 72,5 kV ET 800 kV – UNE MÉTHODE DE CALCUL

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 brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61472 a été établie par le comité d'études 78 de la CEI: Travaux sous tension.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition de la CEI 61472, publiée en 2004. Elle constitue une révision technique.

Ce document a été rédigé en conformité avec les exigences de la CEI 61477: *Travaux sous tension – Exigences minimales pour l'utilisation des outils, dispositifs et équipements*, lorsque cela s'applique.

Les modifications techniques majeures par rapport à la deuxième édition sont les suivantes:

- la clarification du domaine d'application;

- la revue des définitions;
- la clarification de la méthodologie pour déterminer si le travail sous tension est acceptable et pour calculer les distances minimales d'approche;
- la modification de l'équation de base pour calculer la distance minimale d'approche;
- l'introduction du Tableau 1 pour une simplification du facteur de correction en fonction de l'altitude k_a ;
- l'introduction de critères dans les cas de présence d'isolateur composite et la clarification de l'usage du facteur d'isolateur k_i ;
- la revue de l'Annexe informative F sur l'influence des objets conducteurs à potentiel flottant sur la tenue diélectrique;
- la revue de l'Annexe informative G sur le travail sous tension près d'une isolation polluée, détériorée ou humide.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
78/1004/FDIS	78/1010/RVD

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

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

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

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

TRAVAUX SOUS TENSION – DISTANCES MINIMALES D'APPROCHE POUR DES RÉSEAUX À COURANT ALTERNATIF DE TENSION COMPRISE ENTRE 72,5 kV ET 800 kV – UNE MÉTHODE DE CALCUL

1 Domaine d'application

La présente Norme Internationale décrit une méthode de calcul des distances minimales d'approche pour des travaux sous tension réalisés à des tensions maximales comprises entre 72,5 kV et 800 kV. La présente norme traite des surtensions de réseau et des distances de travail dans l'air ou de l'isolation des outils entre des pièces et/ou des travailleurs à des potentiels électriques différents.

La tension de tenue requise et les distances minimales d'approche calculées suivant la méthode décrite dans la présente norme sont évaluées en prenant en compte ce qui suit:

- les travailleurs sont formés et qualifiés pour travailler dans la zone de travail sous tension;
- les surtensions attendues ne dépassent pas la valeur choisie pour la détermination de la distance minimale d'approche requise;
- les surtensions transitoires sont les surtensions déterminantes;
- l'isolation des outils ne présente pas sur la surface un film continu d'humidité ou un niveau de pollution mesurable;
- aucun éclair n'est vu ni entendu à moins de 10 km du lieu de travail;
- l'influence des parties conductrices des outils est prise en compte;
- l'effet de l'altitude, de la présence d'isolateurs dans l'intervalle, etc. sur la tenue électrique est pris en compte.

Pour des conditions autres que celles ci-dessus, l'évaluation des distances minimales d'approche peut exiger des données spécifiques, provenant d'autres calculs ou obtenues à partir d'études additionnelles en laboratoire sur la situation concrète.

2 Termes, définitions et symboles

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

2.1 Termes et définitions

2.1.1

isolateur détérioré

isolateur avec tout type de défaut de fabrication ou de détérioration en service qui affecte ses caractéristiques isolantes

2.1.2

distance électrique

D_u

distance dans l'air requise pour empêcher une décharge disruptive entre les parties sous tension ou entre les parties sous tension et les parties à la terre pendant le travail sous tension

[SOURCE: CEI 60050-651:–, 651-21-12]

2.1.3**distance ergonomique** **D_E**

distance dans l'air, ajoutée à la distance électrique, tenant compte des mouvements involontaires et des erreurs de jugement des distances pendant l'exécution du travail

[SOURCE: CEI 60050-651:–, 651-21-13]

2.1.4**tension de cinquante pour cent de décharge disruptive** **U_{50}**

valeur de crête d'une tension de choc qui a une probabilité de cinquante pour cent de provoquer une décharge disruptive chaque fois qu'elle est appliquée lors d'essais diélectriques

[SOURCE: CEI 60050-604:1987, 604-03-43]

2.1.5**tension la plus élevée d'un réseau** **U_s**

valeur la plus élevée de la tension de service qui se présente à un instant et en un point quelconque du réseau dans des conditions d'exploitation normales (tension entre phases)

Note 1 à l'article: Ces valeurs ne tiennent pas compte des variations transitoires, par exemple dues aux manoeuvres dans le réseau, ni des variations temporaires accidentelles de la tension.

[SOURCE: CEI 60050-601:1985, 601-01-23, modifiée – Une référence à la tension entre phases a été ajoutée.]

2.1.6**distance minimale d'approche
distance minimale de travail** **D_A**

distance minimale dans l'air à maintenir entre le corps du travailleur, y compris tout objet (à l'exception des outils appropriés aux travaux sous tension) qu'il manipule, et toute partie portée à des potentiels électriques différents

Note 1 à l'article: La distance minimale d'approche est la somme de la distance électrique appropriée à la tension nominale maximale et de la distance ergonomique sélectionnée.

[SOURCE: CEI 60050-651:–, 651-21-11]

2.1.7**longueur résiduelle minimale d'isolation** **D_{Lins}**

longueur d'isolation requise pour empêcher une décharge disruptive entre des pièces sous tension et des pièces à la terre, mesurée le long de l'isolateur, en prenant en compte la présence d'objets conducteurs à potentiel flottant et de segments d'isolateur détérioré

2.1.8**tension à quatre vingt dix pour cent de tenue statistique aux chocs** **U_{90}**

valeur de crête d'une tension de choc appliquée au cours d'essais diélectriques pour laquelle l'isolation présente, dans certaines conditions, une probabilité de tenue de quatre vingt dix pour cent

Note 1 à l'article: Ce concept s'applique aux isolations autorégénératrices.

[SOURCE: CEI 60050-604:1987, 604-03-42, modifiée – La définition a été modifiée pour se référer spécifiquement à une probabilité de tenue de quatre vingt dix pour cent.]

2.1.9

partie

tout élément présent dans la zone de travail, autre que les travailleurs, les outils pour travaux sous tension et l'isolation du réseau

2.1.10

valeur par unité

u

expression de la valeur par unité de l'amplitude d'une surtension (ou d'une tension) rapportée à $U_S \sqrt{2} / \sqrt{3}$

Note 1 à l'article: Cela s'applique à u_{e2} et u_{p2} définies à l'Article 4.

2.1.11

surtension transitoire

surtension de courte durée, ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie

[SOURCE: CEI 60050-604:1987, 604-03-13, modifiée – Les deux notes de la définition originale ont été supprimées.]

2.1.12

surtension statistique à deux pour cent

U_2

valeur de crête d'une surtension transitoire ayant une probabilité de deux pour cent d'être dépassée

2.1.13

zone de travail

tout local, emplacement ou zone où des travaux vont être, sont, ou ont été réalisés

[SOURCE: CEI 60050-651:–, 651-26-03]

2.2 Symboles utilisés dans la partie normative du document

A_d	longueur d'isolateur détérioré ou le nombre d'éléments d'isolateurs détériorés dans une chaîne de A_0 éléments ou une longueur d'isolateur A_0 qui ne sont pas shuntés par des cornes d'amorçage longues ou des anneaux de répartition
A_0	longueur d'isolateur en bon état ou le nombre d'éléments d'isolateurs en bon état qui ne sont pas shuntés par des cornes d'amorçage longues ou des anneaux de répartition
β	rapport de la longueur totale de l'objet ou des objets conducteur(s) à potentiel flottant dans la direction de l'axe de l'intervalle par rapport à la longueur de l'intervalle d'air d'origine
D	longueur de l'intervalle d'air restant entre phase et terre
D_A	distance minimale d'approche
D_E	distance ergonomique
D_U	distance électrique nécessaire pour obtenir U_{90}
D_{Lins}	longueur résiduelle minimale d'isolation
d_1, d_2	distances entre le ou les travailleurs et des parties de l'installation à des potentiels

d_3, d_4	électriques différents (voir Figure 2)
F	somme de toutes les longueurs, dans la direction de l'axe de l'intervalle, de tous les objets conducteurs à potentiel flottant dans cet intervalle d'air (en mètres)
K_s	facteur de sécurité statistique
K_t	facteur combinant des considérations différentes influençant la tenue de l'intervalle
k_a	facteur atmosphérique
k_d	coefficient caractérisant l'état moyen des isolateurs détériorés
k_f	facteur d'objet conducteur à potentiel flottant
k_g	facteur d'intervalle
k_i	facteur d'isolateur détérioré
k_{ic}	facteur d'isolateur composite détérioré
k_{is}	facteur de chaîne d'isolateur détérioré
k_s	facteur de l'écart-type statistique normalisé
L_f	longueur de l'intervalle d'air d'origine
P	longueur de l'intervalle d'air restant entre deux phases
r	distance d'un objet conducteur par rapport à l'axe de l'intervalle
s_e	valeur normalisée de l'écart type de U_{50} exprimée en pour cent
U_2	surtension statistique à deux pour cent
U_{50}	tension de cinquante pour cent de décharge disruptive
U_{90}	tension à quatre vingt dix pour cent de tenue statistique aux chocs
U_{e2}	surtension statistique à deux pour cent entre phase et terre
U_{e90}	tension à quatre vingt dix pour cent de tenue statistique aux chocs entre phase et terre
U_{p2}	surtension statistique à deux pour cent entre deux phases
U_{p90}	tension à quatre vingt dix pour cent de tenue statistique aux chocs entre deux phases
u_{e2}	valeur par unité de la surtension statistique à deux pour cent entre phase et terre
u_{p2}	valeur par unité de la surtension statistique à deux pour cent entre deux phases
U_s	tension la plus élevée d'un réseau entre deux phases

3 Méthodologie

La méthodologie pour déterminer si le travail sous tension est acceptable et pour le calcul des distances minimales d'approche repose sur les considérations suivantes:

- déterminer la surtension statistique attendue dans la zone de travail (U_2) et, à partir de celle-ci, déterminer la tension de tenue statistique aux chocs de l'isolation requise dans la zone de travail (U_{90});

- b) si le travail se réalise à proximité d'isolateurs, calculer la longueur résiduelle minimale d'isolation D_{Lins} ;
- c) calculer la distance électrique D_U requise pour la tension de tenue aux chocs U_{90} ;
- d) ajouter une distance additionnelle pour prendre en compte les facteurs ergonomiques associés au travail sous tension tels que les mouvements involontaires.

La distance minimale d'approche D_A est ainsi déterminée par:

$$D_A = D_U (K_s = 10) + D_E \quad (1)$$

où

D_U est la distance électrique nécessaire pour obtenir U_{90} ;

D_E est la distance ergonomique requise et est dépendante des procédures de travail, du niveau de formation, de la qualification des travailleurs, du type de construction, et des éléments fortuits tels que des gestes involontaires et des erreurs d'appréciation des distances (voir l'Annexe A pour plus de détails).

Se référer à l'Article 5 pour l'application de la distance ergonomique.

4 Facteurs intervenant dans les calculs

4.1 Surtension statistique

La contrainte électrique dans la zone de travail doit être connue. La contrainte électrique est caractérisée par la surtension statistique qui peut exister dans la zone de travail. Dans un réseau alternatif triphasé, la surtension statistique U_{e2} entre phase et terre est:

$$U_{e2} = (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{e2} \quad (2)$$

où

$U_s (\sqrt{2}/\sqrt{3})$ est la tension crête la plus élevée entre phase et terre du réseau exprimée en kV, et u_{e2} est la surtension statistique entre phase et terre exprimée par unité.

La surtension statistique U_{p2} entre deux phases est:

$$U_{p2} = (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_s u_{p2} \quad (3)$$

où u_{p2} est la surtension statistique entre phases exprimée par unité.

Si la valeur par unité de la surtension entre phases n'est pas disponible, une valeur approchée peut être trouvée à partir de u_{e2} par la formule suivante:

$$u_{p2} = 1,35 u_{e2} + 0,45 \quad (4)$$

Les surtensions transitoires à prendre en compte sont les surtensions maximales causées par des défauts dans le réseau ou par des manœuvres, qu'elles se produisent sur le lieu de travail ou sur l'installation sur laquelle on travaille (voir l'Annexe B).

4.2 Tenue de l'intervalle

Pour la détermination de la distance électrique, la tension de tenue requise pour le travail sous tension est prise égale à la tension U_{90} , déterminée à partir de l'expression générale

$$U_{90} = K_S U_2 \quad (5)$$

En considérant séparément les tensions entre phase et terre et entre phases et en combinant l'équation (5) avec les équations (2) et (3), on obtient:

$$U_{e90} = K_S (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_S u_{e2} \quad (6)$$

$$U_{p90} = K_S (\sqrt{2}/\sqrt{3}) U_S u_{p2} \quad (7)$$

où

K_S est le facteur de sécurité statistique (1,0 ou 1,1 pour les formules (5), (6) et (7)) (voir l'Article 5);

U_{e90} et U_{p90} sont respectivement les tensions de tenue statistique aux chocs entre phase et terre et entre phases, exprimées en kV.

