

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Electrical insulating materials and systems – AC voltage endurance evaluation

Systèmes et matériaux isolants électriques – Évaluation de l'endurance à la tension alternative



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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 l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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



IEC 61251

Edition 1.0 2015-11

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Electrical insulating materials and systems – AC voltage endurance evaluation

Systèmes et matériaux isolants électriques – Évaluation de l'endurance à la tension alternative

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.99; 29.035.01

ISBN 978-2-8322-2990-3

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	3
INTRODUCTION	5
1 Scope	6
2 Normative references	6
3 Terms, definitions and symbols	6
3.1 Terms and definitions	6
3.2 Symbols	7
4 Voltage endurance	7
4.1 Voltage endurance testing	7
4.2 Electrical stress	7
4.3 Voltage endurance (VE) graph	8
4.4 Short-time electric strength	8
4.5 Voltage endurance coefficient (VEC)	9
4.6 Differential VEC (n_d)	9
4.7 Electrical threshold stress (E_t)	9
4.8 Voltage endurance relationship	10
5 Test methods	11
5.1 Introductory remarks	11
5.2 Tests at constant stress	11
5.2.1 Conventional VE test	11
5.2.2 Diagnostic measurements	12
5.2.3 Detection of an electrical threshold	12
5.3 Tests at higher frequency	12
5.4 Progressive stress tests	13
5.5 Preliminary tests to determine the initial part of the VE line	15
5.6 Recommended test procedure	15
6 Evaluation of voltage endurance	15
6.1 Significance of the VEC	15
6.2 Significance of the electrical threshold stress	16
6.3 Dispersion of data and precision requirements	16
6.4 Presentation of the results	16
Annex A (informative) The Weibull distribution	18
A.1 Weibull distribution times to dielectric breakdown	18
A.2 Weibull distribution dielectric breakdown stresses	18
A.3 Generalized Weibull distribution of the dielectric breakdown stresses	18
A.4 Inverse power model for the time to dielectric breakdown	19
Bibliography	20
Figure 1 – General voltage endurance line	8
Figure 2 – Determination of the differential VEC n_d at a generic point P of the VE line	9
Figure 3 – Plotting the VE line in a progressive stress test using different rates of stress rise	14

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRICAL INSULATING MATERIALS AND SYSTEMS –
AC VOLTAGE ENDURANCE EVALUATION**

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 61251 has been prepared by IEC technical committee 112: Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems.

This first edition of IEC 61251 cancels and replaces the second edition of IEC TS 61251, published in 2008. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the second edition of IEC TS 61251:

- a) upgrade from Technical Specification to an International Standard;
- b) clarification of issues raised since publication of IEC TS 61251.

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

FDIS	Report on voting
112/338/FDIS	112/347/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 website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

This International Standard covers insulating materials and systems. Voltage endurance tests are used to compare and evaluate insulating materials and systems. It is complex to determine the capability of electrical insulating materials and systems to endure a.c. voltage stress. The results of voltage endurance tests are influenced by many factors. Therefore this International Standard can be considered as an attempt to present a unified view of voltage endurance for simplified planning and analysis.

ELECTRICAL INSULATING MATERIALS AND SYSTEMS – AC VOLTAGE ENDURANCE EVALUATION

1 Scope

This International Standard describes many of the factors involved in voltage endurance tests on electrical insulating materials and systems. It describes the voltage endurance graph, lists test methods illustrating their limitations and gives guidance for evaluating the sinusoidal a.c. voltage endurance of insulating materials and systems from the results of the tests. This International Standard is applicable over the voltage frequency range 20 Hz to 1 000 Hz. The general principles can also be applicable to other voltage shapes, including impulse voltages. The terminology to be used in voltage endurance is defined and explained.

2 Normative references

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

IEC 62539, *Guide for the statistical analysis of electrical insulation dielectric breakdown data*

3 Terms, definitions and symbols

3.1 Terms and definitions

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

3.1.1

voltage endurance

VE

measures of the capability of a solid insulating material to endure voltage

Note 1 to entry: In this International Standard, only a.c. voltage is considered.

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

3.1.2

life

time to dielectric breakdown

3.1.3

voltage endurance coefficient

VEC

numerical value of the reciprocal of the slope of a straight line log-log VE plot

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

3.1.4

specimen

representative test object for assessing the value of one or more physical properties

3.1.5**sample**

group of nominally identical specimens extracted randomly from the same manufacturing batch

3.2 Symbols

c, c'	constants in the inverse-power model
E	electric stress
E_0	short-time electric strength
E_t	electric threshold stress
f	frequency
h, k	constants in the exponential model
L	life
m	scale parameter in the Weibull distribution (one variable)
M	scale parameter in the generalized Weibull distribution (two variables)
n	exponent of stress in the inverse-power model coinciding with the VEC
n_d	differential VEC
R	dimensional ratio
t	time
t_c	time to dielectric breakdown at constant stress
t_0	time to dielectric breakdown at constant stress E_0
t_p	time to dielectric breakdown with progressive stress
$\tan \delta$	dissipation factor
α	scale parameter (63,2 percentile) in the Weibull distribution of times to dielectric breakdown at constant stress
β	shape parameter in the Weibull distribution of times to dielectric breakdown at constant stress
γ	shape parameter of the Weibull distribution of the dielectric breakdown stresses from a progressive stress test

4 Voltage endurance**4.1 Voltage endurance testing**

To evaluate the voltage endurance of insulating materials or systems, a number of specimens are subjected to a.c. voltage and their times to dielectric breakdown are measured. In practice, several samples of many specimens are tested at different voltages to reveal the effect of the applied voltage on the time to dielectric breakdown. The arithmetic mean time to dielectric breakdown of each sample is the average time to dielectric breakdown of all specimens tested at that voltage. The time at which a certain percentage of specimens break down is the estimated time to dielectric breakdown with a probability equal to this percentage.

The statistical treatment of the data (either by analytical or graphical methods) allows the extraction of additional data such as other failure percentiles or confidence bounds and, possibly, determination of the distribution (Gaussian, Weibull, lognormal, etc.).

4.2 Electrical stress

In general, reference to electrical stress (voltage per unit thickness) instead of voltage is required. For a uniform field, electrical stress is given by the voltage (effective value) divided by the thickness of specimens.

If the electric field is not uniform, the maximum value shall be considered by the relevant equipment committees.

4.3 Voltage endurance (VE) graph

The VE graph represents the time to dielectric breakdown (life) versus the corresponding value of electrical stress. In the VE graph, the electrical stress is plotted as the ordinate with either a linear or logarithmic scale. The times to dielectric breakdown are plotted on the abscissa with a logarithmic scale. The voltage endurance line on this graph gives the final result of the VE tests as it allows clear and complete evaluation of voltage endurance of the specimens under the specified test conditions. For maximum significance, materials or systems shall be compared at equal thickness and using the same type of electrodes, temperature, humidity and ambient gas, or as agreed by the relevant equipment committees.

An accurate plotting of the line requires more than three tests at different voltages and one or more tests are required at voltages which result in times to failure longer than 1 000 h. In any case, a minimum number of three tests is required to draw the VE graph.

The voltage endurance line is straight or curved. In the latter case, its trend can often be approximated by a few straight regions: sometimes a first part for short times with a low slope, a middle region (which can extend to long times) with a steeper slope and finally a further trend of the line showing a tendency to become horizontal (see Figure 1, where a general VE line is shown). It is likely that the shape of the VE graph changes significantly from one material or system to another. With a curve as shown in Figure 1, the VEC is not constant, and the VEC will be different at different times (see n_d in Figure 2).

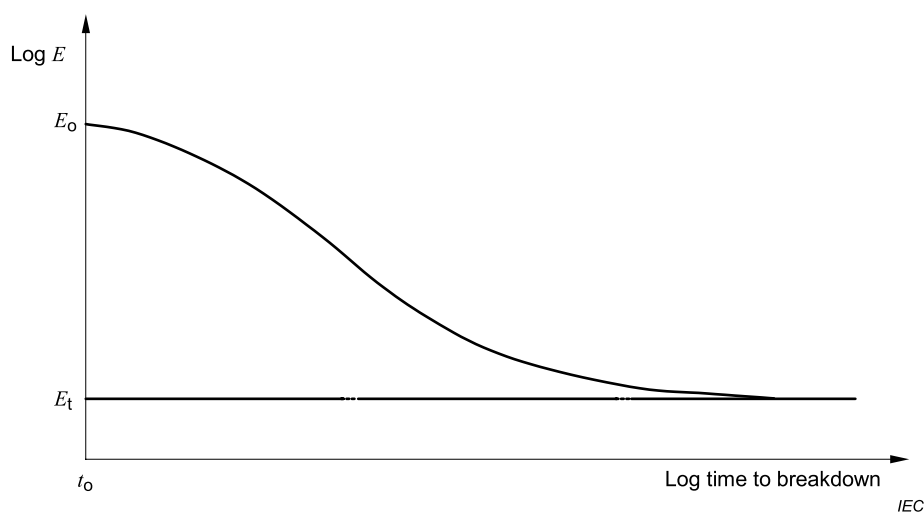


Figure 1 – General voltage endurance line

4.4 Short-time electric strength

The short-time electric strength is measured using a linearly increasing voltage. The duration of such a test, as used in this International Standard, is of the order of one minute up to some tens of minutes. The arithmetic mean value of the breakdown field for the tested sample is E_0 .

The results of electric strength tests (or, in general, of tests with increasing voltage) are not represented directly in the VE graph. Instead, a constant voltage test at the same stress as the mean electric strength, E_0 (or very close to it, $0,9E_0$ or as agreed), is made to determine the time to dielectric breakdown, t_0 , with constant stress. The point (E_0, t_0) is the origin of the VE line. More details on this procedure are given in 5.5. However, when this procedure is used, the following precautions shall be taken.

- a) The electric strength tests shall be carried out under the same conditions (humidity, temperature, etc.), in the same test cell and with the same procedures as for the voltage endurance tests.
- b) The test specimens, the breakdown path and the conditions of the specimen after dielectric breakdown shall be examined and recorded for future use in the analysis of the results. The latter is to ensure that the mode of failure at high stress is the same as that of the other specimens tested later at lower stress.

