

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Rotating electrical machines –
Part 27-3: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation
of rotating electrical machines**

**Machines électriques tournantes –
Partie 27-3: Mesure du facteur de dissipation diélectrique sur le système
d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes**



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.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Rotating electrical machines –
Part 27-3: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding
insulation of rotating electrical machines**

**Machines électriques tournantes –
Partie 27-3: Mesure du facteur de dissipation diélectrique sur le système
d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.160

ISBN 978-2-8322-3061-9

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

CONTENTS

FOREWORD	4
INTRODUCTION	6
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Theory and measuring techniques	8
4.1 Dielectric dissipation factor measurement	8
4.2 Analogue Schering bridge	10
4.3 Transformer ratio arm bridge	11
4.4 Digital phase shift measurement	12
5 Test procedures	13
5.1 General	13
5.2 Winding bars and coils	15
5.2.1 Test object preparation	15
5.2.2 Guarding techniques	15
5.2.3 Measuring procedure	17
5.3 Complete windings	17
6 Test results	18
6.1 General	18
6.2 Winding bars and coils	19
6.3 Complete windings	20
7 Test report	21
7.1 General	21
7.2 New coils, bars and winding	21
7.3 Operational aged winding	22
Annex A (informative) Relationship between power factor and dissipation factor	24
Bibliography	26
Figure 1 – Parallel circuit and vector diagram	8
Figure 2 – Series circuit and vector diagram	9
Figure 3 – Dielectric losses with increasing voltage (schematic)	10
Figure 4 – High voltage Schering bridge – Basic circuit	11
Figure 5 – Transformer ratio arm bridge	12
Figure 6 – Schematic test set-up of a digital dissipation factor measuring system with principle current oscillogram	13
Figure 7 – Example of a curve of $\tan \delta$ versus voltage ratio U/U_N measured in voltage steps of $0,2 U_N$	14
Figure 8 – Arrangement with guard rings electrodes on test objects with insulation gap (example of preferred insulation gap and guard ring electrode dimensions)	16
Figure 9 – Application of guard ring electrodes on top of stress control coating	17
Figure A.1 – Phasor diagram	24
Table 1 – Maximum values of dielectric dissipation factor of single bars and coils in new condition with guard ring electrodes up to a rated voltage of $U_N = 21$ kV	19

Table A.1 – Comparison between correlating values of dielectric power factor $\cos \varphi$ and dielectric dissipation factor $\tan \delta$ and their difference25

.....

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 27-3: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines

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 60034-27-3 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This first edition cancels and replaces the first edition of IEC TR 60894 published in 1987. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) digital measurement of dissipation factor and capacitance included;
- b) limits for dissipation factor values given;
- c) detailed description of measuring techniques;
- d) extension of scope to complete windings.

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

FDIS	Report on voting
2/1803/FDIS	2/1804/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 60034 series, published under the general title *Rotating electrical machines*, can be found on the IEC website.

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

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

INTRODUCTION

This International Standard provides guidelines for dielectric dissipation factor measurements on form-wound stator bars or coils as well as for complete windings.

The dielectric dissipation factor is a measure of the dielectric losses in the stator winding insulation. Measurement of dielectric dissipation factor is an appropriate means of assessing the quality of new and also aged stator winding insulation of rotating electrical machines. Especially, the method is useful for assessing the uniform quality of manufacturing and the dielectric behaviour of the insulation as a whole. For aged stator windings, the dielectric dissipation factor provides information about insulation condition.

The dielectric dissipation factor measurements give no indication of the distribution of loss within the insulation and – in contrast to off-line partial discharge measurements – do not permit localization of weak points of the insulation system.

The main principle is to measure the dielectric dissipation factor over a range of voltages and to derive different characteristic dielectric loss parameters as basis for the evaluation.

Empirical limits verified in practice can be used as a basis for evaluating the quality of stator winding insulation systems in manufacturing. Furthermore, trend evaluation, e.g. diagnostic tests as part of the functional evaluation of insulation systems or in connection with servicing and overhaul of rotating machines, can also provide information on ageing processes, necessary further measures and intervals between overhauls. However, such trend evaluations cannot be used to predict the time to failure of a stator winding insulation.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 27-3: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines

1 Scope

This part of IEC 60034 provides guidelines for the test procedures and the interpretation of test results for dielectric dissipation factor measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines. These guidelines are valid for rotating electrical machines with conductive slot coatings operating at a rated voltage of 6 kV and higher.