4.3 Calcul de la distance électrique D_U

4.3.1 Equation générale

La tenue de l'intervalle est influencée par une série de facteurs qui peuvent être exprimés par un facteur K_t utilisé dans la formule suivante pour calculer D_U (en mètres):

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

où

F est la somme de toutes les longueurs, dans la direction de l'axe de l'intervalle, pour tous les objets conducteurs à potentiel flottant dans l'intervalle d'air (en mètres) (voir 4.3.2.4);

U_{90} est la tension de tenue statistique aux chocs entre phase et terre (U_{e90}) ou entre phases (U_{p90}) en kV;

K_t est donné par:

$$K_t = k_S k_g k_a k_f k_i \quad (9)$$

4.3.2 Facteurs influençant la tenue de l'intervalle

4.3.2.1 Facteur de l'écart-type statistique normalisé k_S

Le facteur k_S prend en compte la nature statistique de la tension de claquage. À moins que la valeur de l'écart-type, s_e , ne soit connue à partir d'essais représentant la configuration de l'intervalle, une valeur de 0,936, basée sur un écart-type de 5 % pour des tensions de choc positives, peut être utilisée (voir l'Annexe C).

4.3.2.2 Facteur d'intervalle k_g

Le facteur d'intervalle k_g tient compte de l'effet de la configuration de l'intervalle sur la tenue diélectrique de l'air (voir l'Annexe D).

NOTE 1 A moins qu'un facteur d'intervalle ne puisse être obtenu pour les configurations de structures existantes au niveau de tension de réseau donné, une valeur généralement conservatrice permettant de tenir compte des diverses configurations est $k_g = 1,2$ entre phase et terre et $k_g = 1,45$ entre phases.

NOTE 2 La brochure 72 de la CIGRÉ et la CEI 60071-2 fournissent plus d'informations concernant la détermination de k_g pour différentes configurations d'intervalle.

4.3.2.3 Facteur atmosphérique k_a

Le facteur atmosphérique prend en compte l'effet de la densité de l'air. La densité de l'air est influencée par la température, l'humidité et l'altitude. L'effet de la température et de l'humidité est négligeable en comparaison avec l'effet d'altitude.

La tenue électrique de l'air dans la zone de travail est principalement affectée par l'altitude au-dessus du niveau de la mer. Cet effet, qui varie dans une certaine mesure avec la longueur de l'intervalle et réciproquement avec la tension de tenue, est traduit par le facteur atmosphérique k_a . La valeur appropriée de k_a peut être tirée du Tableau 1 de valeurs moyennes ou du Tableau E.1 ou calculée avec la méthode donnée à l'Annexe E pour une altitude spécifique et un U_{90} donné, pour une altitude de référence en dessous de laquelle la plupart des travaux sous tension sont exécutés.

Tableau 1 – Valeurs moyennes de k_a

Altitude m	k_a moyen
0	1,000
100	0,995
300	0,983
500	0,972
1 000	0,941
1 500	0,909
2 000	0,875
2 500	0,841
3 000	0,805

Il convient que la distance électrique D_U soit augmentée quand le travail sous tension est réalisé dans des endroits plus élevés que l'altitude de référence, pour tenir compte de la pression atmosphérique moyenne plus basse. Cela peut être réalisé en multipliant D_U par un facteur de correction d'altitude qui peut être calculé en utilisant les équations données à l'Annexe E.

4.3.2.4 Facteur d'objet conducteur à potentiel flottant k_f

Les objets conducteurs à potentiel flottant peuvent décroître ou accroître la tenue électrique d'un intervalle par la déformation du champ.

Un objet conducteur placé entre deux électrodes à des potentiels électriques différents, et connecté à aucune d'entre elles, est électriquement flottant et prend un potentiel intermédiaire. L'importance de l'influence de ces objets conducteurs à potentiel flottant sur la tenue électrique de l'intervalle varie en fonction du nombre d'objets conducteurs à potentiel flottant, de leurs dimensions, de leurs formes et de leurs positions géométriques dans l'intervalle. Toutefois, la présence d'un ou de plusieurs objets conducteurs à potentiel flottant réduit la longueur électrique nette de l'intervalle d'air.

Pour calculer les effets des objets conducteurs à potentiel flottant, il convient que tous les chemins possibles d'une décharge disruptive soient pris en compte pour déterminer un facteur d'objet conducteur à potentiel flottant k_f . La somme de tous les objets conducteurs à potentiel flottant dans la direction de l'axe de l'intervalle représente la distance d'objet conducteur à potentiel flottant F .

Dans les situations les plus courantes de travaux sous tension sur des lignes haute tension, le facteur k_f dépend de la longueur de l'intervalle restant et de la distance latérale r de l'objet conducteur par rapport à l'axe de l'intervalle (voir la Figure 1). Il est à noter que D est obtenu

en soustrayant la longueur F de l'intervalle d'air d'origine L_f , c'est-à-dire $D = L_f - F$. L'Annexe F donne les critères d'évaluation du facteur k_f en fonction de F et D (P lorsque la distance entre phases est prise en compte), en introduisant le paramètre

$$\beta = F/(D + F)$$

(ou $\beta = F/(P + F)$ lorsque les distances entre phases sont prises en compte).

Des études expérimentales (voir l'Annexe F) ont montré que, dans les cas les plus défavorables représentatifs des configurations de travaux sous tension sur ligne, le coefficient k_f peut être aussi bas que 0,75 pour des intervalles entre phase et terre au-delà de 1,2 m.

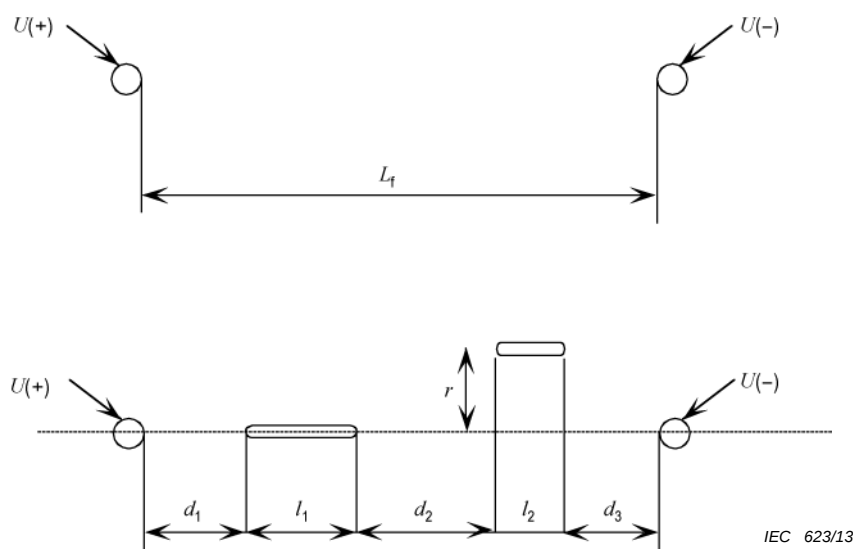


Figure 1 – Illustration de deux objets conducteurs à potentiel flottant de différentes dimensions et à des distances différentes de l'axe de l'intervalle

Le Tableau 2 rapporte un critère simplifié pour la détermination de k_f en fonction de β et L_f . Les valeurs de k_f sont dérivées de l'interpolation des données montrées à l'Annexe F. Le Tableau 2 présente des valeurs de β en fonction de l'intervalle d'air d'origine L_f et non en fonction de la longueur D de l'intervalle restant parce que l'intervalle d'air d'origine L_f est une des quantités importantes qui caractérisent la construction d'un réseau à courant alternatif.

Dans le cas d'objets conducteurs de forme plate ou allongée orientés perpendiculaire à l'intervalle d'air et pour lesquels aucun résultat expérimental pertinent n'est disponible, il est possible de supposer une valeur conservatrice de $k_f = 0,75$.

Tableau 2 – Facteur d'objet conducteur à potentiel flottant k_f

Intervalles entre phase et terre						Intervalles entre phases					
β^b	L_f^a m				k_f	β^b	L_f^a m				k_f
	Au-delà	Jusqu'à	Au-delà	Jusqu'à			Au-delà	Jusqu'à	Au-delà	Jusqu'à	
0,1	---	0,9	3,9	---	1	0,05	---	0,9	5,7	---	1
	0,9	3,9	---		0,95		0,9	2,1	3,8	5,7	0,95
0,15	---	0,5	4,7	---	1		0,1	2,1	3,8	---	
	0,5	1	3,3	4,7	0,95	---		0,6	6	---	1
	1	1,2	2,7	3,3	0,9	0,6		1,6	4,6	6	0,95
	1,2	2,7	---		0,85	1,6		2,2	3,6	4,6	0,9
0,2	---	0,4	4,9	---	1	2,2		3,6	---		0,85
	0,4	0,9	3,7	4,9	0,95	0,2	---	0,4	6,3	---	1
	0,9	1	3,1	3,7	0,9		0,4	1,4	5,1	6,3	0,95
	1	1,2	2,6	3,1	0,85		1,4	1,8	4,4	5,1	0,9
	1,2	2,6	---		0,8		1,8	2,3	3,5	4,4	0,85
0,25	---	0,3	5,1	---	1		2,3	3,5	---		0,8
	0,3	0,8	3,8	5,1	0,95						
	0,8	0,9	3,2	3,8	0,9						
	0,9	1,1	2,8	3,2	0,85						
	1,1	1,3	2,4	2,8	0,8						
	1,3	2,4	---		0,75						

NOTE Pour des valeurs de β excédant les valeurs du tableau, des essais ou des études sont nécessaires afin de prendre en compte les dimensions et la forme réelle de l'objet conducteur à potentiel flottant.

^a L_f = Longueur initiale de l'intervalle d'air.

^b β = Rapport de la longueur totale de l'objet ou des objets conducteur(s) à potentiel flottant dans la direction de l'axe de l'intervalle par rapport à la longueur initiale de l'intervalle d'air.

Dans la mesure où l'influence de la distance des objets conducteurs à potentiel flottant par rapport à l'axe de l'intervalle est considérée, il peut être présumé que la réduction de la tenue électrique devient négligeable lorsque

$$r > 2,5 F$$

L'influence des capots et des tiges métalliques des isolateurs de suspension et des objets conducteurs de taille semblable, à proximité des isolateurs, est négligeable et doit être ignorée.

L'approche de l'Annexe F donne des critères généraux pour la détermination de k_f . L'influence réelle des objets conducteurs à potentiel flottant requiert une analyse détaillée (voir l'Annexe F).

La Figure 2 illustre différents travaux sous tension et les configurations dans lesquelles ils peuvent avoir lieu. Conformément à la configuration considérée, il convient de déterminer une valeur correcte de k_g et de k_f .

Voir l'Annexe F pour plus de détails.

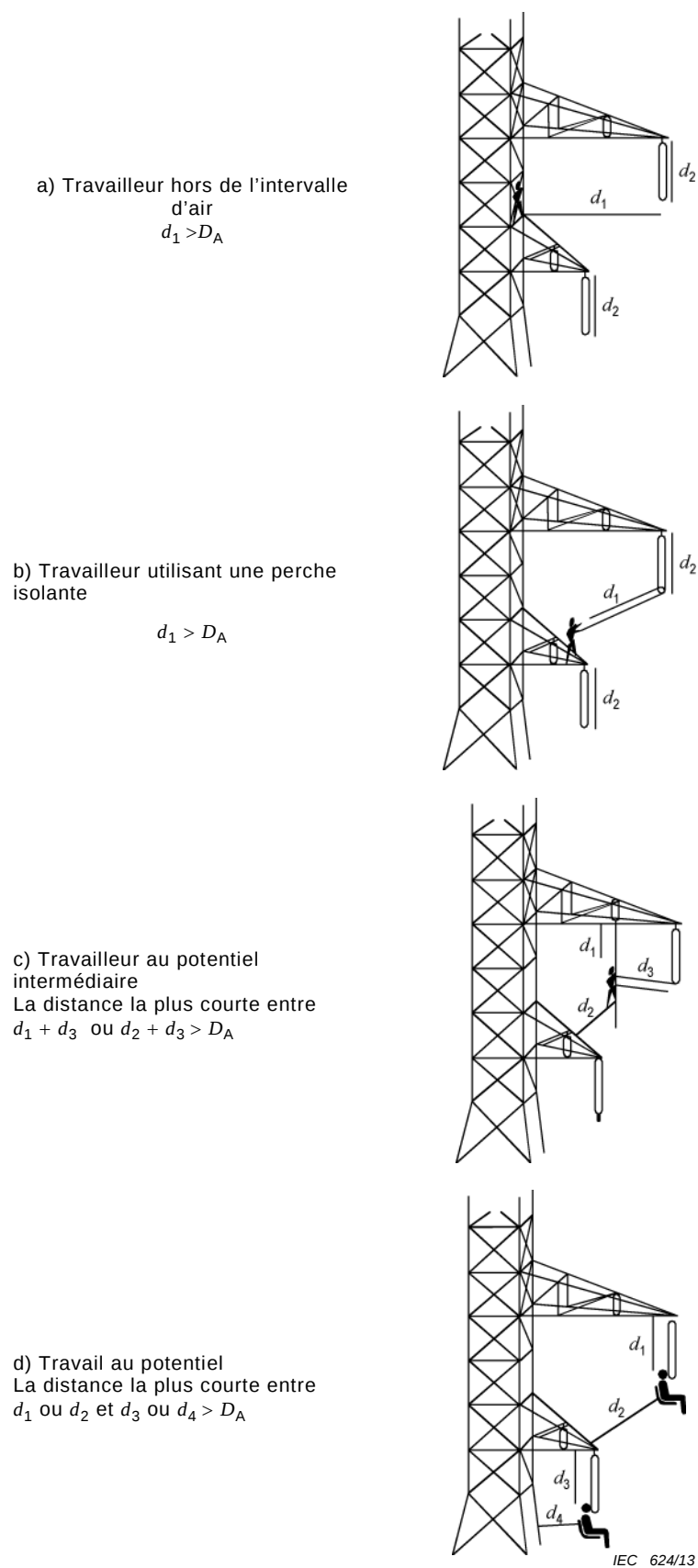


Figure 2 – Tâches types de travail sous tension

4.3.2.5 Facteur d'isolateur détérioré k_i

Lorsque le travail est réalisé à proximité d'isolateurs, il est nécessaire de calculer la longueur résiduelle minimale d'isolation D_{Lins} . Ceci s'effectue en prenant en compte les effets des isolateurs détériorés ou de la portion détériorée d'un isolateur sur la distance minimale d'approche (se référer à l'Article 3 pour la méthodologie).