4.5 Voltage endurance coefficient (VEC)

The slope of the VE line, n , is an indicator of the response of a material or system to electrical stress. The parameter n is dimensionless. With a small slope of the VE line (i.e. a large value of VEC), even a small reduction of stress produces a great increase in life. The reciprocal of the slope is taken to be consistent with the numerical value of the exponent n in Formula (1). A large value of the VEC does not correspond necessarily to high electric strength. It can happen that the material with lower VEC has a longer time to dielectric breakdown at a given stress if its short-time electric strength is so high that its poorer endurance is compensated for. The value of n shall be associated with a high mean electric strength before attributing a high endurance to the material. What is most significant is the retention of usable electric strength for long periods of time.

4.6 Differential VEC (n_d)

If the VE line is curved in log-log coordinates, its slope is measured by means of the tangent at any point. For any electrical stress, and thus for any point on the line, the differential voltage endurance coefficient, n_d , can be defined as the absolute value of the reciprocal of the slope of the curve at that point (Figure 2) according to the life model described in Clause 5.

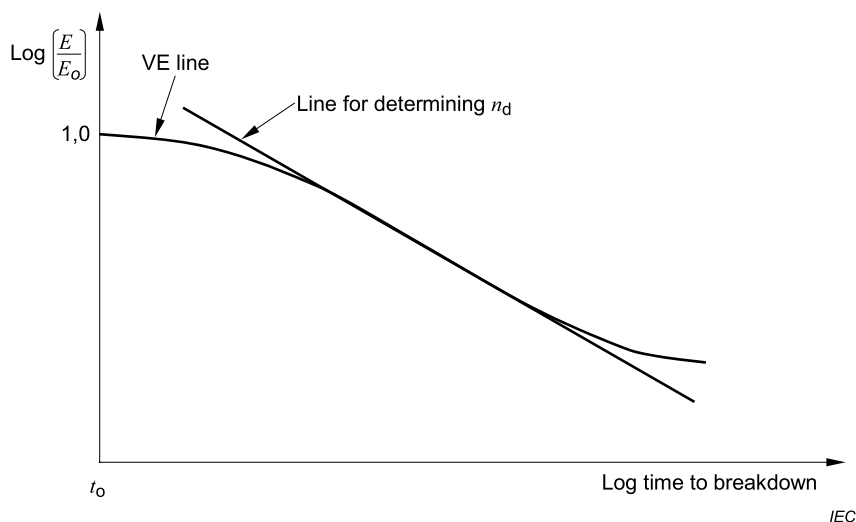


Figure 2 – Determination of the differential VEC n_d at a generic point P of the VE line

4.7 Electrical threshold stress (E_t)

If the VE line tends to become horizontal with decreasing stress within the test stress-times, this indicates the presence of a limiting stress, E_t , below which electrical ageing becomes negligible. This limit is called the electrical threshold stress. The tendency of the line to become horizontal is detected by means of tests of suitable duration. However, the tests do not always succeed in revealing such a trend in a reasonable time. Some insulating materials or systems do not show any electrical threshold stress even for very long test times.

4.8 Voltage endurance relationship

The VE relationship is the mathematical model of life under electrical stress or voltage, i.e. the formula relating electrical stress and time to dielectric breakdown, whose graphical representation is given by the VE line. If this line is straight on log-log graph paper, the formula is of the type:

$$L = c E^{-n} \quad (1)$$

where

L is the time to dielectric breakdown or time to failure or life;

E is the electrical stress;

c and n are constants dependent on temperature and other environmental parameters.

Formula (1) constitutes the so-called inverse-power model, which is the voltage-life model often encountered with voltage endurance data on solid electrical insulation. In this case the VEC is n , and it is constant. When data are available for time to dielectric breakdown at two constant-voltage stresses, this model shall be used to get a rough estimate of the value of n by using Formula (2):

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{-n} \quad (2)$$

If the VE test data do not form a straight line on log-log paper, the use of the inverse-power model is incorrect. If the line approaches an electrical threshold stress, E_t , other models have been proposed, among them

$$L = c' (E - E_t)^{-n}, \quad (3)$$

which becomes the inverse-power model if E_t tends to 0 and is preferably used when the data for short and medium times fit a straight line on log-log coordinates. Alternatively, another model is

$$L = \frac{k \exp(-hE)}{E - E_t}, \quad (4)$$

which derives from the exponential model, corresponding to an approximately straight line in semilog coordinates for $E > E_t$ but gives infinite time to dielectric breakdown when E tends to E_t . In Formulas (3) and (4), constants c' , n , k , h and E_t depend on temperature and other environmental conditions.

Formulas (3) and (4) generate two new formulas which define the trend of the VE line between any two points, (L_1, E_1) and (L_2, E_2) . The following formulas are obtained:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1 - E_t}{E_2 - E_t} \right)^{-n}, \quad (5)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\exp\{-h(E_1 - E_2)\}}{(E_1 - E_t)^h (E_2 - E_t)^{-h}}. \quad (6)$$

The formulas of the VE line for a straight line or a straight-line segment on log-log plot are Formulas (1) and (2). When there is a tendency toward a threshold after an approximately linear trend on log-log or semilog graph paper, Formulas (3), (4), (5) and (6) apply.

By taking the logarithms, the inverse-power model, Formula (1), becomes

$$\ln(L) = \ln(c) - n \ln(E) . \quad (7)$$

This is the formula of the straight VE line in log-log coordinates. Its slope is $-1/n$. As the numerical value of the reciprocal of the slope is equal to n , the VEC can also be defined as the exponent n in the inverse-power model.

5 Test methods

5.1 Introductory remarks

Different methods of carrying out the VE test can be used. The differences concern the way of applying voltage (constant or increasing with time), the frequency (service or higher) and the time at which the test is interrupted (the time to dielectric breakdown for all sample specimens (complete life tests) or a shorter time for some of the specimens of the sample (censored life tests)).

In general to enable comparisons to be made, the type of ageing cell or test object shall be the same, whatever the choice of the parameters above. However, with respect to the choice of the frequency of the applied voltage, the amount of heating from either dielectric loss or from partial discharges shall be such that the temperature rise from these causes is less than 3 K.

When testing materials, the ageing cell or test object should result in a uniform electric field. This can be achieved by electrodes having a flat surface rounded at the edges. To avoid partial discharges and flashover along the specimen surface, the specimen shall extend a suitable distance beyond the edges of the electrodes. If preliminary tests indicate that this extension beyond the electrodes is not enough to avoid partial discharges and flashover, the electrodes shall be immersed or embedded in an appropriate dielectric having the same or higher permittivity than that of the material under test.

The form and processing of the specimen will depend on the purpose of the test. For research purposes, internal degradation studies as a function of cavity size and shape have been performed. However, this lies outside the scope of this International Standard. Evaluation and comparison of materials from the point of view of degradation by external discharge are dealt with in IEC 60343.

For insulation systems, the test objects shall represent adequately the form taken in service and be determined by the relevant IEC equipment committee.

5.2 Tests at constant stress

5.2.1 Conventional VE test

In the constant stress test, the magnitude of the voltage applied to each specimen is kept constant during the test. This magnitude is usually selected in such a way that the arithmetic mean time to dielectric breakdown of the sample is between a few tens and a few thousands of hours. The time to dielectric breakdown of some specimens, especially at the lower stresses, can be so long that it is impracticable to wait for dielectric breakdown of all specimens of the sample. In this case, the interruption of the test after dielectric breakdown of some of the specimens requires the use of statistical procedures for censored data (see IEC 62539).

Usually, three or four different levels of voltage or electric field are used, thereby providing three or four points for the VE line. Four points are often not enough to demonstrate curvature of the line. On the other hand, the amount of data required for tests at more than four voltages is expensive to obtain.

The fit of the data to a straight line shall be established through regression analysis as specified in IEC 62539. If the quality of fit is good, that is the correlation coefficient R^2 is 0,90 or higher, the VE line can be fitted to a straight line, with the negative reciprocal of the slope of the line being the VEC. If R^2 is below 0,90, the VE line is curved and a straight line model is not appropriate.

For any test voltage, the times to dielectric breakdown of the specimens of a sample can be tested for their fit to various breakdown time probability functions. If the data fit the Weibull distribution, the experimental data give rise to a straight line (on Weibull paper) whose slope is the shape parameter, β , of the distribution (see Annex A). Proceeding in the same way for every test at different voltages, the variance of β can be checked.

5.2.2 Diagnostic measurements

In some cases there is no need to measure diagnostics. In those cases where the measurement of diagnostics is necessary, diagnostic quantities such as $\tan \delta$ or partial discharge shall be monitored during the test. Where $\tan \delta$ or partial discharge versus time curves obtained at different voltages are compared, similar patterns can be observed. This provides a contribution to understanding ageing behavior and prediction of the behavior of the VE line for other samples.

Short-time electric strength measurements can also be carried out on specimens that have not failed after a fixed ageing time, in order to evaluate their state of ageing. Thus the short-time electric strength is a diagnostic quantity to determine the degree of ageing caused by electrical stress.

To investigate the ageing process thoroughly, it is useful to employ chemical and microscopic analyses. The results are often related to the variation of macroscopic properties: short-time electric strength, conductivity, $\tan \delta$, etc.

5.2.3 Detection of an electrical threshold

The experimental points sometimes show a tendency of the VE line to become horizontal after long voltage exposure times. Moreover, many reports of VE investigations include points indicating much longer times to failure at the lower levels of stress than expected from extrapolation of the trend at higher voltages. These results can indicate the existence of an electrical threshold. It is desirable to test the data for the presence of such a threshold (E_t).

A check for the threshold voltage can be made by a test at elevated frequency, as illustrated in 5.3. Another method which permits evaluation of the trend of the VE line at low stresses is given in 5.6. The threshold stress is influenced by temperature, usually decreasing as temperature rises. For temperatures higher than room temperature, the VE line is usually displaced towards the left of the graph and the times to dielectric breakdown are shorter for the same electric stress. The VE test is often carried out at room temperature but tests at higher temperatures provide information on the type of ageing processes, on the shape of the VE line and, in particular, on the existence of a threshold and its dependence on temperature.