This standard applies to individual form-wound stator bars and coils outside a core (uninstalled), individual stator bars and coils installed in a core and complete form-wound stator winding of machines in new or aged condition.

This International Standard applies to all kind of vacuum impregnated or resin-rich (fully-loaded) taped bars, coils and complete windings. It is not applicable to non-impregnated individual bars and coils or non-impregnated complete windings.

Requirements for the dielectric dissipation factor characteristics of individual form-wound stator bars and coils of machines with rating voltages from 6 kV and higher when tested with 50 Hz or 60 Hz alternating voltages are given.

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

IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

3 Terms and definitions

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

3.1

rated voltage

U_N

voltage or voltage range between lines at the terminals (also called line-to-line voltage) assigned, generally by a manufacturer, for a specified operating condition of a machine

3.2

dielectric dissipation factor

$\tan \delta$

tangent of the dielectric loss angle δ (complement of the insulation power factor angle) at pre-determined values of temperature, frequency, and voltage or dielectric stress

Note 1 to entry: Other terms sometimes used for this property are tan delta, loss tangent, dielectric loss factor or dielectric power factor. Between the dielectric dissipation factor and the power factor (the cosine of power factor

angle or the sine of the dielectric loss angle) a physical difference exists, but the two measurements are very nearly the same, when the dielectric dissipation factor is lower than 100×10^{-3} (see 4.1).

Note 2 to entry: Although the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ is expressed in absolute value in this standard, it is also expressed in percentage in other documents.

**3.3
delta tan delta**

$\Delta \tan \delta$

the difference in dielectric dissipation factor measured at two successive test voltages in steps of $0,2 U_N$ intervals

**3.4
tan delta tip-up**

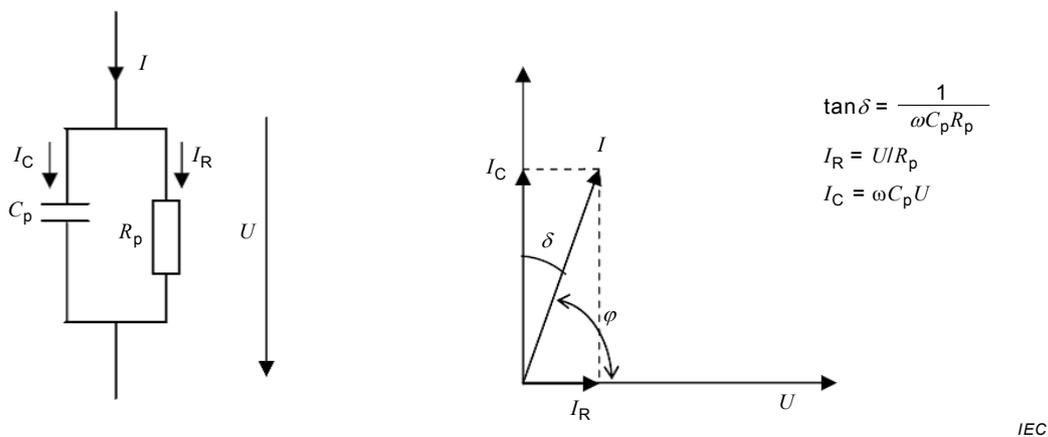
the difference in dielectric dissipation factor measured at the two voltages $0,6 U_N$ and $0,2 U_N$

Note 1 to entry: Dielectric dissipation factor differences with other voltage steps than mentioned in 3.3 and 3.4 may be used but the limits suggested in Table 1 will not be valid in that case.

4 Theory and measuring techniques

4.1 Dielectric dissipation factor measurement

As defined in 3.2, the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ is the tangent of the dielectric loss angle δ (complement of the insulation power factor angle φ) at a predetermined voltage U , frequency and temperature. The dielectric loss of the insulation system can be represented by either a parallel (C_p, R_p) or a series (R_s, C_s) equivalent circuit diagram of elements respectively (see Figure 1 and Figure 2).