Des précautions doivent être prises pour que la tenue électrique de l'ensemble d'isolateurs ne soit pas diminuée par la présence d'outils en parallèle, d'humidité ou de pollution à la surface et d'isolateurs détériorés (voir l'Annexe G).

L'effet sur la tension de tenue dans la zone de travail d'une isolation détériorée doit être pris en compte en s'assurant de la présence d'un nombre minimal d'éléments d'isolateur en bon état ou d'une longueur minimale d'isolation saine avant de commencer le travail. La longueur résiduelle minimale d'isolation D_{Lins} doit être déterminée de l'équation (10) en utilisant une valeur de K_t telle qu'obtenue de l'équation (11) et une valeur de k_i obtenue de la formule (12) déduite de façon empirique. La longueur résiduelle minimale d'isolation peut être autrement déterminée à partir de résultats d'essai ou par d'autres moyens.

$$D_{Lins} = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (10)$$

où

$$K_t = k_s k_g k_a k_f k_i \quad (11)$$

$$k_i = 1 - 0,8 k_d (A_d/A_0) \quad (12)$$

où

A_0 est la longueur d'isolateur en bon état ou le nombre d'éléments d'isolateurs en bon état qui ne sont pas shuntés par des cornes d'amorçage longues ou des anneaux de répartition;

A_d est la longueur d'isolateur détérioré ou le nombre d'éléments d'isolateurs détériorés dans une chaîne de A_0 éléments ou une longueur d'isolateur A_0 qui ne sont pas shuntés par des cornes d'amorçage longues ou des anneaux de répartition;

k_d est un coefficient caractérisant l'état moyen des éléments détériorés;

$k_d = 1$ pour des isolateurs en verre trempé;

$k_d = 0$ à 1 pour des isolateurs en porcelaine, avec $k_d = 0,75$ comme valeur moyenne;

$k_d = 1,25$ pour des isolateurs composites affectés par des dommages de nature conductrice ou semi-conductrice (voir l'Annexe G).

Se référer à l'Annexe G pour tenir compte de l'espacement des cornes d'amorçage ou des anneaux de répartition.

NOTE Les sections d'isolateurs shuntées par les cornes ou les anneaux ne contribuent pas significativement à la tenue diélectrique de la chaîne; en conséquence, les détériorations dans cette zone sont moins importantes et ces éléments peuvent être court-circuités pendant le travail.

5 Evaluation des risques

Le risque global de claquage de l'isolation dans la zone de travail est en relation avec un certain nombre de situations décrites ci-après. Quand elles sont associées, ces situations réduisent le risque global de claquage. Ce sont les suivantes:

- la tension réelle du réseau n'est pas toujours à la valeur maximale;

- il est peu probable que l'emplacement du travail corresponde à l'endroit où la surtension transitoire a la valeur maximale;
- le front réel de l'onde de surtension transitoire est moins contraignant que le front critique;
- environ la moitié des surtensions transitoires seront de polarité négative et sont moins sévères;
- la fréquence et l'amplitude des surtensions transitoires sont réduites en neutralisant la refermeture des disjoncteurs.

Aussi, lorsqu'aucune distance ergonomique n'est utilisée, la valeur de 1,1 pour K_S est recommandée pour ramener le risque global de claquage de l'isolation à un niveau cohérent avec les autres travaux électriques.

Le risque global qu'un claquage survienne durant le travail sous tension, lorsqu'une distance ergonomique D_E est incorporée, sera plus bas, puisqu'il est improbable qu'une surtension survienne dans la zone de travail au moment où la distance ergonomique est complètement engagée par un geste involontaire du travailleur ou par un objet. C'est pourquoi une valeur de $K_S = 1,0$ peut être utilisée quand une distance ergonomique définie D_E est incluse et est assez grande pour que la valeur de D_A soit toujours plus grande que la valeur de D_A (lorsque D_E est zéro) avec D_U calculée en prenant $K_S = 1,1$, c'est-à-dire:

$$D_A = D_{U(K_S = 1,0)} + D_E > D_{U(K_S = 1,1)}$$

où $D_{U(K_S = 1,0)}$ et $D_{U(K_S = 1,1)}$ sont D_U calculées en prenant respectivement $K_S = 1,0$ et $K_S = 1,1$.

6 Calcul de la distance minimale d'approche D_A

L'exemple qui suit est uniquement présenté afin de démontrer l'utilisation de l'équation (8) et ne suggère en rien des choix typiques ou appropriés des valeurs de k , u_{e2} , ou d'autres facteurs.

La distance électrique D_U est calculée (en mètres) à partir de:

$$D_U = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080\,K_t)} - 1) + F \quad (8)$$

où

F est la longueur de l'objet conducteur à potentiel flottant (voir 4.3.2.4);

$U_{90} = K_S U_2$ (provenant de l'équation (5));

K_t est obtenue à partir de l'équation (9) $K_t = k_S k_G k_A k_f k_i$.

Après avoir choisi une valeur appropriée pour la distance ergonomique, D_E , (voir l'Article 5 et l'Annexe A), la distance minimale d'approche D_A peut alors être déterminée par l'équation (1):

$$D_A = D_{U(K_S=1,0)} + D_E$$

NOTE La valeur de distance ergonomique choisie diffère suivant les utilisateurs. Elle est généralement comprise entre 0,2 m et 1 m (voir l'Article 5 et l'Annexe A).

Dans le présent exemple, la distance électrique D_U est calculée pour $K_S = 1,0$; $k_s = 0,936$; $k_g = 1,2$; $k_a = 0,941$ (tiré du Tableau 1 pour 1 000 m); k_f et $k_i = 1,0$, $U_S = 525$ kV, $u_{e2} = 2,2$, $F = 0$ et $D_E = 0,3$ m.

$$D_U = 2,787 \text{ m (2,8 m)}$$

$$D_A = 2,8 \text{ m} + 0,3 \text{ m} = 3,1 \text{ m}$$

Annexe A **(informative)**

Distance ergonomique

A.1 Vue d'ensemble

Deux approches, ou un mélange des deux, peuvent être employées pour établir une distance ergonomique:

- spécifier seulement une distance minimale d'approche absolue, et laisser le travailleur qualifié décider de la distance supplémentaire requise pour le travail particulier à faire;
- spécifier une distance minimale d'approche complète assurant une marge de sécurité suffisante pour prendre en compte toutes les éventualités possibles.

Un certain nombre de facteurs sont à examiner avant de spécifier la distance minimale d'approche, ou de commencer le travail près d'un conducteur sous tension. Comme il est irréaliste et inopportun de recommander ici une distance ergonomique, les points suivants sont présentés pour servir de guide aux organisations particulières.

A.2 Formation, connaissance et qualification

La base du travail sous tension est la connaissance des phénomènes dangereux et les moyens de protection personnelle, par des distances minimales d'approche ou d'autres méthodes. Il est nécessaire que les travailleurs soient formés de façon complète au travail sous tension et au travail en question. Pendant le travail il est nécessaire de partager l'attention entre le travail proprement dit et le respect de la distance minimale d'approche. Une formation adaptée et un entraînement aux procédures de travail réduiront la possibilité que l'attention soit détournée de l'observation du respect de la distance minimale d'approche par des événements inattendus.

A.3 Barrières de protection

Une barrière est un obstacle mis en place afin de réduire ou d'éliminer l'exigence d'une distance ergonomique. La barrière limite la distance entre les travailleurs et tout objet à un potentiel électrique différent qu'ils peuvent atteindre ou duquel ils peuvent s'approcher. Une barrière peut être en matériau métallique ou non métallique.

A.4 Possibilité d'erreur

La possibilité que des erreurs soient commises durant le travail dépend de la procédure de travail utilisée, de facteurs personnels, des effets de l'environnement et de la façon par laquelle les actions des travailleurs sont surveillées par d'autres.

A.5 Procédure de travail

Différentes positions et méthodes de travail exigeront des précautions différentes quant aux gestes involontaires. La stabilité de la position du travailleur peut aussi varier d'un travail à un autre, par exemple, un travail en élévation par rapport à un travail au sol. Une tâche complexe ou fatigante accroît aussi le risque que l'attention du travailleur soit détournée de l'observation du respect de la distance minimale d'approche.

A cause de ces facteurs, on pourrait considérer la possibilité d'employer une distance ergonomique différente pour des situations de travail ou des procédures différentes.

A.6 Facteurs personnels

Les états physique, mental et émotionnel d'un travailleur sont aussi des causes possibles de gestes involontaires. Ces facteurs sont à leur tour influencés par la durée et la vigueur du travail, par exemple. Le travail sous tension demande une attention constante, à la fois aux procédures et à la distance minimale d'approche, attention qui peut être facilement distraite par des facteurs personnels. Pour cette raison, un bon contrôle de soi et une conscience de la sécurité sont des aptitudes essentielles pour travailler à la distance minimale d'approche.

L'aptitude d'un travailleur à estimer la distance minimale d'approche correctement est aussi importante. Pour cette raison, il peut être bénéfique d'accroître la distance ergonomique avec la tension. Cependant, aux hautes tensions, une distance trop grande rendra les petites pièces sur les conducteurs sous tension difficiles à voir et les outils plus lourds à manipuler.

Il convient que les travailleurs ne portent pas des vêtements avec des parties ballantes qui pourraient tomber, voler ou se balancer près des conducteurs sous tension. Ceci inclut les liaisons de mise au potentiel des habits conducteurs.

A.7 Facteurs d'environnement

Certaines conditions environnementales sont généralement prises en compte en interdisant le travail à la distance minimale d'approche quand elles sont présentes. Par exemple, le travail n'est normalement pas autorisé pendant des orages proches, ou quand il y a un film continu d'eau à la surface des outils isolants.

Des conditions défavorables peuvent aussi être créées par d'autres conditions environnementales, soit directement, soit en détournant l'attention des procédures de travail autorisées. Des vents violents déplacent dangereusement les conducteurs, les supports ou les équipements (par exemple les dispositifs élévateurs). Les tempêtes de poussière constituent un risque pour les yeux. La glace sur les supports rend les prises pour les pieds peu sûres. Les trous de pivoir présentent un risque à l'escalade. La brume ou les embruns marins peuvent entraîner un risque de détérioration de l'isolation des outils ou du réseau. Les surfaces lisses peuvent être glissantes. L'obscurité ou la lumière éblouissante peuvent diminuer la vision. Il convient de prendre également en compte l'effet de température élevée et d'humidité pour la fatigue du travailleur. Celles-ci sont quelques unes des conditions environnementales sur le travail près des conducteurs sous tension, dont certaines nécessiteront d'être prises en compte pour déterminer les distances minimales d'approche.

A.8 Surveillance

Pour prévenir les travailleurs des situations dangereuses qui peuvent se présenter pendant le travail, il peut être parfois bénéfique d'exiger une surveillance continue par un observateur. A défaut de cela, il convient que les travailleurs soient encouragés à se décrire les uns aux autres à haute voix chaque étape de la procédure de travail avant de l'entreprendre. Il convient aussi que la procédure à suivre soit décrite et discutée entre le chef d'équipe et les travailleurs avant de commencer le travail.

Annexe B (informative)

Surtensions

B.1 Les différents types de surtensions

Les valeurs de surtension sont exprimées en p.u., et 1 p.u. est égal à $U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$ (voir 2.1.10).

Conformément à la CEI 60071-1, les tensions et surtensions sont divisées en classes, indiquées dans le Tableau B.1.

Tableau B.1 – Classification des surtensions conformément à la CEI 60071-1

Classe	Basse fréquence		Transitoire		
	Permanente	Temporaire	Front lent	Front rapide	Front très rapide
Formes de tension ou de surtension					
Gamme de formes de tension ou de surtension	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \text{ }\mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 }\mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \text{ }\mu\text{s} < T_1 \leq 20 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ }\mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formes de tension normalisées	 $f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 }\mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 50 \text{ }\mu\text{s}$	a
Essai de tension de tenue normalisée	a	Essais à la tension de courte durée à fréquence industrielle	Essai de choc de manœuvre	Essai au choc de foudre	a

^a A spécifier par le comité de produit correspondant.

Pour les applications de travaux sous tension, les surtensions présentant le plus d'intérêt, dans la plage de tensions visée, sont des surtensions à front lent dues à des manœuvres. Les transitoires à front rapide, telles que les surtensions de foudre, ne sont généralement pas importantes, car les travaux sous tension ne sont normalement pas réalisés dans des conditions de temps défavorables. La foudre peut causer un contournement au point d'impact. Autrement, la surtension résultante est atténuée de façon telle que le niveau de surtension ne conduira pas à un contournement dans la zone de travail, c'est-à-dire à des distances de plus

de 10 km. Les surtensions permanentes et temporaires à basse fréquence ne sont habituellement aussi pas prises en compte, car elles ne sont pas critiques pour les intervalles d'air requis pour tenir des surtensions de manœuvre pendant les travaux sous tension.

Dans de rares circonstances, d'importantes surtensions à basse fréquence importantes peuvent se produire par suite de la ferrorésonance d'éléments du réseau en configurations instables. Il convient d'aborder ce phénomène dangereux par des procédures permettant d'éviter une telle situation.