5.3 Tests at higher frequency

In order to reduce the test times, the frequency of the applied voltage may be increased. The time to dielectric breakdown, L_f , at power frequency f is often derived from the time to dielectric breakdown, L_h , at the test frequency, f_h , by means of the following relationship:

$$L_f = L_h \frac{f_h}{f} \quad (8)$$

However, the validity of this relationship is not proved, especially for organic materials when the test frequency is more than 10 times f . Sometimes, acceleration is found to be proportional to the frequency ratio raised to a power different from unity. This exponent depends also on temperature, environmental conditions and type of prevailing ageing mechanism. Because permittivity and $\tan \delta$ depend on frequency and temperature, dielectric heating, which is proportional to the product of the frequency, permittivity and $\tan \delta$, affects the time to dielectric breakdown. Also, partial discharges in micro-voids or defects inside the material and/or on the specimen surface have a different influence at a different frequency. Therefore, it is important that the interpretation of frequency-accelerated experiments is done with caution.

High-frequency tests at low stresses can be performed to infer the existence and, possibly, estimate the value of the electrical threshold. If the results of power-frequency tests seem to indicate the possible presence of a threshold, a high-frequency test shall be made at a voltage close to the voltage of the suspected threshold. If the time to dielectric breakdown at that voltage is considerably longer than would be expected according to the trend of the VE line at higher voltages combined with Formulas (3) to (6), the presence of the threshold is almost certainly confirmed and its estimation can be performed through fitting of the life curve to such formulas

5.4 Progressive stress tests

In the progressive stress test, the magnitude of the stress applied to each specimen in a sample increases with time until failure. The rate of the stress rise shall be the same for all specimens in a sample. However, to create a VE line, different rates of stress rise shall be used on each sample (i.e. collection of specimens). See Figure 3.

In this test, all specimens fail. Statistical treatment of the data is particularly useful due to the large quantity of information obtained. If the data relevant to each sample fit to the Weibull distribution, the corresponding points fit a straight line in Weibull paper. The slope of the line is the shape parameter γ of the distribution (see Clauses A.2 and A.3). Note that if γ is the same at different rates of voltage rise, the VEC can be derived from the ratio of γ to β (see Clause A.4). For this reason, in the VE test on materials and systems for which constancy of the VEC is expected in the test voltage range, a good practice is to carry out a progressive stress test in order to determine γ before starting with the constant stress tests. The VEC can then be derived theoretically. This permits a check of the value of the VEC to be made and thus the likely duration of the test program.

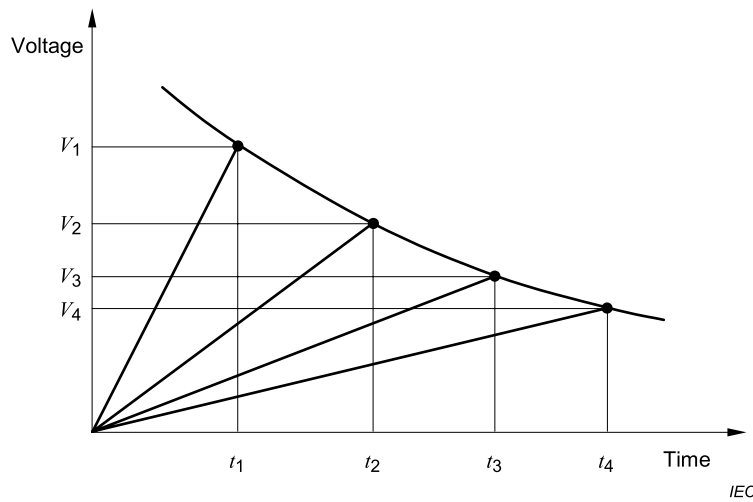


Figure 3 – Plotting the VE line in a progressive stress test using different rates of stress rise

Knowledge of the value of γ is of great importance when the results have to be reported for specimens of different size, i.e. area or volume. The dielectric breakdown probability at the same voltage stress is an increasing function of the dimensions of specimens. In order to transform the data – for instance the dielectric breakdown stress with a given probability – from the specimens for which these data have actually been obtained to specimens of different dimensions, it is necessary to know the relationship between probability, stress and dimensions. If the Weibull distribution is valid, the ratio between two stresses, E_1 and E_2 , corresponding to the same dielectric breakdown probability for two elements, 1 and 2, of different area is given by

$$\frac{E_1}{E_2} = R^{1/\gamma} , \quad (9)$$

where R is the dimensional ratio, i.e. the ratio of the dimensions (area) of element 2 to those of element 1. See Formula (A.2).

The progressive stress test data are usually less scattered than those from constant stress tests. If the VE line is straight on a log-log plot, its slope is also the same for progressive stress. The progressive stress data are related to those at constant stress by the following formula:

$$t_p = t_c (n + 1) , \quad (10)$$

where t_p and t_c are the times to dielectric breakdown at progressive and constant stress, respectively, for the same value of stress and n is the VEC.

Since n is usually in the range 8 to 15, t_c is shorter than t_p . The times to dielectric breakdown with progressive stress are significantly shorter than the failure times from constant stress tests. Therefore, the progressive stress test is useful only for evaluation of the VEC in the short-times range. If the VEC is not constant, it is not possible to predict time to dielectric breakdown at constant stress starting from progressive stress data. In any case, no information on the long-time behavior of the test material, let alone on the threshold, is obtainable by progressive stress testing.

NOTE n is typically between 9 and 12 for mica-epoxy materials.

5.5 Preliminary tests to determine the initial part of the VE line

Preliminary tests are useful to determine the initial high-voltage part of the VE line, as well as an initial estimate for the value of n . These tests provide data for planning the future lower voltage tests. They include the following:

- a) A progressive stress test or a step voltage test similar to a short-time electric strength test. The arithmetic mean dielectric breakdown voltage from this test is E_0 . The aim is to puncture the specimen rather than cause flashover of the specimen. The failure shall not be a flashover and shall resemble the dielectric breakdowns obtained at lower voltages and longer times, thus involving the same ageing mechanism. The time to dielectric breakdown in this test is often longer than the value suggested in IEC 60243-1.
- b) A constant stress test at or near E_0 . The voltage shall be raised to the value of E_0 without overshoots, and time t_0 is calculated as the average of the breakdown times of the sample specimens. A zero crossing switch can be used to initiate the test to avoid overshoots and a counter to count the number of a.c. cycles to dielectric breakdown.
- c) Constant stress tests at stresses slightly lower than E_0 , for example $0,9 E_0$, $0,8 E_0$.

According to Formula (10), the theoretical ratio of the arithmetic mean time to dielectric breakdown with progressive stress, t_p , to the arithmetic mean time to dielectric breakdown with the constant stress, t_c , is $n + 1$. From this an estimate of the value of n at the initial part of the VE line can be calculated. Note that the point (E_0, t_0) is on the VE line.

5.6 Recommended test procedure

In order to characterize insulating materials or systems comprehensively from the point of view of electrical endurance, the following procedure is recommended.

- a) Perform preliminary tests at high stress, as described in 5.4.
- b) Perform constant stress tests at lower stresses. A sufficient number of tests at different stresses shall be performed to plot the VE graph and to obtain a reliable prediction of the long-time behaviour of the material under test. In any case, at least three test voltages are required. Other diagnostic measurements are also useful.

When the graph shows a tendency towards a threshold stress, the following procedure is often a useful check for the existence of a threshold. Perform a test at a stress about 5 % below the expected threshold stress with increased frequency. After a few thousand hours, remove some of the specimens and perform chemical-physical analysis and short-time electric strength measurements. No statistically significant variation of properties with respect to unaged specimens, e.g. decrease of electric strength, shall be found if the voltage applied is below the threshold.

6 Evaluation of voltage endurance

6.1 Significance of the VEC

Considering a VE line, the larger the value of the VEC, the longer the time to dielectric breakdown for the same value of the ordinate (E/E_0) , all other parameters being equal. Hence, when a stress equal to the same percentage of E_0 is applied to two materials having different VECs, the time to dielectric breakdown is longer for the one having the larger VEC. Therefore, the VEC is an important parameter for voltage endurance evaluation of insulating materials.

Since the VE line is sometimes nonlinear and thus the VEC is not constant, it is important to specify the stress range within which the VEC has been determined. If the constancy of the VEC has not been proved and an average of VEC values is considered, this shall be reported. In the case of a curved line, the differential coefficient, n_d , has been defined in 4.6. The range of stress at which n_d has been determined constitutes additional information which shall be provided.

It can be noted that n_d gives direct information on the actual slope of the line. Therefore, a specification such as " n_d decreasing from 15 to 8 for stresses decreasing from 100 % to 50 % of E_0 " is a useful way to describe the VE line in that range of stresses.

6.2 Significance of the electrical threshold stress

If the material or system under consideration presents an electrical threshold stress of technical interest for insulation design (that is to say, not so low that its practical importance is negligible), this threshold stress becomes a useful factor to be determined in the VE test.

6.3 Dispersion of data and precision requirements

When the stress applied to an insulating material or system is higher than the threshold stress, the dielectric breakdown probability shall be calculated by statistical treatment of test data, as specified in IEC 62539. In order to obtain statistically valid results:

- a) the test specimens of a sample shall be taken by a random procedure from a large batch (coming from the same manufacturing process);
- b) specimens of uniform thickness and consistency shall be tested;
- c) identical test cells or test objects shall be used for every specimen and the temperature and environmental conditions shall be the same during each test or from one test to another.

In many cases, the VE line for very low dielectric breakdown probabilities is more useful than the mean or the median VE line. Statistical treatment of the test data is then carried out to calculate times to dielectric breakdown at low probabilities, generally using the Weibull distribution, besides checking the linearity of the graph.

The difference between the arithmetic mean or median time to dielectric breakdown and the time to dielectric breakdown with a given low dielectric breakdown probability is a function of the dispersion of times to dielectric breakdown inherent in the material under test. By increasing the number of specimens, more precise estimates of this dispersion and thus low dielectric breakdown probability times can be obtained with reasonable confidence.

To have an immediate view of test accuracy, the confidence bounds for each experimentally determined point on the VE graph shall be reported.

An *F*-test is effective to check that the data satisfy tolerance regarding departure from linearity. The life data usually span several decades in time. The higher the value of the VEC, the larger the number of decades required to define it with precision.