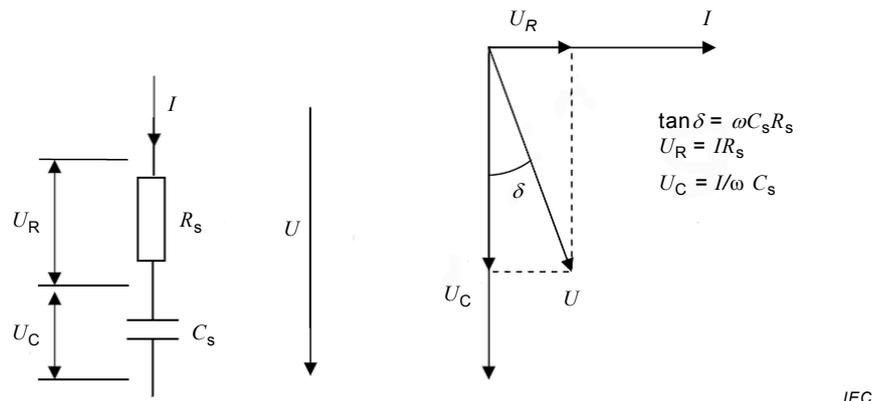


IEC

Key

- C_p parallel capacitance
- R_p parallel resistor
- ω $2\pi f$ angular frequency
- I_C current in capacitive path
- I_R current in resistive path
- U voltage at insulation system
- I total current through insulation system

Figure 1 – Parallel circuit and vector diagram

**Key**

- C_s series capacitance
- R_s series resistor
- U voltage at insulation system
- I total current through insulation system
- U_C voltage at capacitance
- U_R voltage at resistor

Figure 2 – Series circuit and vector diagram

Comparison of the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ and the sometimes otherwise used insulation power factor $\cos \varphi$ show that these values are very nearly the same, if the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ is less than 100×10^{-3} , which may be presumed for all modern stator winding insulation systems.

NOTE The preferred and exclusive used loss characteristic in this standard is the dielectric dissipation factor $\tan \delta$. But in order to make possible a comparison between insulation power factor $\cos \varphi$ and dielectric dissipation factor $\tan \delta$ values, a table is given in Annex A.

As shown in Figure 1, the vector of insulation current I can be divided in two perpendicular components, which represent a capacitive current I_C (90° leading to voltage U) and a resistive current I_R (in phase with voltage U). The phase shift angle δ is caused by a resistive component in addition to the capacitive component of the insulation. The dielectric dissipation factor $\tan \delta$ can be expressed in the following equation:

$$\tan \delta = \omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

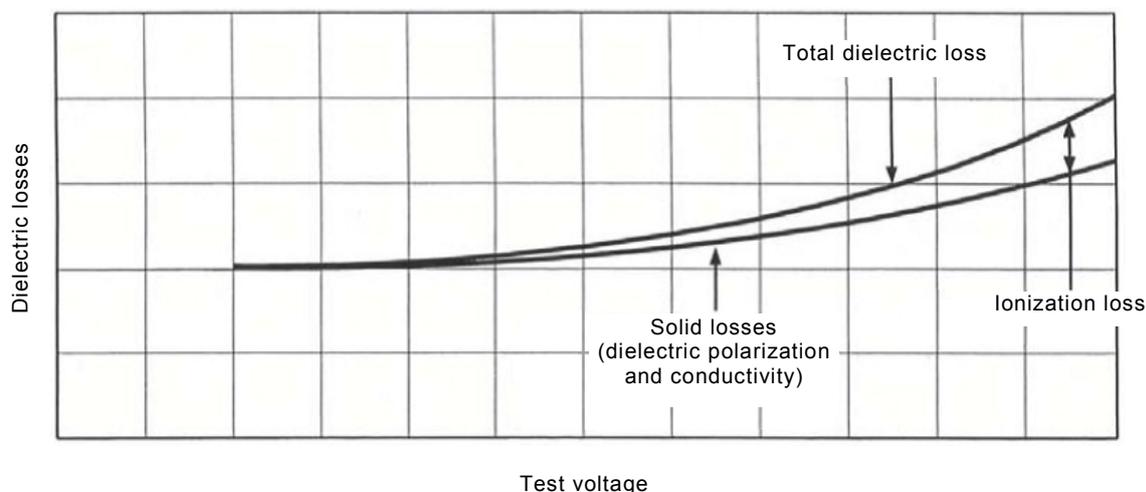
The capacitive component C_s or C_p represents the lossless capacitance of the tested insulation while the resistive component R_s or R_p summarizes the different kind of losses. The loss characteristics under consideration are those mainly relating to the main ground-wall insulation between the conductor structure (including inner conductor shield, if such exists), the conductive slot coating and the earthed enclosure. In the case of measurements on single stator bars or coils, only that part of the insulation which is dielectrically in series with the ground-wall insulation enters into the measurement result because guard ring electrodes can be used. In the case of dissipation factor measurements on complete windings, the action of the stress control coating and ambient surface condition have to be considered. These influencing factors may be important when comparing test results from different measurements.