B.2 Surtensions transitoires à front lent

Les amplitudes de surtension à front lent dépendent de plusieurs paramètres tels que les caractéristiques du réseau, le point du réseau, le type d'événement considéré. De plus, au même point et pour la même famille d'événements, les surtensions ont une nature statistique. Ainsi les amplitudes de surtension à front lent sont évaluées sur la base d'une approche statistique: la référence est habituellement faite sur la surtension ayant une probabilité de 2 % d'être atteinte ou dépassée (U_{e2} entre phase et terre et U_{p2} entre phases) et à l'écart-type de la distribution statistique, présumée gaussienne, σ .

Les familles de surtension les plus communes sont examinées ci-après.

B.2.1 Origines et valeurs types

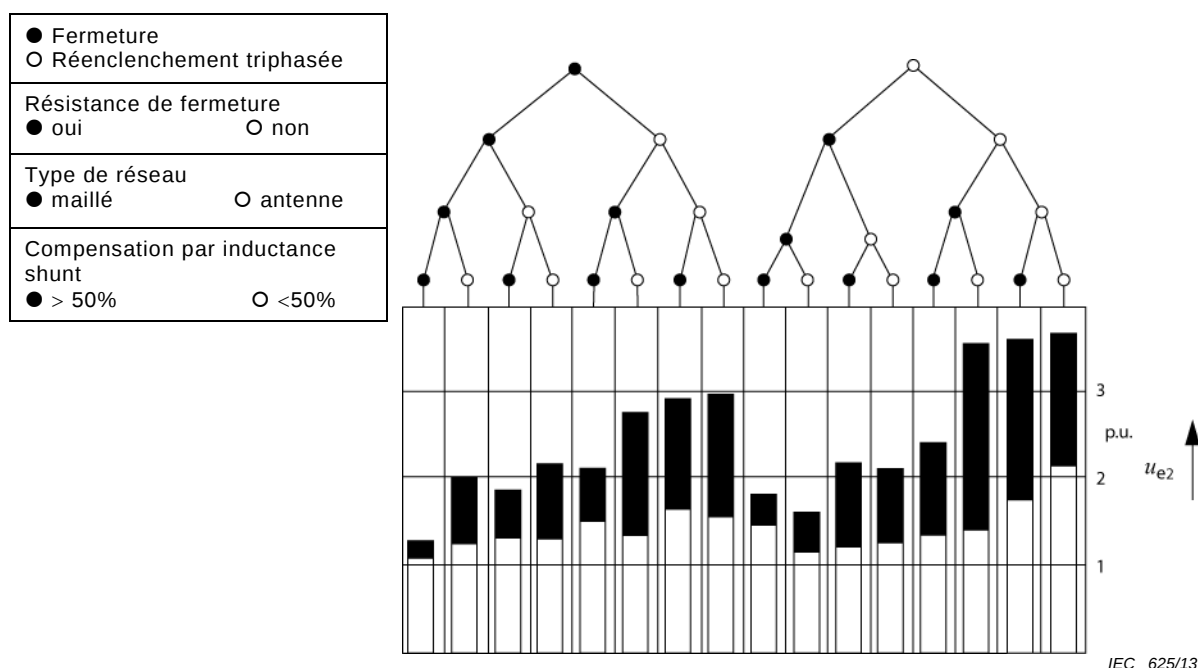
B.2.1.1 Surtensions entre phase et terre

Les surtensions de fermeture et de réenclenchement sont parmi les surtensions les plus fréquentes.

Les amplitudes des surtensions entre phase et terre dépendent de plusieurs paramètres: réseau d'alimentation (puissance de court circuit, rapport d'impédance de la composante homopolaire à la composante directe, configuration, niveau de tension présente sur le réseau), ligne interrompue (longueur, caractéristiques électriques, niveau de tension résiduelle laissée par l'alimentation antérieure), compensation shunt de ligne, lignes parallèles sous tension, disjoncteurs (largeur de pôle, préamorçage, angle de phase au moment de la commutation, résistances de fermeture), point le long de la ligne interrompue (la distribution de tension le long de la ligne augmente du poste à l'extrémité opposée).

La Figure B.1 résume les plages d'amplitudes maximales de surtensions entre phase et terre lors de l'alimentation d'une ligne en fonction des différentes conditions prises en compte. La plage de u_{e2} est assez étendue, allant d'environ 1,2 jusqu'à environ 2,8 pour des opérations de fermeture et d'environ 1,5 jusqu'à environ 3,8 pour des opérations de réenclenchement.

D'autres moyens de réduction des surtensions qui ne sont pas pris en compte dans la Figure B.1 sont les parafoudres, les éclateurs de coordination ou la commutation synchronisée.



NOTE Les niveaux les plus élevés correspondent à la ligne la plus longue.

Figure B.1 – Plages de u_{e2} en bout de ligne ouverte due à la fermeture et au réenclenchement conformément au type de réseau (maillé ou antenne) avec et sans résistances de fermeture et inductances shunt

Les surtensions dues à l'ouverture d'une charge capacitive sont en général moins sévères que celles dues à la fermeture. Une estimation prudente de leur valeur peut donc être obtenue à partir des valeurs de surtension de fermeture.

Les surtensions provenant de l'amorçage d'un défaut peuvent atteindre 1,6 p.u. à 1,7 p.u. dans les conditions de fonctionnement normales, et leurs amplitudes ne peuvent pas être facilement atténuées.

Les surtensions provenant de l'élimination d'un défaut peuvent atteindre 1,7 p.u. à 1,8 p.u.

B.2.1.2 Surtensions entre phases

Comme entre phase et terre, l'amplitude U_{p2} des surtensions entre phases dépend nettement des moyens adoptés pour les réduire.

Normalement, lorsqu'aucun moyen de réduction n'est adopté ou lorsque les surtensions sont contrôlées par des résistances de fermeture, la relation entre la surtension entre phases et la surtension entre phase et terre peut être donnée par la formule ci-dessous:

$$U_{p2} = 1,35 U_{e2} + 0,45$$

avec un écart-type:

$$\sigma_{pp} = \sigma_{pe} \sqrt{2}$$

La relation peut être différente lorsque les surtensions sont contrôlées par des parafoudres.

B.2.2 Surtensions en conditions anormales

Parmi les conditions anormales possibles qui peuvent mener à des surtensions très élevées, des réamorçages entre les contacts des disjoncteurs pendant leur ouverture sont à envisager et, en particulier, les conditions suivantes peuvent être préoccupantes:

- ouverture monophasée ou triphasée de lignes à vide;
- élimination triphasée d'un défaut entre une phase et la terre.

De telles situations anormales peuvent mener à des amplitudes de surtension du même ordre ou même d'un ordre supérieur à celles d'un réenclenchement triphasé.

Cependant la probabilité de réamorçage des disjoncteurs est normalement faible, et est vraiment très faible pour les disjoncteurs modernes. Ainsi, la faible probabilité de ces événements n'est pas de nature à influencer la distribution de la probabilité de la famille considérée (ouverture ou élimination d'un défaut) ni la valeur U_{e2} correspondante.

B.3 Contrôle des surtensions pour les travaux sous tension

Comme montré précédemment, en fonction de la tension nominale du réseau, le rapport de l'amplitude maximale de la surtension à front lent et de la tension maximale du réseau peut fortement varier en fonction de la philosophie de contrôle adoptée, laquelle peut changer avec la tension du réseau.

Plusieurs procédures de travaux sous tension inhibent les fermetures ou les réenclenchements pendant le travail sous tension. Dans ce cas, il convient de ne prendre en compte que les surtensions dues à l'ouverture, à l'amorçage d'un défaut et à l'élimination d'un défaut, et leurs valeurs peuvent varier dans une large plage (d'environ 1,6 p.u. à 2,8 p.u.).

En outre, il doit être pris en compte que des techniques de contrôle de surtension sont appliquées pour les tensions élevées de réseau et ne le sont pas pour les faibles tensions de réseau: de cette façon, généralement u_{e2} (p.u.) décroît lorsque la tension de réseau augmente.

En général l'amplitude des surtensions dépend de plusieurs paramètres et nécessite une analyse poussée pour le réseau considéré. C'est la raison pour laquelle aucune valeur de surtensions n'est proposée dans la présente annexe.

Finalement, une approche additionnelle pour contrôler les surtensions dans la zone de travail doit être mentionnée, laquelle consiste à installer temporairement des dispositifs limiteurs de tension pendant la durée du travail. Le dispositif limiteur de tension souvent utilisé est un intervalle tige-tige, lequel est installé sur la phase sur laquelle le travail sous tension est réalisé, de préférence sur la ou les structures immédiatement voisines. Cet intervalle, qui a été conçu et utilisé pour la première fois à la fin des années 1960, est portable et est installé seulement pour la durée du travail sous tension.

D'autres moyens de réduire les surtensions sont les parafoudres ou la commutation synchronisée. Les varistances à oxyde métallique ou MOV sont préférables à un intervalle d'air de protection car elles réduisent les surtensions sans causer la manœuvre des relais et des disjoncteurs.

Annexe C (informative)

Tenue diélectrique de l'air

La forme d'une tension de choc de manœuvre normalisée utilisée dans les essais a une durée jusqu'à la crête de 250 μs et une durée de queue de 2 500 μs . Les surtensions de manœuvre se produisant dans les réseaux en exploitation ont une durée jusqu'à la crête comprise entre 50 μs et 2 000 μs . La durée jusqu'à la crête de cette surtension a une influence considérable sur la tension de décharge disruptive, U_{50} , d'un intervalle d'air et varie avec la longueur de l'intervalle. L'amplitude de cette tension est minimale pour une valeur dite durée-à-crête critique. Il convient que la distance minimale d'approche soit déterminée en supposant une forme d'onde avec une durée jusqu'à la crête critique.

Par suite des nombreux essais aux ondes de choc de manœuvre, les intervalles d'air peuvent être caractérisés par la tenue minimale observée pour la valeur durée-à-crête critique de la surtension transitoire, en fonction des caractéristiques géométriques de l'intervalle d'air, qui sont principalement l'écartement et la configuration des électrodes. Parmi les différents intervalles de même écartement, d (en mètres), l'intervalle tige-plan en polarité positive présente la tenue la plus faible et est utilisé comme référence. Pour des intervalles tige-plan d'écartement entre 0,5 m et 12 m, la tenue diélectrique U_{50RP} à une onde de polarité positive ayant un temps de front critique, est donnée par (formule 3 de la brochure 151 du CIGRÉ):

$$U_{50RP} = 1\,080 \ln(0,46d + 1) \text{ kV} \quad (\text{C.1})$$

Pour d'autres configurations d'intervalle et pour prendre en compte d'autres influences, la tension de tenue statistique U_{90} peut être déterminée en appliquant un facteur K_t comme suit:

$$U_{92} = K_t U_{50RP} \quad (\text{C.2})$$

soit:

$$U_{90} = K_t 1\,080 \ln(0,46d + 1) \quad (\text{C.3})$$

En transformant l'équation (C.3) et en prenant en compte la distance F d'objet conducteur à potentiel flottant, on obtient l'équation (8) pour la distance électrique D_U .

Pour chaque distance d'intervalle, et sous les mêmes conditions atmosphériques, il y a une dispersion statistique des tensions de claquage. D'après des essais, la probabilité de claquage est supposée habituellement avoir une distribution normale (gaussienne). L'écart-type de cette distribution varie avec la forme d'onde, la polarité de la surtension, la géométrie de l'intervalle et les conditions atmosphériques.

La relation entre la tension de tenue statistique, U_{90} , et la tension de décharge disruptive à 50 %, U_{50} , est:

$$U_{90} = U_{50} - 0,0128 s_e U_{50} \quad (\text{C.4})$$

où s_e est la valeur normalisée de l'écart-type de U_{50} , exprimée en pourcentage. En définissant k_s comme:

$$k_s = 1 - 0,0128s_e \quad (\text{C.5})$$

l'équation (C.4) devient:

$$U_{90} = k_s U_{50} \quad (\text{C.6})$$

A moins que la valeur de s_e ne soit connue à partir d'essais représentatifs de la configuration et de la longueur de l'intervalle concernées, il convient de retenir une valeur de $s_e = 5 \%$. L'équation (C.5) devient alors:

$$k_s = 0,936 \quad (\text{C.7})$$

Annexe D (informative)

Facteur d'intervalle k_g

La forme et la dimension des parties conductrices sous tension et à la terre sont les caractéristiques qui ont la plus grande influence sur la tenue électrique d'intervalles de plus de 1 m. La configuration d'intervalle qui a la tenue la plus faible est la configuration tige-plan avec un choc de manœuvre de polarité positive appliqué à la tige.