6.4 Presentation of the results

In order to have a complete evaluation of voltage endurance of an insulating material or system, the VE line (preferably the lines corresponding to different percentiles) shall be shown, including the confidence intervals. The VE graph shall always accompany the test report, which shall include all the data necessary to understand the graph and its reliability. The following items shall be indicated in the report:

- unique identification of the material;
- thickness and shape of specimens;
- preparation technique;
- conditioning of specimens (if any);
- shape and dimensions of electrodes;
- test method and apparatus used;
- rate of voltage rise for any progressive stress test;
- frequency of the test voltage;

- test temperature;
- number of specimens tested at each test voltage;
- scatter or confidence bounds of each point plotted on the graph;
- any other information of interest.

If the results are given in terms of VEC, the requirement of linearity of the graph shall be satisfied. If the graph does not satisfy such requirements, values of n_d shall be supplied, together with the corresponding stress ranges.

The type of statistical analysis used shall also be specified and graphs of breakdown times on probability paper shall be provided. Special conditions to be satisfied for any particular kind of VE test will be indicated by special documents.

Annex A (informative)

The Weibull distribution

A.1 Weibull distribution times to dielectric breakdown

The two-parameter Weibull distribution of the times to dielectric breakdown is usually written as

$$P(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\sigma} \right)^\beta \right], \quad (\text{A.1})$$

where

$P(t)$ is the dielectric breakdown probability at time t ;

β is the shape parameter;

α is the scale parameter, i.e. the time corresponding to $P = 1 - 1/e = 0,632$.

By taking logarithms twice one obtains:

$$\ln \ln (1/(1 - P)) = \beta \ln (t/\alpha) \quad (\text{A.2})$$

which, in coordinates $\ln \ln (1/(1 - P))$ versus $\ln (t)$, represents a straight line of slope β .

The Weibull paper is a special plotting paper which has scales according to such a coordinate system.

A.2 Weibull distribution dielectric breakdown stresses

The Weibull distribution of the dielectric breakdown stresses with linearly increasing voltage can be written as

$$P(E) = 1 - \exp (-mE^\gamma), \quad (\text{A.3})$$

where

γ is the shape parameter;

m is proportional to the scale parameter and the dimensional ratio, R (see 5.4).

On Weibull paper, a straight line of slope γ is obtained.

If two elements of different dimensions are stressed by two stresses, E_1 and E_2 , so that their dielectric breakdown probability is the same, P , then

$$1 - P = \exp (-m_1 E_1^\gamma) = \exp (-m_2 E_2^\gamma) = \exp (-Rm_1 E_2^\gamma). \quad (\text{A.4})$$

From Formula (A.4), relationship (10) of 5.4 is easily derived.

A.3 Generalized Weibull distribution of the dielectric breakdown stresses

The generalized Weibull distribution for times and stresses can be written as

$$P(t, E) = 1 - \exp(-M t^\beta E^\gamma), \quad (\text{A.5})$$

which becomes Formula (A.1) for $E = \text{constant}$ and Formula (A.3) for $t = \text{constant}$. For progressive stress ($E = \rho t$) the result is

$$t^\beta E^\gamma = \rho^\gamma t^{(\beta+\gamma)} = \frac{E^{(\beta+\gamma)}}{\rho^\beta}. \quad (\text{A.6})$$

Therefore, in the progressive stress test the slope of the line "probability as a function of stress" on Weibull paper is given by $(\beta + \gamma)$ and not by γ .

However, γ is usually much greater than β ; thus the difference can be so small that it can be neglected (γ is of the order of 10 or more, β around 0,5 to 2).

A.4 Inverse power model for the time to dielectric breakdown

If the data obtained at different stresses fit the same Weibull distribution (with constant values of the shape parameters β and γ), the equation of a line at constant dielectric breakdown probability, $\bar{P}$, is the following:

$$1 - \bar{P} = \exp(-M t_f^\beta E^\gamma), \quad (\text{A.7})$$

where t_f is the dielectric breakdown time with probability $\bar{P}$.

From Equation (A.7) the following relationship derives:

$$t_f^\beta E^\gamma = \text{constant},$$

and, since β and γ are constant,

$$t_f = C / E^{1/\beta}, \quad (\text{A.8})$$

which is an inverse power model for the time to dielectric breakdown, with $n = 1/\beta$.

Therefore, the validity of a Weibull distribution (see also IEC 61649) in a given range of stresses proves the validity of the inverse power model for time to dielectric breakdown in the same stress range, and vice versa.

The constancy of n in a given stress range indicates the same dielectric breakdown mechanism for any stress belonging to that range. In only that case can the progressive stress be applied and the transformation formula

$$t_p = t_c (n + 1) \quad (\text{A.9})$$

be used.

Bibliography

IEC 60243-1, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies*

IEC 60243-2, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage*

IEC 60243-3, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 3: Additional requirements for 1,2/50 μ s impulse tests*

IEC 60343, *Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharges*

IEC 61649, *Weibull analysis*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	23
INTRODUCTION	25
1 Domaine d'application	26
2 Références normatives	26
3 Termes, définitions et symboles	26
3.1 Termes et définitions	26
3.2 Symboles	27
4 Endurance à la tension	27
4.1 Essais d'endurance à la tension	27
4.2 Contrainte électrique	28
4.3 Graphe d'endurance à la tension (VE)	28
4.4 Rigidité diélectrique de courte durée	29
4.5 Coefficient d'endurance à la tension (VEC)	29
4.6 VEC différentiel (n_d)	29
4.7 Contrainte électrique seuil (E_t)	30
4.8 Relation d'endurance à la tension	30
5 Méthodes d'essai	31
5.1 Remarques introductives	31
5.2 Essais à contrainte constante	32
5.2.1 Essai VE conventionnel	32
5.2.2 Mesures de diagnostic	33
5.2.3 Détection d'un seuil électrique	33
5.3 Essais à des fréquences plus élevées	33
5.4 Essais avec contrainte progressive	34
5.5 Essais préliminaires pour déterminer la partie initiale de la courbe VE	35
5.6 Procédure d'essai recommandée	36
6 Evaluation de l'endurance à la tension	36
6.1 Signification du VEC	36
6.2 Signification de la contrainte électrique seuil	36
6.3 Dispersion des données et exigences de précision	36
6.4 Présentation des résultats	37
Annexe A (informative) La distribution de Weibull	39
A.1 Distribution de Weibull pour les durées avant une rupture diélectrique	39
A.2 Distribution de Weibull pour les contraintes de rupture diélectrique	39
A.3 Distribution de Weibull généralisée pour les contraintes de rupture diélectrique	40
A.4 Modèle de puissance inverse pour la durée avant une rupture diélectrique	40
Bibliographie	42
Figure 1 – Courbe d'endurance à la tension générale	28
Figure 2 – Détermination du VEC différentiel n_d en un point générique P de la courbe VE	30
Figure 3 – Tracé de la courbe VE dans un essai à contrainte progressive utilisant différentes vitesses d'augmentation de contrainte	34

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**SYSTÈMES ET MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES –
ÉVALUATION DE L'ENDURANCE A LA TENSION ALTERNATIVE**

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61251 a été établie par le comité d'études 112 de l'IEC: Evaluation et qualification des systèmes et matériaux d'isolement électrique.

Cette première édition de l'IEC 61251 annule et remplace la deuxième édition de l'IEC TS 61251 parue en 2008. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à la deuxième édition de l'IEC TS 61251:

- a) transformation d'une Spécification technique en Norme internationale;
- b) clarification des questions soulevées depuis la publication de l'IEC TS 61251.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
112/338/FDIS	112/347/RVD

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

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

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

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

INTRODUCTION

La présente Norme internationale traite des systèmes et des matériaux isolants. Les essais d'endurance à la tension sont utilisés pour comparer et évaluer des systèmes et des matériaux isolants. La détermination de la capacité d'endurance des systèmes et des matériaux isolants électriques aux contraintes de tension alternative est complexe. Les résultats d'essais d'endurance à la tension dépendent de nombreux facteurs. La présente Norme internationale peut donc être considérée comme une tentative de présentation globale de l'endurance à la tension permettant une planification et une analyse simplifiées.

SYSTÈMES ET MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES – ÉVALUATION DE L'ENDURANCE A LA TENSION ALTERNATIVE

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale décrit plusieurs des facteurs intervenant dans les essais d'endurance à la tension de systèmes et de matériaux isolants électriques. Elle décrit le graphe d'endurance à la tension, donne une liste des méthodes d'essai en indiquant leurs limites et donne des lignes directrices pour évaluer l'endurance à la tension alternative de systèmes et de matériaux isolants à partir des résultats des essais. La présente Norme internationale est applicable sur la plage de fréquences de la tension allant de 20 Hz à 1 000 Hz. Les principes généraux peuvent également être applicables à d'autres formes de tension, y compris les tensions de chocs. La terminologie à utiliser dans le cadre de l'endurance à la tension est définie et expliquée.

2 Références normatives

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

IEC 62539, *Guide for the statistical analysis of electrical insulation dielectric breakdown data* (disponible en anglais seulement)

3 Termes, définitions et symboles

3.1 Termes et définitions

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

3.1.1

endurance à la tension

VE

mesures de la capacité d'un matériau isolant solide à endurer une tension

Note 1 à l'article: Dans la présente Norme internationale, seules les tensions alternatives sont prises en compte.

Note 2 à l'article: L'abréviation «VE» est dérivée du terme anglais développé correspondant «Voltage Endurance».

3.1.2

durée de vie

durée de fonctionnement avant une rupture diélectrique

3.1.3

coefficient d'endurance à la tension

VEC

valeur numérique de l'inverse de la pente de la courbe VE si la courbe est une droite dans un système de coordonnées log-log

Note 1 à l'article: L'abréviation «VEC» est dérivée du terme anglais développé correspondant «Voltage Endurance Coefficient».