Dielectric dissipation factor measurement at voltages below the inception of partial discharges represents the magnitude of dielectric losses in the solid insulation (dielectric absorption and conductive losses) and the conditions of electrical contact to the earthed measuring electrode. The dielectric dissipation factor component arising from the dielectric losses generally chang-

es very little with voltage, but a significantly higher than normal loss measured indicates some difference in the structure of the insulation, such as may arise from incorrect resin composition or inadequate cure.

When the test voltage is raised two different types of dielectric losses increase (see Figure 3):

- dielectric losses of the solid insulation material (polarization, conductivity);
- partial discharges within gaseous inclusions (voids) in the insulation structure cause an increase in dielectric dissipation factor and increasingly larger number of voids begin to undergo discharge with rising applied voltage. The value of dielectric loss and therefore the value of $\tan \delta$ will continue to increase.

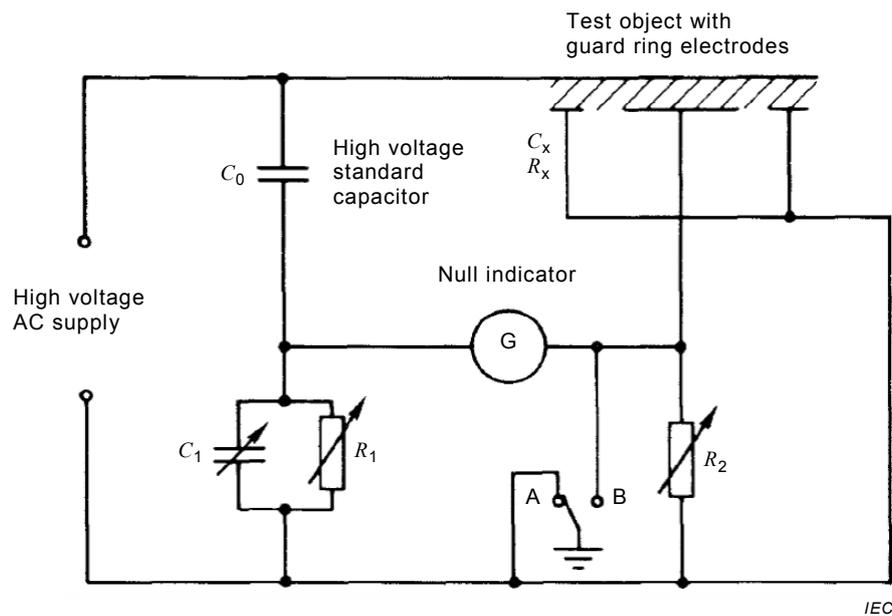


IEC

Figure 3 – Dielectric losses with increasing voltage (schematic)

4.2 Analogue Schering bridge

Measurement is carried out by means of the analogue Schering bridge or an equivalent type of bridge like a transformer ratio arm bridge (see 4.3) or by means of modern digital measurement facilities (see 4.4). A variable amplitude alternating voltage supply is used, having sufficient rating to provide the measured voltage across the capacitance of the test object and complying with the requirements of IEC 60060-2. Figure 4 shows the basic circuit diagram for a high voltage Schering bridge, when measuring a stator winding bar or coil with an assumed lossless capacitance C_x and resistive losses of R_x , using a test circuit with guard ring electrodes. The high voltage branch of the bridge includes the high voltage standard capacitor (C_0) with very low dielectric losses. The Schering bridge instrument itself consists of the low voltage branches with variable sets of resistive (R_1 and R_2) and capacitive (C_1) decades of high precision. The balanced condition of the bridge, which is a necessary requirement for correct measurement, is monitored by a sensitive “Null indicator” (see Figure 4).