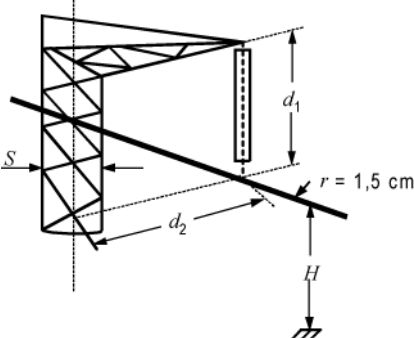
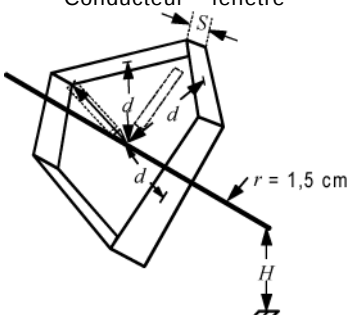
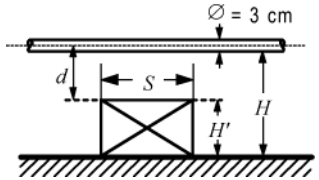
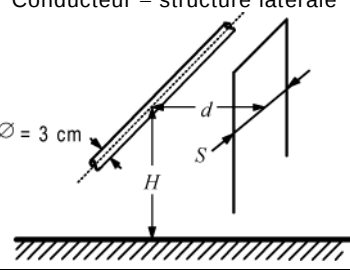
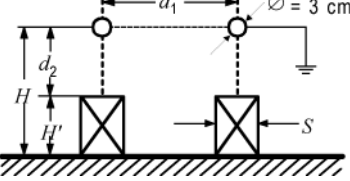
Si la partie conductrice mise à la terre n'est pas un plan ou si la partie conductrice sous tension est plus grosse qu'une tige, U_{50} est plus élevée que la valeur correspondant à la configuration tige-plan dans un rapport k_g appelé « facteur d'intervalle ». Plus la partie conductrice mise à la terre est petite (par exemple pylône, support de jeu de barres) et plus elle est loin du plan de terre, plus la valeur de k_g est grande jusqu'à la valeur limite correspondant à la configuration isolée conducteur-tige, qui a la tenue électrique la plus grande.

Les valeurs types de facteur d'intervalle pour des configurations courantes figurent dans le Tableau D.1 extrait de la CIGRÉ 72 et figurent aussi dans la CEI 60071-2. Le Tableau D.1 donne aussi des expressions du facteur d'intervalle k_g (donné ici comme " k ") permettant son calcul pour différentes configurations d'intervalle. Se référer à la CIGRÉ 72 pour avoir plus de précisions concernant la détermination du facteur d'intervalle.

Pour calculer la distance électrique, il est suggéré de choisir une valeur type de facteur d'intervalle à partir des valeurs apparaissant dans le Tableau D.1 (pour des configurations entre phase et terre). Dans certaines circonstances, comme celle d'un travail sur un ancrage fixé sur une structure large et n'ayant pas d'anneaux de répartition (peu probable pour des réseaux au-dessus de 300 kV) ou pour un travail près de conducteurs passant au-dessus de structures étendues, le facteur d'intervalle peut être aussi bas que 1,1. D'autre part, pour des structures étroites, le facteur d'intervalle peut s'approcher de 1,6. Le facteur d'intervalle peut être général et convenir pour plusieurs structures.

Pour une configuration entre phases, la plage du facteur d'intervalle est 1,45 à 1,6.

Tableau D.1 – Facteurs d'intervalle pour des configurations entre phase et terre réelles

Configuration	Formule	Valeur type
Conducteur – console 	$k = 1,45 + 0,015 \left(\frac{H}{d_1} - 6 \right) + 0,35 \left(e^{-8S/d_1} - 0,2 \right) + 0,135 \left(\frac{d_2}{d_1} - 1,5 \right)$ Valide dans la plage: $d_1 = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$ $d_2/d_1 = 1 \text{ à } 2$ $S/d_1 = 0,1 \text{ à } 1$ $H/d_1 = 2 \text{ à } 10$	$k = 1,45$
Conducteur – fenêtre 	$k = 1,25 + 0,005 \left(\frac{H}{d} - 6 \right) + 0,25 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Valide dans la plage: $d = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$ $S/d = 0,1 \text{ à } 1$ $H/d = 2 \text{ à } 10$	$k = 1,25$
Conducteur – structure inférieure 	$k = 1,15 + 0,81 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,167} + 0,02 \frac{H'}{d} - A \left[1,209 \left(\frac{H'}{H} \right)^{1,16} + 0,03 \left(\frac{H'}{H} \right) \right] \left(0,67 - e^{-2S/d} \right)$ où $A = 0$ si $S/d < 0,2$ et $A = 1$ si $S/d > 0,2$ Valide dans la plage: $d = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $S/d = 0 \text{ à } \infty$, $H'/H = 0 \text{ à } 1$	$k = 1,15$ pour conducteur-plan à 1,5 ou plus
Conducteur – structure latérale 	$k = 1,45 + 0,024 \left(\frac{H'}{H} \right) - 6 + 0,35 \left(e^{-8S/d} - 0,2 \right)$ Valide dans la plage: $d = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $S/d = 0,1 \text{ à } 1$, $H/d = 2 \text{ à } 10$	$k = 1,45$
Structure tige – tige (appareillage de connexion ouvert) 	Structure tige-tige dans un plan horizontal $k_1 = 1,35 - 0,1 \frac{H'}{H} - \left(\frac{d_1}{H} - 0,5 \right)$ Tige – structure inférieure $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H} - A 1,093 \frac{H'}{H} \left(0,549 - e^{-3S/d_2} \right)$ où $A = 0$ si $S/d_2 < 0,2$ et $A = 1$ si $S/d_2 > 0,2$ Valide dans la plage: $(k_1) d_1 = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $d_1/H = 0,1 \text{ à } 0,8$, $d_1 < d_2$ $(k_2) d_2 = 2 \text{ m à } 10 \text{ m}$, $S/d_2 = 0 \text{ à } \infty$, $d_2 < d_1$	$k_1 = 1,3$ $k_2 = 1 + 0,6 \frac{H'}{H}$

Annexe E (informative)

Prise en compte des conditions atmosphériques

E.1 Vue d'ensemble

La tenue de l'isolation d'un intervalle d'air donné croît avec la densité et l'humidité de l'air jusqu'au moment où il y a condensation à la surface des isolateurs. La tenue électrique d'intervalles particuliers, déterminée empiriquement, comme par exemple par l'équation (C.1), est valable habituellement pour les conditions atmosphériques normales (20 °C, 101,3 kPa, humidité 11 g/m³). Mais, pour que les distances minimales d'approche soient valables pour toutes les conditions atmosphériques qui se présenteront, le domaine d'influence de ces trois facteurs atmosphériques sur la tenue électrique de l'intervalle d'air doit être connu.

La méthode utilisée ici pour prendre en compte les conditions atmosphériques défavorables est celle définie dans la CEI 60060-1. Conformément à cette dernière, le facteur de correction atmosphérique, K , est donné par:

$$K = k_1 k_2$$

où

K est k_a ;

k_1 est le facteur de correction de la densité de l'air;

k_2 est le facteur de correction de l'humidité.

E.2 Densité de l'air

L'effet de la densité de l'air est pris en compte par la densité relative de l'air, δ , donnée par:

$$\delta = (p/p_0) [(273 + t_0)/(273 + t)]$$

où

t et p sont la température et la pression atmosphérique réelles;

t_0 et p_0 sont la température et la pression normale de 20 °C et 101,3 kPa.

D'où:

$$\delta = 2,89 p/(273 + t)$$

Le facteur de correction de densité de l'air, k_1 , dépend de la configuration de l'intervalle et du type de surtension, qui peuvent être pris en compte par un exposant, m , appliqué à la densité relative de l'air, c'est à dire:

$$k_1 = \delta^m$$

La combinaison de la température et de la pression donnant la plus basse densité de l'air et donc la tension de claquage la plus basse est celle d'une température élevée et d'une basse pression. Cependant, il est improbable que la température la plus élevée et la pression la plus basse attendues surviennent simultanément.

La CIGRÉ 72 propose deux méthodes, plus précises, de correction pour la densité de l'air: une méthode physique et l'expression empirique suivante qui est basée sur des études menées jusqu'à 3 000 m et qui fut établie, avec les tensions de chocs de manœuvre positives, pour être en accord avec les données de diverses configurations d'intervalle d'air:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{0,8 [1 + T (1 - \delta)] (\delta - 0,2 g_0)}{(1 - 0,2 g_0)} + 0,2 \quad (\text{E.1})$$

où U_0 est la tension de claquage dans les conditions normales, en kilovolts.

$$T = 1,4 \frac{1 - 0,8 g_0}{1 - 0,2 g_0} (k_g)^{1,6} \quad (\text{E.2})$$

$$g_0 = \frac{U_0}{500 d \left[1 + \frac{k_g - 1}{3} \right]} \quad (\text{E.3})$$

où d est la longueur de l'intervalle d'air, en mètres.

E.3 Humidité

L'effet de l'humidité sur la tension de claquage est complexe. Il est couramment pris en compte par un facteur appelé k dans la CEI 60060-1, dont la valeur est reliée empiriquement à l'humidité, et par un exposant, w , qui dépend de la distance et de la configuration de l'intervalle ainsi que de la forme d'onde. Ainsi, le facteur de correction de l'humidité, k_2 , est:

$$k_2 = k^w$$

La valeur de w , aussi bien que celle de m pour la densité relative de l'air, peut être déterminée par la méthode donnée dans la CEI 60060-1.

E.4 Altitude

La tenue électrique d'un intervalle d'air est affaiblie à haute altitude, dû à la diminution de la pression, bien que la baisse de la température et de l'humidité en modifient les effets. La diminution de la pression avec l'altitude peut être calculée à partir de l'expression:

$$p/p_0 = e^{-(H/8150)} \quad (\text{E.4})$$

où H est la hauteur au-dessus du niveau de la mer, en mètres.

La pression moyenne d'air à une certaine altitude peut alors être prise par hypothèse égale à la pression normale (101,3 kPa) corrigée pour l'altitude considérée, les variations de pression se produisant autour de cette valeur.

Cependant, puisque la température et l'humidité moyennes diminuent généralement avec l'altitude, il convient que le facteur de correction atmosphérique global, k_a , le prenne en compte. Les variations de température et d'humidité varieront fort probablement avec la localisation géographique, et une valeur précise du facteur moyen de correction de l'altitude en un lieu donné peut seulement être déterminée par l'analyse des données météorologiques

locales. Le facteur de correction déterminé de cette façon dépend aussi de la longueur de l'intervalle et de sa configuration ainsi que du front d'onde de la surtension.

Pour éviter d'avoir à appliquer une correction d'altitude pour chaque installation dans un réseau, un facteur commun de correction est habituellement pris pour tous les équipements installés jusqu'à une altitude de référence au-dessous de laquelle la majorité du réseau est située. D'autres facteurs de correction peuvent alors être déterminés pour des plages supplémentaires d'altitudes au-dessus de l'altitude de référence. Une altitude de référence de 1 000 m est proposée ici puisque cette valeur est couramment retenue. Mais certains réseaux sont situés à des altitudes bien inférieures à 1 000 m, aussi le Tableau E.1 contient des valeurs pour des altitudes plus basses de telle sorte qu'une valeur plus élevée et moins restrictive de k_a puisse alors être employée.

E.5 Facteur global de correction atmosphérique

Le facteur global de correction peut être décrit statistiquement par une valeur moyenne, k_a , et un écart-type normalisé relativement petit, au plus d'environ 1,5 %. L'écart-type normalisé, s_a , de k_a peut être combiné avec celui de la tension de claquage de l'intervalle d'air, s , par :

$$s_t = \sqrt{(s_a^2 + s^2)}$$

Puisque la valeur 1,5 % de s_a est petite comparée à la valeur proposée de 5 % pour s , s_a a seulement une petite influence sur la dispersion totale s_t . Il convient de noter, cependant, que pour des altitudes supérieures à 1 000 m, s_a peut avoir des valeurs supérieures à 1,5 %.

Les valeurs de k_a données dans le Tableau E.1 peuvent être retrouvées en employant les équations (E.1) à (E.4), basées sur les conditions normales de température et d'humidité (20 °C et 11 g/m³) et en employant l'équation (8) avec $k_g = 1,2$ pour déterminer le facteur g_0 . Il faut remarquer que les longueurs d'intervalle plus grandes donnent des valeurs de k_a plus grandes.

On a trouvé que lorsque k_a est calculé en utilisant les données climatiques réelles provenant de stations météorologiques situées à différentes altitudes (au lieu de prendre par hypothèse les valeurs normales d'humidité et de température 11 g/m³ et 20 °C), les valeurs de k_a sont plus grandes que la valeur calculée ci-dessus, de telle sorte que les valeurs calculées de k_a sont probablement conservatrices. Des valeurs de k_a plus précises et probablement plus élevées peuvent être déterminées par l'analyse de données météorologiques réelles.

**Tableau E.1 – Facteur atmosphérique k_a
pour différentes altitudes de référence et valeurs de U_{90}**

Altitude m	Plage de U_{90} kV						
	<199	200-399	400-599	600-799	800-999	1 000-1 199	>1 200
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,990	0,992	0,993	0,995	0,996	0,998	0,999
300	0,970	0,975	0,980	0,984	0,988	0,992	0,995
500	0,950	0,958	0,966	0,973	0,980	0,985	0,991
1 000	0,901	0,916	0,931	0,944	0,955	0,966	0,976
1 500	0,853	0,875	0,894	0,912	0,928	0,943	0,956
2 000	0,807	0,833	0,857	0,879	0,899	0,917	0,933
2 500	0,763	0,792	0,820	0,845	0,868	0,888	0,908
3 000	0,720	0,752	0,782	0,810	0,835	0,858	0,880

E.6 Méthode de calcul des valeurs du Tableau E.1

Les étapes suivantes ont été utilisées pour calculer chacune des valeurs données dans le Tableau E.1:

- a) U_{90} est la valeur la plus basse dans la plage (par exemple 200 kV dans la plage 200 kV à 399 kV);
- b) $U_0 = U_{50} = U_{90} / 0,936$ est la tension de claquage dans les conditions normales;
- c) prendre $k_g = 1,2$;
- d) $d = 2,17 \left[e^{U_{90} / \left(1080 k_s k_g \right)} - 1 \right]$ (équation (8)) c'est-à-dire l'intervalle avec $k_g = 1,2$ qui tiendrait U_{90} aux conditions atmosphériques normales ($k_s = 0,936$);
- e) calculer g_0 en utilisant l'équation (E.3);
- f) calculer T en utilisant l'équation (E.2);
- g) calculer $\delta (= p/p_0)$ pour l'altitude en utilisant l'équation (E.4) (cela suppose que δ varie seulement avec la pression moyenne et qu'il n'y a aucune variation de la température moyenne avec l'altitude);
- h) calculer $k_a (= U/U_0)$ en utilisant l'équation (E.1).