3.1.4**spécimen**

objet en essai représentatif destiné à évaluer la valeur d'une ou de plusieurs propriétés physiques

3.1.5**échantillon**

groupe de spécimens de valeurs nominales identiques, extraits de manière aléatoire dans un même lot de fabrication

3.2 Symboles

c, c'	constantes du modèle de puissance inverse
E	contrainte électrique
E_0	rigidité diélectrique de courte durée
E_t	contrainte électrique seuil
f	fréquence
h, k	constantes du modèle exponentiel
L	durée de vie
m	paramètre d'échelle de la distribution de Weibull (une variable)
M	paramètre d'échelle de la distribution de Weibull généralisée (deux variables)
n	exposant de la contrainte dans le modèle de puissance inverse coïncidant avec le VEC
n_d	VEC différentiel
R	rapport de dimensions
t	temps
t_c	durée avant une rupture diélectrique à contrainte constante
t_0	durée avant une rupture diélectrique à contrainte constante E_0
t_p	durée avant une rupture diélectrique à contrainte progressive
$\tan \delta$	facteur de dissipation
α	paramètre d'échelle (63,2 percentiles) dans la distribution de Weibull de durées avant une rupture diélectrique à contrainte constante
β	paramètre de forme dans la distribution de Weibull de durées avant une rupture diélectrique à contrainte constante
γ	paramètre de forme de la distribution de Weibull des contraintes de rupture diélectrique à partir d'un essai à contrainte progressive

4 Endurance à la tension**4.1 Essais d'endurance à la tension**

Pour évaluer l'endurance à la tension de systèmes ou de matériaux isolants, un certain nombre de spécimens sont soumis à une tension alternative et leurs durées avant une rupture diélectrique sont mesurées. Dans la pratique plusieurs échantillons de plusieurs spécimens sont soumis aux essais à des tensions différentes pour montrer l'effet de la tension appliquée sur la durée avant une rupture diélectrique. La moyenne arithmétique de la durée avant une rupture diélectrique de chaque échantillon est la durée moyenne avant une rupture diélectrique de tous les spécimens soumis aux essais à cette tension. Le moment auquel un certain pourcentage de spécimens subit une rupture correspond au temps estimé avant une rupture diélectrique avec une probabilité égale à ce pourcentage.

Le traitement statistique des données (par une méthode analytique ou par une méthode graphique) permet l'extraction de données supplémentaires telles que des percentiles d'erreurs ou des limites de fiabilité et éventuellement, la détermination de la distribution (Gaussienne, Weibull, log-normale, etc.).

4.2 Contrainte électrique

En général, il est nécessaire de faire référence à la contrainte électrique (tension par unité d'épaisseur) et non à la tension. Pour un champ électrique uniforme, la contrainte électrique est donnée par la tension (en valeur efficace) divisée par l'épaisseur des spécimens.

Si le champ électrique n'est pas uniforme, la valeur maximale doit être prise en considération par les comités d'équipements concernés.

4.3 Graphe d'endurance à la tension (VE)

Le graphe VE représente la durée avant une rupture diélectrique (durée de vie) en fonction de la valeur de contrainte électrique correspondante. Dans le graphe VE, la contrainte électrique est représentée sur l'axe des ordonnées en échelle linéaire ou logarithmique. Les durées avant une rupture diélectrique sont représentées sur l'axe des abscisses en échelle logarithmique. La courbe d'endurance à la tension sur ce graphe donne le résultat final des essais VE, car elle permet d'obtenir une évaluation claire et complète de l'endurance à la tension des spécimens dans les conditions d'essai spécifiées. Pour obtenir la meilleure signification, les matériaux ou les systèmes doivent être comparés en utilisant des épaisseurs égales, le même type d'électrodes, la même température, la même humidité et le même gaz ambiant, ou selon ce qui a été convenu par les comités d'équipements concernés.

Un traçage précis de la courbe nécessite plus de trois essais à différentes tensions et un ou plusieurs essais supplémentaires à des tensions qui donnent une durée avant défaillance supérieure à 1 000 h. Dans tous les cas, au moins trois essais sont exigés pour tracer la courbe VE.

La courbe d'endurance à la tension peut être rectiligne (une droite) ou non. Si la courbe n'est pas rectiligne, sa tendance peut souvent être approchée par des segments de droite. Par exemple une première partie de faible pente pour de petites durées, une région située au milieu (qui peut s'étendre sur de longues durées) de pente plus raide et finalement une dernière partie de la courbe tendant à devenir horizontale (voir Figure 1). Il est probable que la forme de la courbe VE varie beaucoup d'un système ou d'un matériau à un autre. Dans le cas de la courbe représentée à la Figure 1, VEC n'est pas constant et sera différent à différents instants (voir n_d sur la Figure 2).

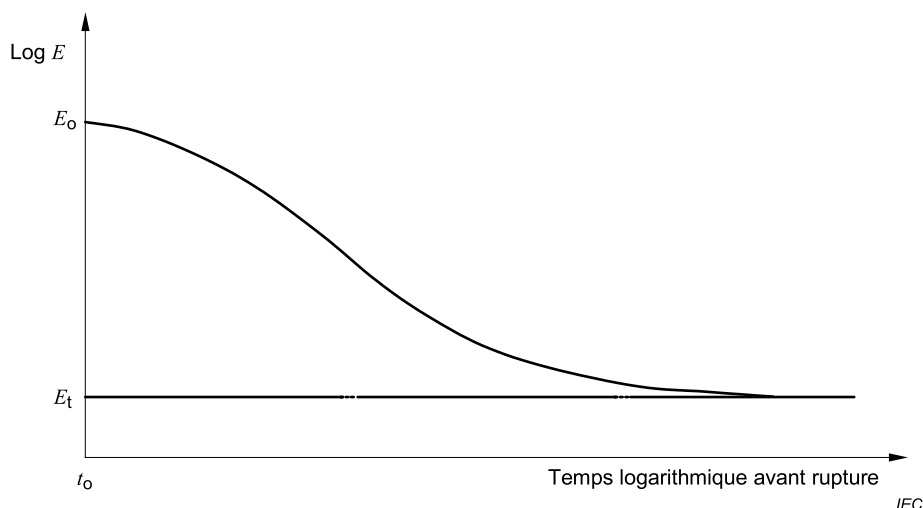


Figure 1 – Courbe d'endurance à la tension générale

4.4 Rigidité diélectrique de courte durée

La rigidité diélectrique de courte durée est mesurée en utilisant une tension augmentant linéairement. La durée d'un tel essai, tel qu'il est effectué dans la présente Norme internationale, est de l'ordre d'une minute à quelques dizaines de minutes. La valeur de la moyenne arithmétique du champ de rupture pour l'échantillon soumis aux essais est E_0 .

Les résultats des essais de rigidité diélectrique (ou, en général, des essais avec une tension croissante) ne sont pas représentés directement sur le graphe VE. Au lieu de cela, on effectue un essai à tension constante soumis à la même contrainte que la rigidité diélectrique moyenne, E_0 (ou très proche de cette valeur, $0,9 E_0$ ou selon une valeur convenue), pour déterminer la durée avant une rupture diélectrique, t_0 , avec une contrainte constante. Le point (E_0 , t_0) est l'origine de la courbe VE. Le paragraphe 5.5 donne davantage d'informations sur cette procédure. Toutefois, lorsque cette procédure est utilisée, les précautions suivantes doivent être observées:

- a) Les essais de rigidité diélectrique doivent être réalisés dans les mêmes conditions (humidité, température, etc.), dans la même cellule d'essai et avec les mêmes procédures que pour les essais d'endurance à la tension.
- b) Les spécimens d'essai, le chemin de rupture et l'état des spécimens après une rupture diélectrique doivent être soumis à un examen et consignés pour être utilisés dans le cadre de l'analyse des résultats. L'état des spécimens après une rupture diélectrique sert à assurer que le mode de défaillance sous une contrainte élevée est le même que celui des autres spécimens soumis aux essais plus tard sous une contrainte moins élevée.

4.5 Coefficient d'endurance à la tension (VEC)

La pente n de la courbe VE est un indicateur de la réponse d'un matériau ou d'un système à une contrainte électrique. Le paramètre n n'a pas de dimension. Lorsque la pente de la courbe VE est faible (c'est-à-dire une valeur élevée de VEC), une réduction de contrainte, même légère, entraîne une forte augmentation de la durée de vie. L'inverse de la pente est, par hypothèse, conforme à la valeur numérique de l'exposant n dans la Formule (1). Une valeur élevée de VEC ne correspond pas forcément à une rigidité diélectrique élevée. Il peut arriver qu'un matériau de VEC plus petit présente une durée avant une rupture diélectrique plus grande pour une contrainte donnée si sa rigidité diélectrique de courte durée est tellement élevée que sa faible endurance est compensée. La valeur de n doit être associée à une rigidité diélectrique moyenne élevée avant d'attribuer une forte endurance au matériau. Le plus important est le maintien de la rigidité diélectrique utilisable pendant de longues périodes de temps.

4.6 VEC différentiel (n_d)

Si la courbe VE n'est pas une droite dans un système de coordonnées log-log, sa pente est mesurée en utilisant la tangente en n'importe quel point. Pour n'importe quelle contrainte électrique, et donc en n'importe quel point de la courbe, le coefficient d'endurance à la tension (VEC) différentiel, n_d , peut être défini comme la valeur absolue de l'inverse de la pente de la courbe en ce point (Figure 2) conformément au modèle de durée de vie décrit à l'Article 5.

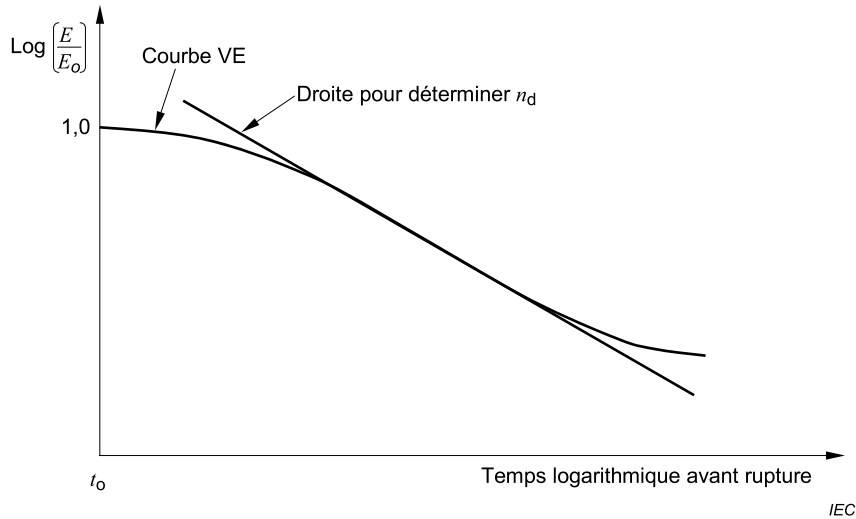


Figure 2 – Détermination du VEC différentiel n_d en un point générique P de la courbe VE

4.7 Contrainte électrique seuil (E_t)

Si la courbe VE tend à devenir horizontale lorsque la contrainte diminue pendant la durée de l'essai, cela indique la présence d'une contrainte limite, E_t , en dessous de laquelle le vieillissement électrique devient négligeable. Cette limite s'appelle la contrainte électrique seuil. La tendance de la courbe à devenir horizontale est détectée au moyen d'essais de durée appropriée. Toutefois, les essais ne parviennent pas toujours à révéler une telle tendance dans un temps raisonnable. Pour certains systèmes ou matériaux isolants, aucune contrainte électrique seuil n'apparaît même sur de très longues durées d'essai.