**Key**

Positions of earthing switch:	A for testing coils or bars not earthed
	B for testing windings in earthed condition
C_0 Capacitance of standard capacitor	C_x Capacitance of test object
C_1 Variable capacitance of balancing branch 1	R_2 Variable resistance of balancing branch 2
R_1 Variable resistance of balancing branch 1	R_x Resistance of test object

Figure 4 – High voltage Schering bridge – Basic circuit

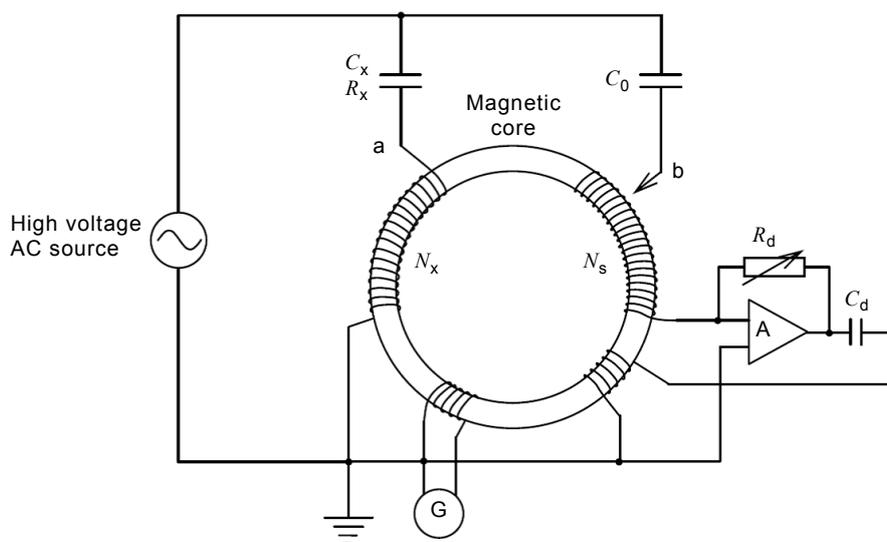
The analogue Schering bridge is very sensitive to disturbances produced by stray capacitance to earth potential. Therefore it is recommended to use double screened coaxial measuring cables with an active screen potential compensator, i.e. Wagner earth circuit.

Today, most analogue bridges like high voltage Schering bridge use an automated balancing procedure for that part of the bridge equipment which includes the low voltage branches with the variable bridge elements C_1 , R_1 and R_2 .

A high-voltage standard capacitor is used as a reference standard C_0 in the bridge circuit. The nominal value of the capacitance is typically 100 pF or 1 000 pF within a tolerance less than 5 % in long term behaviour. The dielectric dissipation factor of this standard capacitor should be less than $0,01 \times 10^{-3}$ up to the maximum test voltage.

4.3 Transformer ratio arm bridge

Another typical example of the analogue bridge is the transformer ratio arm bridge. The bridge is automated by applying a current comparator consisting of operational amplifiers and transformers. An example circuit is shown in Figure 5. Windings under the standard capacitor C_0 and the capacitance of test object C_x are wound in the reverse direction with each other around a magnetic core of high permeability. When the bridge is balanced by adjusting turn number N_s and adjustable resistor R_d , the flux or magnetomotive force in the magnetic core becomes zero. Then the potential of the points a and b is developed by the voltage drop across very small DC resistances of windings N_x and N_s and becomes virtually zero. This method eliminates influence of stray capacitances to the ground. Therefore this bridge method does not require the Wagner earth circuit which the Schering bridge requires.



IEC

Key

- C_x capacitance of test object
- R_x insulation resistance of test object
- C_0 standard capacitor
- N_x number of turns of coil in test object branch
- N_s number of turns of coil in reference branch
- R_d adjustable resistance for balancing the bridge
- C_d adjustable capacitance for balancing the bridge
- G instrument to check balanced condition of the bridge
- A amplifier