Annexe F (informative)

Effet des objets conducteurs à potentiel flottant sur la tenue diélectrique

F.1 Effets des outils pour les travaux sous tension

Pendant le travail sous tension, la tenue de l'isolation du réseau peut être diminuée par l'introduction, dans l'intervalle d'air, d'outils avec des embouts métalliques ou différents équipements conducteurs nécessaires pour la réalisation du travail. Pendant le travail au potentiel, le travailleur vêtu d'un vêtement conducteur est à un moment donné transféré du support mis à la terre au conducteur sous tension et réciproquement. Qui plus est, quand le travailleur est sur le conducteur, l'intervalle d'air conducteur-terre est modifié, ce qui peut altérer le facteur d'intervalle et la tenue diélectrique selon la taille et la position des objets conducteurs introduits dans l'intervalle d'air.

L'influence des outils ou du travailleur ne peut être calculée correctement, et par conséquent il convient de la déterminer par des essais de laboratoire sur des configurations représentatives.

La tenue électrique des outils pour travaux sous tension est aussi diminuée quand ils sont mouillés, bien que cela puisse être combattu, pour certains outils employés pour travailler à moyenne tension seulement, en utilisant des jupes. L'utilisation d'un revêtement de surface approprié est aussi une technique valable (par exemple l'emploi de revêtements au silicone). Dans tous les cas, la surface de tous les outils doit toujours être maintenue propre et en bon état.

F.2 Pièces conductrices de petites dimensions

La longueur de l'intervalle d'air est diminuée de la longueur (suivant l'axe de l'intervalle) des pièces conductrices qui y sont introduites ou y sont déjà présentes. Ces pièces peuvent être introduites ou être déjà présentes à l'extrémité sous tension ou à l'extrémité terre de l'isolation, ou peuvent être à un potentiel électrique flottant dans l'intervalle. Mais quel que soit leur emplacement, la tenue de l'intervalle décroît quand le nombre et/ou la longueur des pièces croît. En conséquence, il est important que les éléments conducteurs soient aussi petits et aussi peu nombreux que possible.

Pour prendre en compte la présence de ces petites pièces conductrices, il est suffisant, sur le plan pratique, de soustraire la somme de leurs longueurs maximales, F , mesurées suivant l'axe de l'intervalle, de la longueur totale de l'intervalle d'air, L_f , et de déterminer la tension de claquage de l'intervalle d'air qui en résulte en utilisant l'équation:

$$U_{50} = 1\,080 \ln(0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.1})$$

où L_f et F sont exprimées en mètres.

NOTE Le facteur d'objet conducteur à potentiel flottant k_f est égal à 1 lorsque la longueur de l'objet conducteur à potentiel flottant est inférieure ou égale à 10% de la longueur de l'intervalle.

F.3 Objets conducteurs de grandes dimensions

F.3.1 Considérations générales concernant le champ électrique

La présence d'un travailleur dans l'intervalle d'air ou d'objets conducteurs ayant une grande dimension, L , par rapport à la longueur de l'intervalle d'air, crée une distorsion du champ électrique dans l'intervalle.

Dans ce cas, et en fonction de la taille et de la forme de l'objet conducteur à potentiel flottant, ainsi que de sa position dans l'intervalle, la distorsion du champ peut conduire soit à diminuer soit à accroître la tenue de l'intervalle. Les conditions les plus défavorables conduisant à diminuer la tenue sont observées quand:

- l'objet présente des saillies faisant face à la structure à la terre;
- l'objet se trouve sur l'axe de l'intervalle ou près de celui-ci;
- la distance entre l'objet et le conducteur sous tension est comprise entre un quart et un tiers de la longueur totale de l'intervalle.

Comme pour les pièces conductrices de petites dimensions, il est plus facile de comparer cette tenue à celle d'un intervalle d'air ayant une longueur totale d'air égale à $L_f - L$, ou $L_f - F$.

La tenue minimale de l'intervalle en présence d'un objet conducteur à potentiel flottant peut être déterminée avec l'équation (F.2), où k_f est une constante applicable aux objets conducteurs à potentiel flottant.

$$U_{50} = 1080 k_f \ln (0,46(L_f - F) + 1) \text{ kV} \quad (\text{F.2})$$

Le facteur d'objet conducteur à potentiel flottant k_f dépend d'un grand nombre de paramètres. Dans le cas d'objets conducteurs de forme allongée, dont la dimension la plus grande est orientée en parallèle avec l'intervalle d'air, ou dans le cas d'objets conducteurs dont les trois dimensions sont du même ordre de grandeur, il est possible dans une certaine limite de prédire les valeurs de k_f . Ceci est possible grâce à l'analyse et à la généralisation dont il est fait rapport en F.3.2 et qui sont basées sur l'information disponible à ce moment.

Cependant, une telle généralisation n'est plus valide dans le cas d'objets conducteurs plats et de grande dimension orientés perpendiculaire à l'axe de l'intervalle d'air (c'est-à-dire que β est presque nul alors que k_f peut être aussi bas que 0,75). En l'absence de résultats théoriques et expérimentaux qui s'appliquent, la meilleure façon de déterminer k_f est en utilisant des configurations d'essai représentant les conditions réelles de travail sous tension.

F.3.2 Analyse de données expérimentales

F.3.2.1 Généralités

La plupart des études ont montré que les impulsions de manœuvre de polarité positive sont plus critiques que celles de polarité négative, bien que pour des intervalles d'air avec objets conducteurs, le pourcentage de diminution de la tenue diélectrique observé avec des impulsions de polarité négative est plus grand que celui observé avec des impulsions de polarité positive.

Les objets conducteurs à potentiel flottant ont deux principales influences:

- ils réduisent l'intervalle d'air net. Cette réduction peut être très importante dans le cas d'objets conducteurs de grandes dimensions. Cet effet est pris en compte en considérant la tenue diélectrique de l'intervalle d'air net résultant (ou la longueur réduite $L_f - F$). La longueur réduite $L_f - F$ est obtenue en soustrayant la longueur des objets conducteurs de l'intervalle d'air d'origine sans l'objet;

- ils peuvent affecter la tenue diélectrique de l'intervalle d'air net résultant, caractérisé par un facteur d'intervalle de référence k_g , dû à la modification de la distribution du champ à l'intérieur de l'intervalle. Cet effet est pris en compte en introduisant le facteur de correction k_f .

L'influence des objets conducteurs à potentiel flottant est un peu compliquée dès lors qu'elle dépend de plusieurs paramètres, comme illustré dans ce qui suit.

F.3.2.2 L'influence de la position de l'objet dans l'intervalle

Tous les essais réalisés dans différentes études montrent que la tension de tenue d'un intervalle contenant un objet conducteur à potentiel flottant est réduite.

Lorsque les configurations entre phase et terre sont prises en compte, la tenue minimale est atteinte lorsque l'objet conducteur à potentiel flottant est voisin de l'électrode sous tension.

Lorsque les configurations entre phases sont prises en compte, la tenue minimale est atteinte lorsque l'objet conducteur à potentiel flottant est voisin de l'électrode positive.

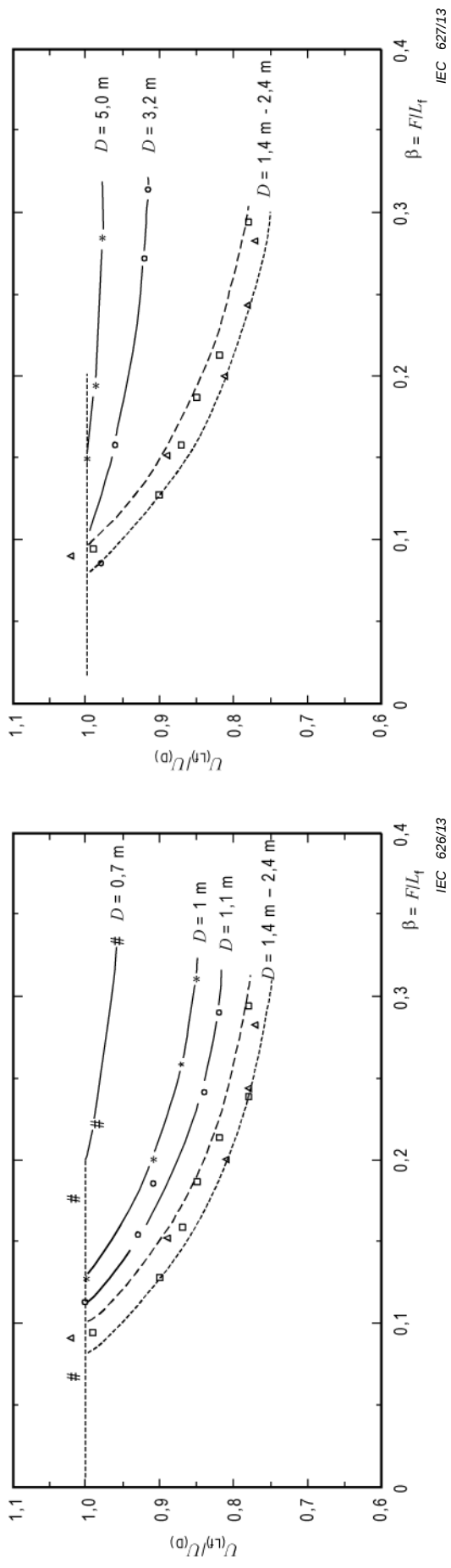
F.3.2.3 L'influence de la longueur des objets conducteurs à potentiel flottant

Les Figures F.1 et F.2 présentent la réduction de la tension de décharge de l'intervalle d'air due à l'altération du champ électrique causée par la présence d'objets conducteurs à potentiel flottant de longueurs différentes dans une position critique le long de l'axe de l'intervalle.

Le graphique de la Figure F.1, qui donne la valeur de k_f basée sur la configuration tige-tige entre phase et terre préalablement considérée comme une fonction du rapport $\beta = F/(D + F)$, (ou $\beta = F/L_f$), indique qu'en présence d'un objet conducteur en position critique dans l'intervalle d'air, l'altération du champ électrique produit une réduction de la tenue diélectrique qui est affectée par β . Pour chaque valeur de D essayée, l'effet de réduction de la tenue diélectrique est pratiquement nul pour $\beta < 0,1$ et augmente ensuite progressivement lorsque β augmente, avec une tendance proche de la saturation pour les fortes valeurs de β .

La Figure F.2 illustre le comportement d'une configuration conducteur-conducteur, entre phases.

NOTE La longueur de l'objet conducteur à potentiel flottant F est toujours ajoutée lors du calcul de la distance électrique D_U (voir l'équation (8) de 4.3.1).



Légende

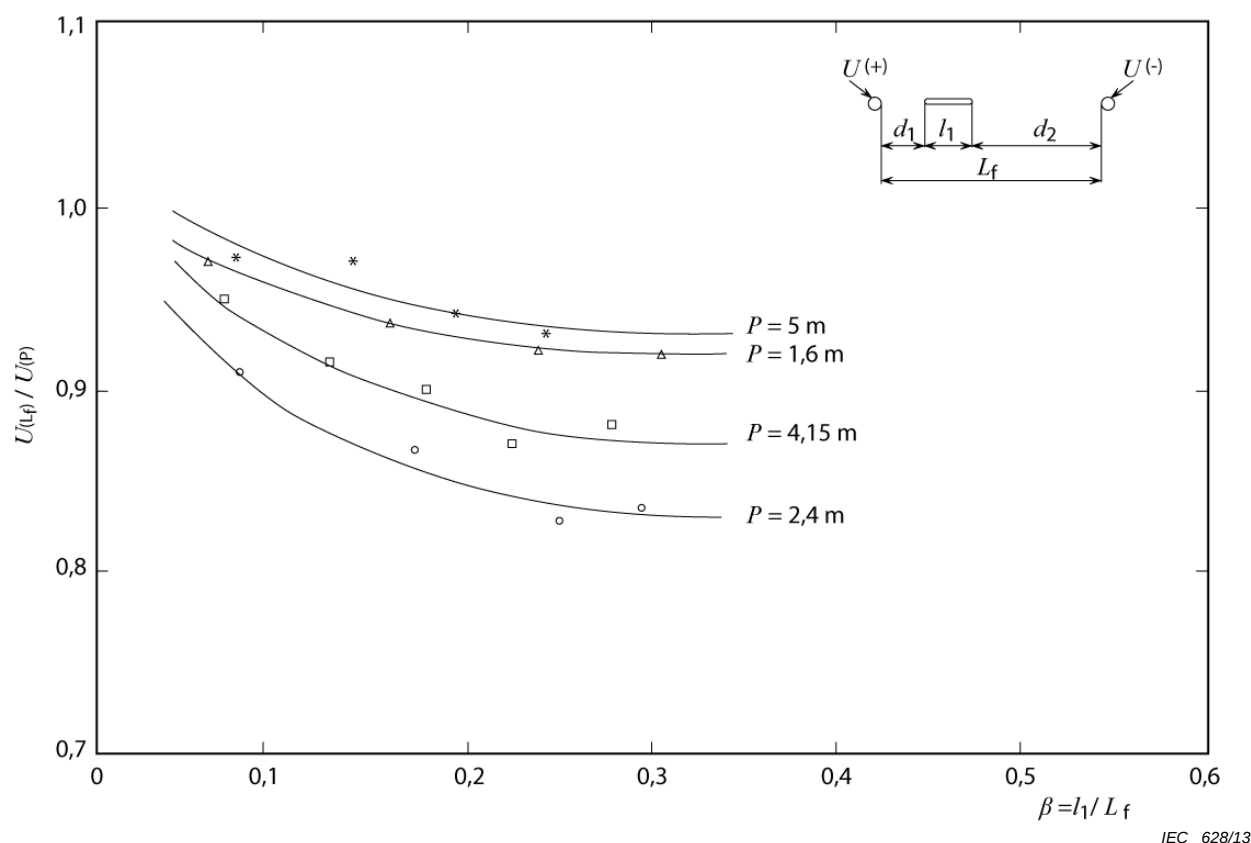
- # D (m) = 0,7
- * D (m) = 1,0
- D (m) = 1,1
- △ D (m) = 1,4
- D (m) = 2,4

NOTE Voir l'Article 2 pour les symboles.