4.8 Relation d'endurance à la tension

La relation VE est le modèle mathématique de durée de vie sous une tension ou une contrainte électrique, c'est-à-dire la formule entre une contrainte électrique et la durée avant une rupture diélectrique, dont la représentation graphique est donnée par la courbe VE. Si la courbe est une droite en coordonnées log-log, la formule est du type:

$$L = c E^{-n} \quad (1)$$

où

L est la durée avant une rupture diélectrique, la durée de fonctionnement avant défaillance ou la durée de vie;

E est la contrainte électrique;

c et n sont des constantes dépendant de la température et d'autres paramètres d'environnement.

La Formule (1) constitue ce que l'on appelle le modèle de puissance inverse, qui est le modèle de durée de vie en tension souvent rencontré avec des données d'endurance à la tension sur une isolation électrique solide. Dans ce cas, VEC est constant et vaut n . Lorsque des données pour la durée avant une rupture diélectrique à deux contraintes de tension constantes sont disponibles, ce modèle doit être utilisé pour obtenir une estimation grossière de la valeur de n en utilisant la Formule (2):

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^n \quad (2)$$

Si les données de l'essai VE ne forment pas une droite en coordonnées log-log, l'utilisation du modèle de puissance inverse est incorrecte. Si la courbe tend vers une contrainte électrique seuil, E_t , d'autres modèles ont été proposés. Notamment, le modèle suivant:

$$L = c' (E - E_t)^{-n}, \quad (3)$$

qui devient le modèle de puissance inverse lorsque E_t tend vers 0. Il est utilisé de préférence lorsque les données pour des durées courtes et moyennes correspondent à une droite en coordonnées log-log. En variante, un autre modèle est:

$$L = \frac{k \exp\left(\frac{hE}{E_t}\right)}{E - E_t}, \quad (4)$$

obtenu par dérivation du modèle exponentiel, correspondant approximativement à une ligne droite en coordonnées semi-log pour $E > E_t$, mais qui donne une durée avant une rupture diélectrique infinie lorsque E tend vers E_t . Dans les Formules (3) et (4), les constantes c' , n , k , h et E_t dépendent de la température et d'autres conditions d'environnement.

Les Formules (3) et (4) génèrent deux nouvelles formules qui définissent la tendance de la courbe VE entre deux points quelconques, (L_1, E_1) et (L_2, E_2) . On obtient les formules suivantes:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{E_1 - E_t}{E_2 - E_t} \right)^n, \quad (5)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\exp\left\{ \frac{h(E_1 - E_2)}{E_t} \right\}}{(E_1 - E_t)/(E_2 - E_t)}. \quad (6)$$

Les Formules (1) et (2) sont les formules de la courbe VE pour une droite ou un segment de droite en coordonnées log-log. Lorsque la courbe tend vers un seuil après avoir été approximativement linéaire en coordonnées log-log ou semi-log, les formules (3), (4), (5) et (6) s'appliquent.

En prenant les logarithmes, le modèle de puissance inverse (Formule (1)) devient:

$$\ln(L) = \ln(c) - n \ln(E). \quad (7)$$

C'est la formule de la droite VE en coordonnées log-log. Sa pente est $-1/n$. Puisque la valeur numérique de l'inverse de la pente vaut n , VEC peut également être défini comme l'exposant n dans le modèle de puissance inverse

5 Méthodes d'essai

5.1 Remarques introductives

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour réaliser l'essai VE. Les différences portent sur la façon d'appliquer la tension (tension constante ou augmentant avec le temps), sur la fréquence (fréquence de service ou supérieure) et sur le temps après lequel l'essai est arrêté (la durée avant une rupture diélectrique pour tous les spécimens de l'échantillon (essais sur la durée de vie complète) ou une durée inférieure pour certains des spécimens de l'échantillon (essais de durée de vie tronqués)).

En général, pour pouvoir faire des comparaisons, le type de cellule de vieillissement ou d'objet en essai doit être le même, quels que soient les paramètres choisis ci-dessus. Toutefois, en ce qui concerne le choix de la fréquence de la tension appliquée, la quantité de chaleur produite par les pertes diélectriques ou par les décharges partielles doit être telle que l'échauffement qui en résulte soit inférieur à 3 K.

Lorsque des matériaux sont soumis aux essais, il convient que la cellule de vieillissement ou l'objet en essai donne un champ électrique uniforme. Ceci peut être obtenu en utilisant des électrodes dont les surfaces sont plates et les bords arrondis. Pour éviter les décharges partielles et les contournements le long de la surface du spécimen, le spécimen doit dépasser d'une distance appropriée au-delà des bords des électrodes. Si des essais préliminaires indiquent que cette extension au-delà des électrodes n'est pas suffisante pour éviter les décharges partielles et les contournements, les électrodes doivent être immergées et intégrées dans un diélectrique approprié de permittivité supérieure ou égale à celle du matériau en essai.

La forme et le traitement du spécimen dépendront du but de l'essai. Dans le cadre de recherches, des études de dégradation interne en fonction de la taille et de la forme des cavités ont été menées. Toutefois, ceci sort du domaine d'application de la présente Norme internationale. L'évaluation et la comparaison des matériaux relatives à la dégradation par décharges externes sont traitées dans l'IEC 60343.

Pour des systèmes d'isolation, les objets en essai doivent représenter de manière appropriée la forme prise en service et être déterminés par le comité d'équipements de l'IEC concerné.

5.2 Essais à contrainte constante

5.2.1 Essai VE conventionnel

Dans l'essai à contrainte constante, l'amplitude de la tension appliquée à chaque spécimen est maintenue constante pendant l'essai. Cette amplitude est généralement choisie de telle sorte que la moyenne arithmétique de la durée avant une rupture diélectrique de l'échantillon soit comprise entre quelques dizaines et quelques milliers d'heures. La durée avant une rupture diélectrique de certains spécimens, en particulier pour des contraintes plus faibles, peut être tellement grande qu'il est impossible d'attendre la rupture diélectrique de tous les spécimens de l'échantillon. Dans ce cas, l'interruption de l'essai après la rupture diélectrique de certains des spécimens exige l'utilisation de procédures statistiques pour les données tronquées (voir IEC 62539).

Trois ou quatre niveaux de tension ou de champ électrique sont généralement utilisés, ce qui donne trois ou quatre points pour la courbe VE. Souvent, quatre points ne suffisent pas pour mettre en évidence une courbure. D'autre part, la quantité de données exigée pour des essais à plus de quatre tensions est coûteuse.

L'ajustement des données à une droite doit être établi en utilisant une analyse de régression comme cela est spécifié dans l'IEC 62539. Si la qualité de l'ajustement est bonne, c'est-à-dire si le coefficient de corrélation R^2 est supérieur ou égal à 0,90, la courbe VE peut être ajustée à une droite, dont l'inverse négatif de la pente est VEC. Si R^2 est inférieur à 0,90, alors la courbe VE n'est pas une droite et le modèle de la droite n'est pas approprié.

Pour n'importe quelle tension d'essai, on peut contrôler que les durées avant une rupture diélectrique des spécimens d'un échantillon sont ajustées à différentes fonctions de probabilité de durées avant rupture. Si les données sont ajustées à la distribution de Weibull, les données expérimentales produisent une droite (sur un papier de Weibull) dont la pente est le paramètre de forme, β , de la distribution (voir Annexe A). On peut contrôler la variance de β en procédant de la même manière pour chaque essai à différentes tensions.

5.2.2 Mesures de diagnostic

Dans certains cas, il n'est pas nécessaire de procéder à des mesures de diagnostic. Dans ces cas, si la mesure des diagnostics est nécessaire, des valeurs de diagnostics, telles que $\tan \delta$ ou les décharges partielles, doivent être contrôlées pendant l'essai. Lorsque l'on compare les courbes de $\tan \delta$ ou de décharges partielles en fonction du temps, obtenues à des tensions différentes, on peut observer des formes similaires. Cela aide à comprendre le comportement du vieillissement et à prévoir le comportement de la courbe VE pour d'autres échantillons.

Des mesures de rigidité diélectrique de courte durée peuvent également être réalisées sur des spécimens qui n'ont pas échoué après un temps de vieillissement fixé afin d'évaluer leur état de vieillissement. Ainsi, la rigidité diélectrique de courte durée est une valeur de diagnostic pour déterminer le degré de vieillissement causé par une contrainte électrique.

Pour étudier de manière exhaustive le processus de vieillissement, on peut utiliser des analyses chimiques et microscopiques. Les résultats sont souvent liés à la variation de propriétés macroscopiques: rigidité diélectrique de courte durée, conductivité, $\tan \delta$, etc.

5.2.3 Détection d'un seuil électrique

Les points expérimentaux montrent parfois une tendance de la courbe VE à devenir horizontale après de longues durées d'exposition à la tension. En outre, de nombreux rapports d'examen d'endurance à la tension incluent des points indiquant des durées de fonctionnement avant défaillance bien plus longues à des niveaux de contrainte plus faibles que celles obtenues à partir d'extrapolation de la tendance à des tensions plus élevées. Ces résultats peuvent indiquer l'existence d'un seuil électrique. Il est donc souhaitable de contrôler ces données pour détecter la présence d'un tel seuil (E_t).

La tension seuil peut être contrôlée par un essai à fréquence élevée, comme cela est indiqué en 5.3. Une autre méthode qui permet d'évaluer la tendance de la courbe VE à des contraintes faibles est présentée en 5.6. La contrainte seuil est influencée par la température. Généralement, elle diminue quand la température augmente. Pour des températures supérieures à la température de la salle, la courbe VE se déplace généralement vers la gauche du graphe et les durées avant une rupture diélectrique sont plus petites pour la même contrainte électrique. L'essai VE est souvent réalisé à la température de la salle, mais des essais à des températures plus élevées donnent des informations sur le type de mécanisme de vieillissement, sur la forme de la courbe VE, et en particulier sur l'existence d'un seuil et sa dépendance à la température.

5.3 Essais à des fréquences plus élevées

Pour réduire les durées d'essai, la fréquence de la tension appliquée peut être augmentée. La durée avant une rupture diélectrique L_f à une fréquence industrielle f est souvent dérivée de la durée avant une rupture diélectrique L_h à la fréquence d'essai f_h , par la relation suivante:

$$L_f = L_h \frac{f_h}{f} \quad (8)$$

Toutefois, la validité de cette relation n'est pas prouvée, et particulièrement dans le cas des matériaux organiques lorsque la fréquence d'essai est supérieure à 10 fois la fréquence f . Parfois, on constate que l'accélération de l'essai est proportionnelle au rapport des fréquences élevé à une puissance différente de 1. Cet exposant dépend également de la température, des conditions d'environnement et du type prédominant de mécanisme de vieillissement. Puisque la permittivité et $\tan \delta$ dépendent de la fréquence et de la température, le chauffage diélectrique, qui est proportionnel au produit de la fréquence par la permittivité et par $\tan \delta$, affecte la durée avant une rupture diélectrique. Aussi, des décharges partielles dans des microvides ou des défauts à l'intérieur du matériau et/ou à la surface du spécimen, ont une influence différente à différentes fréquences. C'est pourquoi il est important que

l'interprétation d'expériences accélérées en augmentant la fréquence fasse l'objet de précautions particulières.

Des essais à haute fréquence et faibles contraintes peuvent être réalisés pour déduire l'existence, voire estimer la valeur, d'un seuil électrique. Si les résultats des essais aux fréquences industrielles semblent indiquer la présence possible d'un seuil, un essai à haute fréquence doit être réalisé à une tension proche de la tension du seuil suspecté. Si la durée avant une rupture diélectrique à cette tension est considérablement plus longue que ce que laissait prévoir la tendance de la courbe VE à des tensions plus élevées, combinée aux Formules (3) à (6), la présence du seuil est quasiment confirmée et son estimation peut être faite par un ajustement de la courbe de durée de vie à des telles formules.

5.4 Essais avec contrainte progressive

Dans l'essai avec contrainte progressive, l'amplitude de la contrainte appliquée à chaque spécimen dans un échantillon augmente jusqu'à une défaillance. La vitesse d'augmentation de la contrainte doit être la même pour tous les spécimens dans un échantillon. Toutefois, pour obtenir une courbe VE, les vitesses d'augmentation de contrainte doivent être différentes d'un échantillon à l'autre (un échantillon étant un ensemble de spécimens). Voir Figure 3.

Dans cet essai, tous les spécimens deviennent défectueux. Un traitement statistique des données est particulièrement utile en raison de la grande quantité d'informations obtenues. Si les données relatives à chaque échantillon sont ajustées à la distribution de Weibull, les points correspondants forment une droite sur un papier de Weibull. La pente de la droite est le paramètre de forme γ de la distribution (voir Articles A.2 et A.3). Noter que si les valeurs de γ sont les mêmes à différentes vitesses d'augmentation de tension, VEC peut être dérivé du rapport de γ sur β (voir Article A.4). Pour cette raison, dans l'essai VE sur des matériaux et des systèmes pour lesquels on attend un VEC constant dans la plage des tensions d'essai, une bonne pratique consiste à réaliser un essai à contrainte progressive pour déterminer γ avant de commencer les essais à contrainte constante. VEC peut alors être dérivé théoriquement. Ceci permet de contrôler la valeur de VEC et donc la durée probable du programme d'essai.

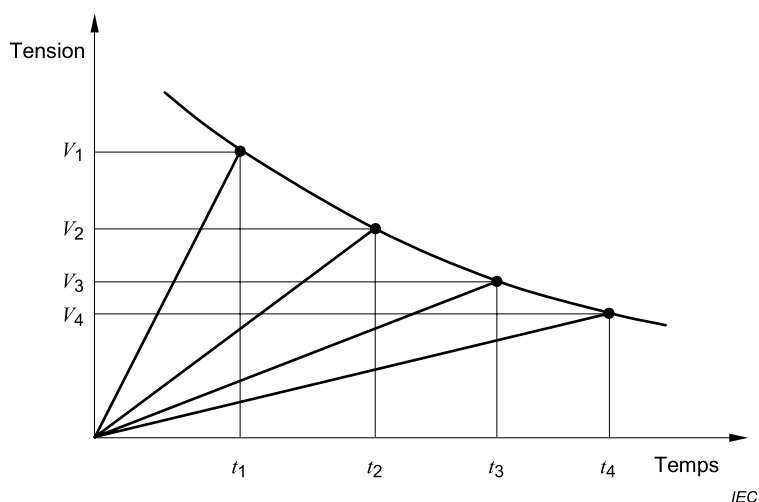


Figure 3 – Tracé de la courbe VE dans un essai à contrainte progressive utilisant différentes vitesses d'augmentation de contrainte

Il est important de connaître la valeur de γ lorsque les résultats doivent être consignés pour des spécimens de différentes tailles (surface ou volume). La probabilité de rupture diélectrique à la même contrainte de tension est une fonction croissante des dimensions des spécimens. Pour transformer les données (par exemple la contrainte de rupture diélectrique avec une probabilité donnée) de spécimens pour lesquels ces données ont réellement été obtenues, en données de spécimens de dimensions différentes, il est nécessaire de connaître

la relation entre la probabilité, la contrainte et les dimensions. Si la distribution de Weibull est valide, le rapport entre deux contraintes E_1 et E_2 , correspondant à la même probabilité de rupture diélectrique pour deux éléments 1 et 2 de surfaces différentes est donné par:

$$\frac{E_1}{E_2} = R^{1/\gamma} , \quad (9)$$

où R est le rapport des dimensions, c'est-à-dire le rapport entre les dimensions (surface) de l'élément 2 et celles de l'élément 1. Voir la Formule (A.2).

Les données d'essais à contrainte progressive sont généralement moins dispersées que les données d'essais à contrainte constante. Si la courbe VE est une droite en coordonnées log-log, sa pente est la même pour une contrainte progressive. La relation entre des données à contrainte progressive et des données à contrainte constante est la suivante.

$$t_p = t_c (n + 1) , \quad (10)$$

où t_p et t_c sont les durées avant une rupture diélectrique avec une contrainte progressive et une contrainte constante, respectivement, pour la même valeur de contrainte et n est le VEC.

Puisque n est généralement dans la plage de 8 à 15, t_c est inférieure à t_p . Les durées avant une rupture diélectrique avec une contrainte progressive sont bien plus petites que les durées avant défaillance avec une contrainte constante. L'essai à contrainte progressive est donc utile pour évaluer le VEC sur de courtes durées. Si VEC n'est pas constant, il n'est pas possible de prévoir la durée avant une rupture diélectrique à contrainte constante à partir de données à contrainte progressive. Dans tous les cas, il n'est pas possible d'obtenir d'informations sur le comportement à long terme du matériau en essai, et encore moins sur le seuil, par des essais à contrainte progressive.

NOTE n est typiquement compris entre 9 et 12 pour des matériaux mica-époxy.

5.5 Essais préliminaires pour déterminer la partie initiale de la courbe VE

Des essais préliminaires sont utiles pour déterminer la partie haute tension initiale de la courbe VE, ainsi qu'une estimation initiale de la valeur de n . Ces essais fournissent des données permettant de planifier les futurs essais en basse tension. Ces essais incluent:

- Un essai à contrainte progressive ou un essai à échelons de tension similaire à un essai de rigidité diélectrique de courte durée. La moyenne arithmétique de la tension de rupture diélectrique de cet essai est E_0 . L'objectif est de perforer le spécimen plutôt que de causer un contournement du spécimen. La défaillance ne doit pas être un contournement et doit ressembler aux ruptures diélectriques obtenues à des tensions inférieures et des durées plus longues, ce qui implique le même mécanisme de vieillissement. La durée avant une rupture diélectrique dans cet essai est souvent plus longue que la valeur suggérée dans l'IEC 60243-1.
- Un essai à contrainte constante à E_0 ou proche de E_0 , dans lequel la tension doit être augmentée à la valeur E_0 sans dépassement et la durée t_0 est calculée comme la moyenne des durées avant une rupture des spécimens de l'échantillon. Un commutateur par passage à zéro peut être utilisé pour commencer l'essai et éviter les dépassements, et un compteur peut être utilisé pour compter le nombre de cycles alternatifs avant la rupture diélectrique.
- Des essais à contraintes constantes légèrement inférieures à E_0 , par exemple $0,9 E_0$, $0,8 E_0$.

Conformément à la Formule (10), le rapport théorique entre la moyenne arithmétique de la durée avant une rupture diélectrique avec une contrainte progressive, t_p , et la moyenne arithmétique de la durée avant une rupture diélectrique avec une contrainte constante, t_c , est

$n + 1$. On peut alors estimer la valeur de n sur la partie initiale de la courbe VE. Noter que le point (E_0, t_0) est sur la courbe VE.

5.6 Procédure d'essai recommandée

Pour caractériser des systèmes ou des matériaux isolants de manière complète du point de vue de l'endurance électrique, la procédure suivante est recommandée:

- a) Réaliser des essais préliminaires avec une contrainte élevée, comme décrit en 5.4.
- b) Réaliser des essais à contrainte constante avec des contraintes plus faibles. Un nombre suffisant d'essais à différentes contraintes doivent être réalisés pour tracer la courbe VE et obtenir une prévision fiable du comportement à long terme du matériau en essai. Dans tous les cas, au moins trois tensions d'essai sont exigées. D'autres mesures de diagnostic sont également utiles.

Lorsque le graphe montre une tendance vers une contrainte seuil, la procédure suivante constitue souvent un contrôle utile pour indiquer l'existence d'un seuil. Réaliser un essai à une contrainte d'environ 5 % inférieure à la contrainte seuil prévue avec une fréquence supérieure. Après quelques milliers d'heures, retirer quelques spécimens et effectuer une analyse physique et chimique, ainsi que des mesures de rigidité diélectrique de courte durée. On ne doit pas constater de variation significative du point de vue statistique des propriétés des spécimens non vieillis (c'est-à-dire une diminution de la rigidité diélectrique) si la tension appliquée est inférieure au seuil.