Légende

- △ D (m) = 1,4
- D (m) = 2,4
- D (m) = 3,2
- * D (m) = 5,0

Figure F.1 – Influence de la longueur des objets conducteurs à potentiel flottant – configuration tige-tige entre phase et terre – impulsion de 250 μ s /2 500 μ s



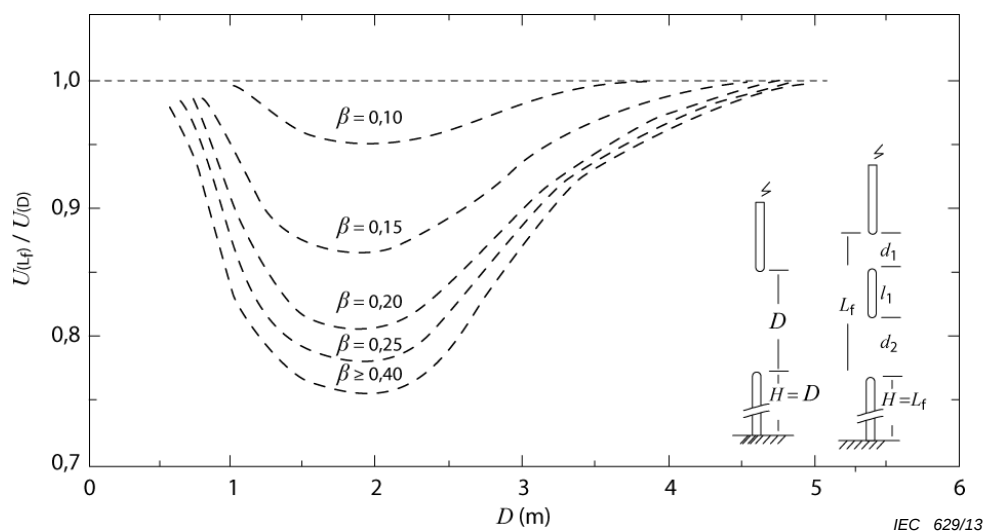
$d_1 + d_2 = P = \text{constante}$
 $\gamma = d_1 / L_f = 0,15$ (valeur critique)

NOTE Voir l'Article 2 pour les symboles.

Figure F.2 – Influence de la longueur des objets conducteurs à potentiel flottant – configuration conducteur-conducteur entre phases – impulsion de 250 μs / 2 500 μs

F.3.2.4 L'influence de la longueur de l'intervalle d'air restant (D ou P)

Des exemples de l'influence de D ou P sont donnés dans les Figures F.1 et F.2. Pour une valeur de β fixée, l'influence des objets conducteurs à potentiel flottant montre à la fois entre phase et terre et entre phases une forme en U (voir les Figures F.3 et F.4). Le minimum de k_f (influence maximale des objets conducteurs à potentiel flottant) est atteint pour des longueurs de l'intervalle d'air restant égales à 2 m et à 3 m respectivement pour les configurations entre phase et terre (D) et entre phases (P).

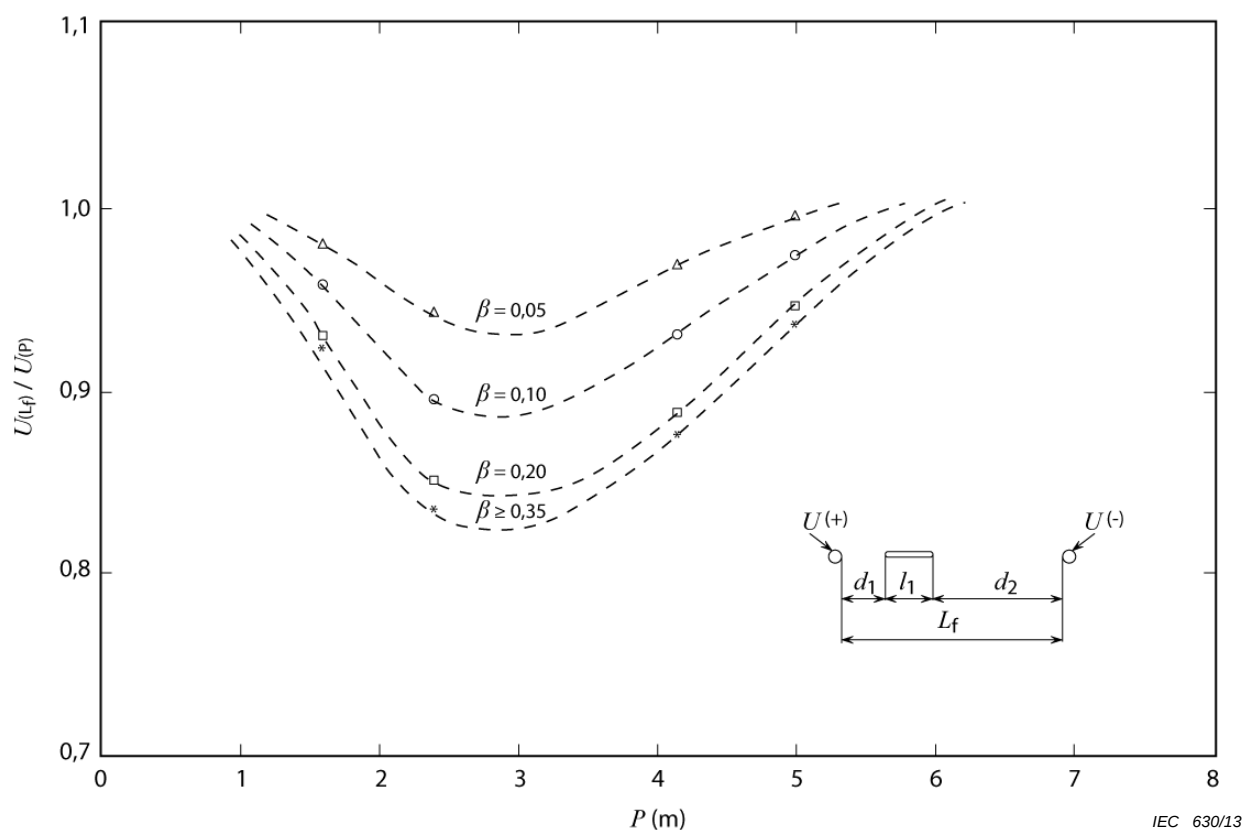


$$d_1 + d_2 = D$$

$$Y = d_1 / L_f = 0,3 \text{ (valeur critique)}$$

NOTE Voir Article 2 pour les symboles.

Figure F.3 – Réduction de la tenue diélectrique en fonction de la longueur D pour une valeur constante de β – Configuration tige-tige entre phase et terre



$$\beta = l_1 / L_f$$

$$d_1 + d_2 = P$$

$$Y = d_1 / L_f = 0,15 \text{ (valeur critique)}$$

NOTE Voir Article 2 pour les symboles.

Figure F.4 – Réduction de la tenue diélectrique en fonction de la longueur P pour une valeur constante de β – Configuration conducteur-conducteur entre phases

F.3.2.5 L'influence de la forme et du nombre d'objets dans l'intervalle

L'examen de données expérimentales mène aux considérations suivantes:

- la présence de multiple objets conducteurs dans l'intervalle d'air, au lieu d'un seul, le plus grand, dans la position critique, paraît, en comparaison avec les conditions précédentes, entraîner une plus petite réduction de la tenue diélectrique de l'intervalle d'air;
- les objets conducteurs en forme de double T, étant de grandes dimensions transversales comparées aux barres (jusqu'à 10 fois plus grandes), pour une même longueur mesurée le long de l'axe de l'intervalle d'air, semblent produire des réductions de tenue diélectrique comparables à celles causées par la barre elle-même. Autrement, lorsque la distance dans l'air est divisée par un objet conducteur parfaitement sphérique, l'altération dans le champ électrique apparaît virtuellement nulle.

F.3.2.6 L'influence du déplacement par rapport à l'axe de l'intervalle

La réduction de la tenue diélectrique causée par l'objet conducteur semblerait être annulée lorsque cet objet, déplacé parallèlement à lui-même, est éloigné d'une distance r par rapport à l'axe de l'intervalle d'air de telle façon que $r > 2,5 F$.

F.3.2.7 L'influence du facteur d'intervalle k_g

L'influence augmente avec l'augmentation du facteur d'intervalle et est plus grande pour les configurations entre phase et terre que pour les configurations entre phases.

F.3.3 Evaluation de l'influence des objets conducteurs à potentiel flottant sur la tenue diélectrique aux impulsions de manoeuvre

L'application de l'équation (F.2) requiert l'évaluation de k_f . L'approche la plus directe est de tirer une généralisation par interpolation et par extrapolation des données expérimentales disponibles.

Par exemple, un polynôme de degré 5 peut être utilisé, pour interpoler avec une bonne précision les résultats de la Figure F.3 (configurations entre phase et terre), pour les valeurs de β supérieures à 0,1 et pour les valeurs de D inférieures à 4 m:

$$k_{f(\beta=0,4)} = 0,0026D^5 - 0,033D^4 + 0,124D^3 - 0,049D^2 - 0,415D + 1,225$$

$$k_f \cong \left[1 - \left(1 - k_{f(\beta=0,4)} \right) \left(1 - e^{-2\alpha(\beta-0,1)} \right) \right]$$

avec D en mètres et avec les limitations suivantes:

- pour les valeurs de β inférieures à 0,1, k_f est égal à 1 indépendamment de D ;
- pour les valeurs de D supérieures à 4 m, on considère que k_f est égal à 1.

Une relation similaire peut être obtenue pour interpoler les données illustrées à la Figure F.4 (pour les configurations entre phases).

F.3.4 Objets conducteurs à potentiel flottant de grande taille exigeant une attention spéciale

Depuis plus de trente ans, les hélicoptères ont été utilisés à travers le monde pour réaliser des travaux sous tension. De par leur taille, leurs dimensions et la présence des rotors, ils constituent un cas spécial d'objets conducteurs de grande taille dans l'intervalle d'air. L'effet de l'hélicoptère sur les caractéristiques électriques de l'intervalle peut varier avec le type d'hélicoptère et dépendra de la taille de l'hélicoptère et des charges conductrices éventuellement suspendues (panier, plate-forme, barre, etc.).

Il existe aussi d'autres influences, telles que le mouvement conique des axes de pales d'un rotor (flexion mécanique), l'effet triboélectrique (charge acquise par la rotation des pales du rotor), l'effet de déflexion vers le bas, etc.

Des résultats d'essais en laboratoire sur des types choisis d'hélicoptères et de plate-formes de travail ont été publiés, cependant les données ne sont pas assez nombreuses pour permettre le développement de caractéristiques générales s'appliquant à plusieurs types d'hélicoptères utilisés dans des applications spécifiques de travaux sous tension.

Il convient que d'autres études soient réalisées lorsque des objets conducteurs de grande taille sont suspendus par une grue. Ces cas exigent une analyse particulière et dépassent le cadre du développement de facteur d'objet conducteur à potentiel flottant proposé dans la présente annexe.

Annexe G (informative)

Travaux sous tension près des isolations polluées, détériorées ou humides

G.1 Isolation polluée

Quand il y a de la pollution, la réaction des isolations externes humides à la tension à fréquence industrielle devient importante et peut dicter la conception de l'isolation externe. A moins qu'un lavage important ne survienne, le contournement de l'isolation se produit généralement quand la surface est polluée et devient humide par suite de pluie légère, de neige, de rosée ou de brouillard.

Le travail sous tension peut être entrepris avec des isolateurs pollués et humides à condition que:

- la ligne de fuite réelle des isolateurs dans la zone de travail ait été vérifiée en prenant en compte la ligne de fuite de conception, la tension de service et sa possible réduction due à des isolateurs détériorés;
- le niveau de pollution et d'humidité existant au moment où le travail sous tension doit être réalisé a été vérifié et trouvé à l'intérieur des conditions de pollution et d'humidité retenues à la conception, et permises pour la méthode de travail et les procédures utilisées. Le contournement dû à la pollution est un phénomène progressif précédé d'effluves visibles, de décharges audibles et d'un éventuel contournement partiel, de sorte qu'il peut y avoir un avertissement préalable. Si ces phénomènes se produisent, il est recommandé de ne pas entreprendre le travail sous tension.

G.2 Isolateurs à capot et tige détériorés

Beaucoup de travaux sous tension sont consacrés à remplacer des isolateurs ou des chaînes d'isolateurs à capot et tige détériorés. Aussi, il est important de savoir jusqu'à quel degré de détérioration de l'isolation il est possible de travailler sur ou près des isolateurs sans risque de contournement. La tenue électrique résiduelle d'une chaîne d'isolateurs à capot et tige qui comprend des éléments détériorés peut varier de façon significative suivant le type d'isolateur, le nombre et l'emplacement des éléments détériorés et leur degré de détérioration.

La tendance générale de ces variables est la suivante.

- La réduction de la tenue est significativement plus grande avec les isolateurs en verre qu'avec ceux en porcelaine. Cela résulte de ce que les isolateurs en verre trempé se détruisent toujours complètement, laissant un pivot nu, alors que les isolateurs en porcelaine peuvent être cassés de différentes façons, de sorte que la tenue dépend beaucoup de la portion des jupes de porcelaine qui reste.
- L'extrémité coté ligne est généralement le pire endroit où peuvent se retrouver des éléments détériorés. La tenue de la chaîne est plus grande si le même nombre d'éléments détériorés est à l'extrémité côté support, et encore plus grande s'ils sont au milieu de la chaîne. Les conditions exactes de la réduction maximale de la tenue de l'isolation dépendent de la distribution du champ électrique le long de la chaîne, c'est-à-dire de la longueur de la chaîne, du type d'armement à l'extrémité côté conducteur (par exemple des anneaux de répartition) et du type de support.

Naturellement, plus le nombre d'éléments détériorés est grand, plus la réduction de la tenue est grande. Mais même si tous les isolateurs sont détériorés, une chaîne d'isolateurs sèche conserve encore 20 % de sa tenue. La variation de la tenue en fonction du type et du nombre

d'éléments détériorés peut être considérée en première approximation comme linéaire, et l'analyse d'un grand nombre de résultats d'essai mène à l'équation (G.1).

$$k_{is} = 1 - 0,8 k_d(A_d/A_o) \quad (G.1)$$

où

A_d est le nombre d'isolateurs détériorés dans la chaîne;

A_o est le nombre d'isolateurs dans la chaîne;

k_d est considéré 1,0 pour le verre et 0,75 pour la porcelaine;

k_{is} est le facteur de chaîne d'isolateurs détériorés.

Ci-après, un exemple de détermination et d'utilisation de k_{is} pour calculer le nombre possible d'éléments détériorés dans la chaîne est donné.

Calculer D_{Lins} requise pour le nombre d'éléments détériorés dans la chaîne.

$$D_{Lins} = 2,17 (e^{U_{90}/(1\,080 K_t)} - 1) + F \quad (G.2)$$

Le Tableau G.1 montre D_{Lins} pour un réseau à 220 kV avec une tension de tenue requise pour le travail sous tension (U_{90}) de 565 kV crête en utilisant 14 isolateurs. Prendre $k_a = 0,931$, $k_g = 1,4$, $k_s = 0,936$, $k_f = 1,0$, et k_{is} calculé en utilisant l'équation (G.1). Les valeurs de longueur résiduelle minimale d'isolation du réseau requises D_{Lins} peuvent alors être calculées à partir de l'équation (G.2) pour les isolateurs en verre et en porcelaine.

$$U_{90} = 565 \text{ kV}$$

$$K_t = k_s k_g k_a k_f k_i = 1,22 k_{is}$$

k_{is} tel que calculé avec l'équation (G.1).

La longueur d'une chaîne de 14 isolateurs (146 mm chacun) est 2,04 m. Une D_{Lins} inférieure ou égale à la longueur de la chaîne détermine le nombre maximal d'isolateurs détériorés dans la chaîne qui donnera la tension de tenue requise par U_{90} .

Tableau G.1 – Exemple de calcul du nombre maximal d'isolateurs détériorés (facteur d'intervalle 1,4)

	Verre				Porcelaine		
A_d	A_d/A_o	k_{is}	K_t	D_{Lins}	k_{is}	K_t	D_{Lins}
1	0,071	0,943	1,15	1,24	0,957	1,19	1,2
2	0,143	0,886	1,081	1,35	0,914	1,12	1,3
3	0,214	0,829	1,01	1,47	0,872	1,06	1,38
4	0,286	0,771	0,94	1,61	0,828	1,01	1,47
5	0,357	0,714	0,871	1,79	0,786	0,96	1,58
6	0,429	0,657	0,801	<u>2,0</u>	0,743	0,906	1,7
7	0,5	0,6	0,732	2,26	0,7	0,854	1,83
8					0,66	0,805	<u>1,98</u>
9					0,614	0,749	2,19

Le Tableau G.1 indique que le nombre maximal d'isolateurs en verre détériorés est 6 alors que 8 peuvent être détériorés dans la chaîne en porcelaine et avoir une tension de tenue de 565 kV.

Le Tableau G.2 calcule la même chose pour une structure ayant un facteur d'intervalle de 1,2.

**Tableau G.2 – Exemple de calcul du nombre maximal d'isolateurs détériorés
(facteur d'intervalle 1,2)**

	Verre				Porcelaine		
A_d	A_d/A_o	k_{is}	K_t	D_{Lins}	k_{is}	K_t	D_{Lins}
1	0,071	0,943	0,984	1,52	0,957	1,00	1,49
2	0,143	0,886	0,927	1,64	0,914	0,956	1,6
3	0,214	0,829	0,867	1,8	0,872	0,912	1,68
4	0,286	0,771	0,806	<u>1,98</u>	0,828	0,866	1,8
5	0,357	0,714	0,747	2,2	0,786	0,822	<u>1,93</u>
6					0,743	0,777	2,08

Dans ce cas, 4 isolateurs en verre détériorés et 5 isolateurs en porcelaine détériorés deviennent la limite.

G.3 Isolateurs composites détériorés

Lors de travaux sous tension en présence d'isolateurs composites, il est important de connaître l'étendue maximale des dommages à l'isolation qui permettent tout de même de réaliser des opérations en toute sécurité sur ou à proximité de l'isolation tout en évitant le risque d'un contournement. La tenue électrique résiduelle d'un isolateur composite détérioré peut varier de façon significative selon le type de dommage, la longueur axiale et la localisation des dommages.

La tendance générale de ces variables est la suivante.

- La réduction de la tenue est significativement plus importante en cas de défauts conducteurs ou semi-conducteurs. Ceci est le cas, par exemple, lors de cheminement avec carbonisation de l'enveloppe de l'isolateur.
- L'extrémité côté ligne est généralement le pire endroit où peuvent se retrouver les dommages. La tenue de l'isolateur est plus grande lorsque les dommages sont localisés à l'extrémité côté support et elle est encore plus grande si les dommages se retrouvent en milieu de l'isolateur. Les conditions exactes associées à la réduction maximale de ce qui reste de la tenue de l'isolation est fonction de la distribution du champ électrique le long de l'isolateur, c'est-à-dire, la longueur de l'isolation, du type d'armement à l'extrémité côté conducteur (par exemple des anneaux de répartition) et le type de support.

Naturellement, plus les dommages sont importants, plus la réduction de la tenue est importante. Lorsque les pires dommages sont en cause (dommages conducteurs) et lorsqu'ils impliquent la totalité de la longueur de l'isolation, la tenue de l'isolateur composite devient nulle.

La Figure G.1 présente des résultats expérimentaux des effets de défauts conducteurs et semi-conducteurs simulés sur des isolateurs composites. La tenue d'un isolateur affecté par un défaut (U_d) est comparée à celle d'un isolateur en bon état (U_o), et la longueur du défaut dans la direction axiale (l_d) est comparée à la longueur totale d'isolation de l'isolateur (l_o). L'analyse des résultats d'essai conduit à supposer une variation linéaire de la tenue exprimée par l'équation (G.3), pour un cas conservateur correspondant à des défauts conducteurs.

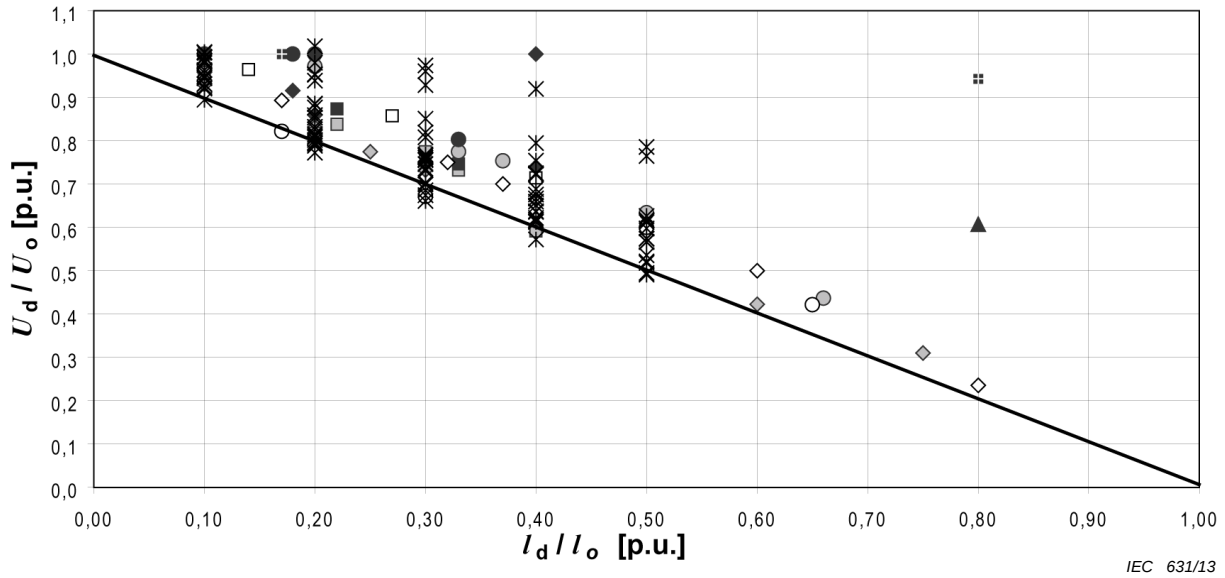
$$k_{ic} = 1 - (l_d/l_o) \quad (G.3)$$

où

l_d est la longueur détériorée dans la direction axiale de l'isolateur;

l_o est la longueur totale d'isolation de l'isolateur;

k_{ic} est le facteur d'isolateur composite détérioré.



Légende

- | | |
|---------------------|------------------------------|
| ◇ conducteur 150 kV | ◆ semi-conducteur 150 kV |
| ■ conducteur 150 kV | ■ semi-conducteur 150 kV |
| ● conducteur 150 kV | ● semi-conducteur 150 kV |
| ◇ conducteur 380 kV | ▲ semi-conducteur 380 kV |
| □ conducteur 380 kV | ■ semi-conducteur 380 kV |
| ○ conducteur 380 kV | * conducteur 150 kV – 380 kV |

Figure G.1 – Tenue des isolateurs composites affectés par des défauts conducteurs et semi-conducteurs simulés

Suit un exemple de la détermination de la valeur maximale permise de k_{ic} obtenue en calculant la longueur permise de détériorations conductrices sur un isolateur composite.

Calculer la longueur défectueuse qui conduit à l'exigence d'une valeur D_{Lins} égale à la longueur isolante de l'isolateur ($D_{Lins} = l_o$).

$$l_{dmax} = l_o \left[1 - \frac{U_{90}}{[1\ 080 \ln(0,46(l_o - F) + 1)] k_s k_g k_a k_f} \right] \quad (G.4)$$

Les travaux sous tension sont réalisés en toute sécurité en présence de défauts ayant une longueur inférieure à la valeur calculée l_{dmax} .

Pour un réseau à 220 kV avec une tension de tenue exigée pour les travaux sous tension (U_{90}) de 565 kV crête, il serait possible d'utiliser un isolateur composite ayant une longueur totale ($l = 2,04$ m) qui est la même que 14 éléments d'isolateur capot-tige. La longueur isolante de l'isolateur (l_o) est égale à 1,86 m. Prendre $k_a = 0,931$, $k_s = 0,936$, et $k_f = 1,0$. En supposant le facteur d'intervalle réel du pylône, les valeurs de la longueur maximale défectueuse qui correspond à la longueur minimale requise d'isolation du réseau D_{Lins} égale à l_o , peuvent être obtenues de l'équation (G.4). Suivent les résultats des calculs effectués avec des valeurs de k_g représentatives de la configuration de l'isolation ($k_g=1,4$ et $k_g=1,2$).

$$l_{dmax}(k_g=1,4) = 0,57 \text{ m}$$

$$l_{dmax}(k_g=1,2) = 0,357 \text{ m}$$

G.4 Transition isolante entre phase et terre pour câbles à fibres optiques

Pour ces transitions entre phase et terre pour câbles à fibres optiques, l'estimation d'un facteur spécifique k_i est à l'étude.

Dans les cas de transitions faites à partir d'isolateurs à noyau creux rigide, l'équation (G.3) pour isolateurs composites peut être utilisée.

Bibliographie

CEI 60050 (toutes les parties, *Vocabulaire Electronique International* (disponible à l'adresse <<http://www.electropedia.org>>)

CEI 60050-651, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 651: Travaux sous tension*¹

CEI 60060-1:2010, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais*

CEI 60071-1:2006, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

CEI 60071-2:1996, *Coordination de l'isolement – Partie 2: Guide d'application*

CEI 60743, *Travaux sous tension – Terminologie pour l'outillage, le matériel et les dispositifs*²

CEI 61477:2009, *Travaux sous tension – Exigences minimales pour l'utilisation des outils, dispositifs et équipements*

CIGRÉ, Brochure No. 72:1992, *Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of the external insulation* (publié en anglais seulement)

CIGRÉ, Brochure No. 151:2000, *Guidelines for insulation coordination in live working* (publié en anglais seulement)

¹ Edition 2, à publier.

² Edition 3, à publier.

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