6 Evaluation de l'endurance à la tension

6.1 Signification du VEC

Si l'on considère une courbe VE, plus VEC est grand, plus la durée avant une rupture diélectrique est longue pour la même valeur de l'ordonnée (E/E_0) , tous les autres paramètres étant égaux. Ainsi, lorsqu'une contrainte égale au même pourcentage de E_0 est appliquée à deux matériaux ayant des VEC différents, la durée avant une rupture diélectrique est plus longue pour celui dont le VEC est plus grand. VEC est donc un paramètre important pour l'évaluation de l'endurance à la tension de matériaux isolants.

Puisque la courbe VE n'est pas toujours linéaire et donc VEC pas toujours constant, il est important de spécifier la plage de contraintes dans laquelle VEC a été déterminé. Dans le cas où la constance de VEC n'a pas été prouvée et qu'une moyenne des valeurs de VEC est prise en compte, ces informations doivent être consignées dans un rapport. Dans le cas d'une courbe, le coefficient différentiel, n_d , a été défini en 4.6. La plage de contraintes sur laquelle n_d a été déterminé constitue une information supplémentaire qui doit être fournie.

On peut noter que n_d donne une information directe sur la pente réelle de la courbe. " n_d décroissant de 15 à 8 pour des contraintes qui décroissent de 100 % à 50 % de E_0 ", est une manière pratique de décrire la courbe VE dans cette plage de contraintes.

6.2 Signification de la contrainte électrique seuil

Si le système ou le matériau étudié présente une contrainte électrique seuil techniquement intéressante pour la conception de l'isolation (c'est-à-dire suffisamment élevée pour que son importance pratique ne soit pas négligeable), cette contrainte seuil devient un facteur très intéressant à déterminer dans l'essai VE.

6.3 Dispersion des données et exigences de précision

Lorsque la contrainte appliquée à un système ou à un matériau isolant est supérieure à la contrainte seuil, la probabilité de rupture diélectrique doit être calculée par un traitement statistique des données d'essai, comme cela est spécifié dans l'IEC 62539. Pour obtenir des résultats statistiquement valides,

- a) les spécimens d'essai d'un échantillon doivent être prélevés en suivant une procédure aléatoire à partir d'un lot important (provenant du même processus de fabrication);
- b) des spécimens d'épaisseur et de consistance uniformes doivent être soumis aux essais;
- c) des cellules d'essai ou des objets d'essai identiques doivent être utilisés pour chaque spécimen et la température et les conditions d'environnement doivent être les mêmes pendant chaque essai ou d'un essai à l'autre.

Dans de nombreux cas, la courbe VE pour les très faibles probabilités de rupture diélectrique est plus utile que la courbe VE moyenne ou médiane. Un traitement statistique des données d'essai est alors effectué pour calculer les durées avant une rupture diélectrique à de faibles probabilités, en utilisant généralement la distribution de Weibull, en plus du contrôle de la linéarité de la courbe.

La différence entre la valeur médiane ou moyenne arithmétique de la durée avant une rupture diélectrique et la durée avant une rupture diélectrique avec une faible probabilité de rupture diélectrique donnée est fonction de la dispersion des durées avant une rupture diélectrique inhérente au matériau en essai. En augmentant le nombre de spécimens, on peut obtenir des estimations plus précises de cette dispersion et donc de faibles durées avant une rupture diélectrique avec un niveau de confiance raisonnable.

Pour avoir une vue immédiate de la précision d'un essai, les limites de confiance pour chaque point déterminé de manière expérimentale sur la courbe VE doivent être consignées.

Un essai F est efficace pour contrôler si les données satisfont aux tolérances en termes d'écart de linéarité. Les données de durée de vie s'étendent généralement sur plusieurs décades dans le temps. Plus VEC est élevé, plus le nombre de décades exigées est important pour définir VEC avec précision.

6.4 Présentation des résultats

Pour avoir une évaluation complète de l'endurance à la tension d'un système ou d'un matériau isolant, la courbe VE (de préférence les courbes correspondant aux différents percentiles) doit être représentée avec les intervalles de confiance. Le graphe VE doit toujours accompagner le rapport d'essai qui doit contenir toutes les données nécessaires pour comprendre le graphe et sa fiabilité. Le rapport doit contenir les éléments suivants:

- identification unique du matériau;
- épaisseur et forme des spécimens;
- technique de préparation;
- conditionnement des spécimens (le cas échéant);
- forme et dimensions des électrodes;
- méthode d'essai et appareillage utilisé;
- vitesse de montée de la tension pour tout essai à contrainte progressive;
- fréquence de la tension d'essai;
- température d'essai;
- nombre de spécimens soumis aux essais à chaque tension d'essai;
- dispersion ou limites de confiance de chaque point tracé sur le graphe;
- toute autre information utile.

Si les résultats sont donnés en termes de VEC, les exigences de linéarité de la courbe doivent être satisfaites. Si la courbe ne satisfait pas à de telles exigences, les valeurs de n_d doivent être fournies avec les plages de contraintes correspondantes.

Le type d'analyse statistique utilisé doit également être spécifié et des graphes des durées avant une rupture doivent être fournis sur un papier de probabilité. Les conditions spéciales à satisfaire pour tout type particulier d'essai VE seront indiquées sur des documents spéciaux.

Annexe A (informative)

La distribution de Weibull

A.1 Distribution de Weibull pour les durées avant une rupture diélectrique

La distribution de Weibull à deux paramètres pour les durées avant une rupture diélectrique s'écrit généralement de la manière suivante:

$$P(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right], \quad (\text{A.1})$$

où

$P(t)$ est la probabilité de rupture diélectrique à l'instant t ;

β est le paramètre de forme;

α est le paramètre d'échelle, c'est-à-dire le temps correspondant à $P = 1 - 1/e = 0,632$.

En prenant deux fois les logarithmes, on obtient:

$$\ln \ln (1/(1 - P)) = \beta \ln (t/\alpha) \quad (\text{A.2})$$

ce qui, dans un système de coordonnées $\ln \ln (1/(1-P))$ en fonction de $\ln (t)$, représente une droite de pente β .

Le papier de Weibull est un papier de traçage spécial dont les échelles correspondent à ce système de coordonnées.

A.2 Distribution de Weibull pour les contraintes de rupture diélectrique

La distribution de Weibull pour les contraintes de rupture diélectrique avec une tension qui augmente linéairement peut s'écrire de la manière suivante:

$$P(E) = 1 - \exp (-mE^\gamma), \quad (\text{A.3})$$

où

γ est le paramètre de forme;

m est proportionnel au paramètre d'échelle et au rapport de dimensions, R (voir 5.4).

Sur le papier de Weibull, on obtient une droite de pente γ .

Si deux éléments de dimensions différentes sont soumis à deux contraintes E_1 et E_2 de sorte que leur probabilité de rupture diélectrique soit la même, P , alors:

$$1 - P = \exp (-m_1 E_1^\gamma) = \exp (-m_2 E_2^\gamma) = \exp (-Rm_1 E_2^\gamma) \quad (\text{A.4})$$

La relation (10) de 5.4 se déduit facilement de la Formule (A.4).

A.3 Distribution de Weibull généralisée pour les contraintes de rupture diélectrique

La distribution de Weibull généralisée pour les durées et les contraintes peut s'écrire de la manière suivante:

$$P(t, E) = 1 - \exp(-M t^\beta E^\gamma), \quad (\text{A.5})$$

qui devient la Formule (A.1) pour $E = \text{constante}$ et la Formule (A.3) pour $t = \text{constante}$. Pour une contrainte progressive ($E = \rho t$), le résultat est le suivant:

$$t^\beta E^\gamma = \rho^\gamma t^{(\beta+\gamma)} = \frac{E^{(\beta+\gamma)}}{\rho^\beta}. \quad (\text{A.6})$$

C'est pourquoi, dans un essai avec contrainte progressive, la pente de la courbe "probabilité en fonction de la contrainte" sur un papier de Weibull est donnée par $(\beta + \gamma)$ et non par γ .

Toutefois, γ est généralement bien plus grand que β . La différence peut donc être si faible qu'elle peut être négligée (γ est de l'ordre de 10 ou plus et β est compris entre environ 0,5 et 2).

A.4 Modèle de puissance inverse pour la durée avant une rupture diélectrique

Si les données obtenues avec différentes contraintes sont ajustées à la même distribution de Weibull (avec des paramètres de forme β et γ constants), alors l'équation d'une courbe avec une probabilité constante de rupture diélectrique, $\bar{P}$, est la suivante:

$$1 - \bar{P} = \exp(-M t_f^\beta E^\gamma), \quad (\text{A.7})$$

où t_f est la durée avant une rupture diélectrique avec la probabilité $\bar{P}$.

La relation suivante est dérivée de l'équation (A.7):

$$t_f^\beta E^\gamma = \text{constante},$$

et comme β et γ sont constants:

$$t_f = C / E^{\gamma/\beta}, \quad (\text{A.8})$$

qui est un modèle de puissance inverse pour la durée avant une rupture diélectrique, avec $n = \gamma/\beta$.

Par conséquent, la validité d'une distribution de Weibull (voir aussi l'IEC 61649) dans une plage donnée de contraintes prouve la validité du modèle de puissance inverse pour la durée avant une rupture diélectrique dans la même plage de contraintes, et réciproquement.

La constance de n dans une plage donnée de contraintes indique que le mécanisme de rupture diélectrique est le même pour toutes les contraintes appartenant à cette plage. Dans ce cas uniquement, on peut appliquer une contrainte progressive, et la formule de transformation:

$$t_p = t_c (n + 1) \quad (\text{A.9})$$

peut être utilisée.

Bibliographie

IEC 60243-1, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 1: Essais aux fréquences industrielles*

IEC 60243-2, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 2: Exigences complémentaires pour les essais à tension continue*

IEC 60243-3, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 3: Exigences complémentaires pour les essais aux ondes de choc de 1,2/50 μ s*

IEC 60343, *Méthodes d'essai recommandées pour la détermination de la résistance relative des matériaux isolants au claquage par les décharges superficielles*

IEC 61649, *Analyse de Weibull*

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