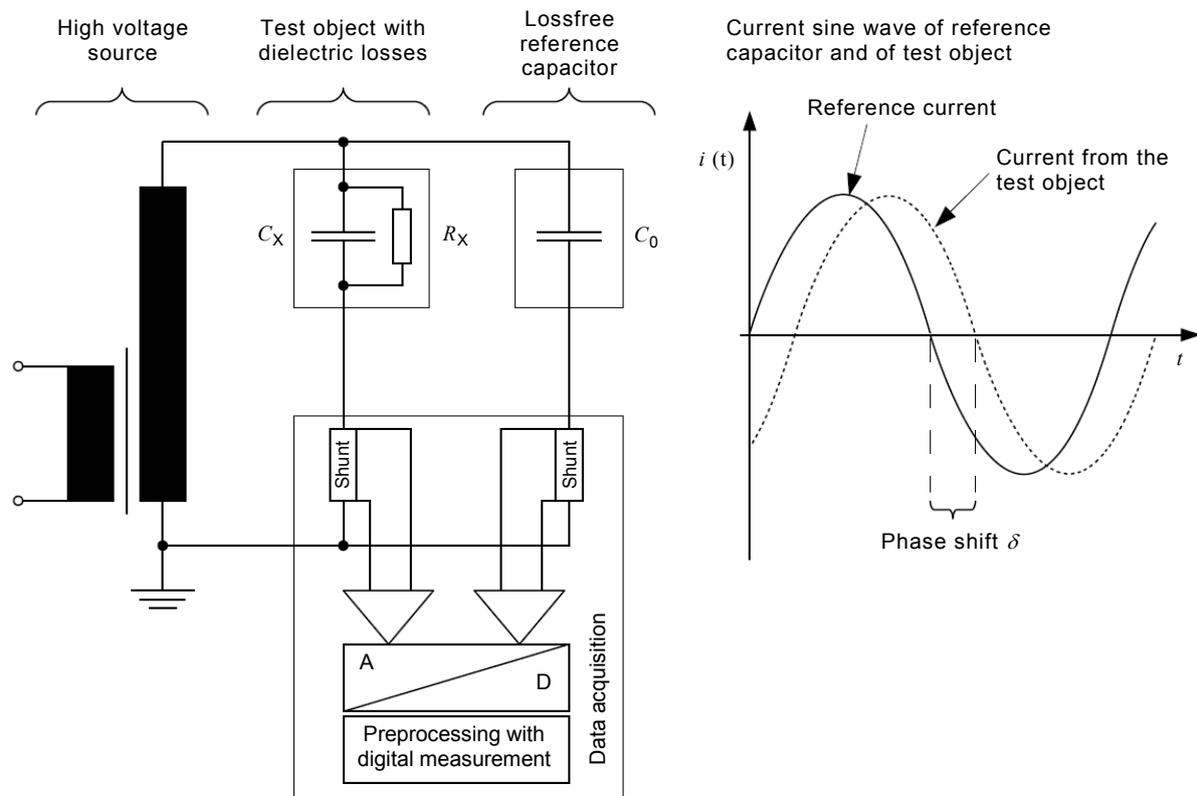
Figure 5 – Transformer ratio arm bridge

4.4 Digital phase shift measurement

The development of digital electronics, particularly high resolution AD-converter and filter devices, resulted in digital dissipation factor and capacitance measuring systems which are completely computer controlled. One example of a test set-up with the high voltage circuit consisting of the test object (C_x, R_x) path and the reference path with standard capacitor C_0 and the electronic measuring equipment on the low voltage side is shown in Figure 6. The measuring principle is based on precise recording of the currents through the standard capacitor (reference) and the test object path with the high voltage as a reference marker. The dielectric dissipation factor is calculated from these currents, or by measurement of the phase difference between these currents. High sensitivity digital equipment for dissipation factor measurement can be characterised by the following parts:

- simultaneous measurement of sinusoidal wave current and voltage in both high voltage paths with high amplitude and time precision;
- suppression of harmonics and external noise at current and voltage sine-wave with digital filtering in time or frequency domain;
- sensitive and reliable measurement of current phase shift between reference path and test object path;
- calculation of dissipation factor $\tan \delta$ and capacitance C_x based on phase shift and amplitude information extracted from digital current measurement;

- display actual $\tan \delta$ and C_x values of stator winding insulation in correlation to the applied test voltage during computer controlled test procedure.



IEC

Key

C_0 capacitance of high precision standard capacitor without losses

C_x, R_x insulation capacitance and resistance of bars or coils with dielectric losses

Figure 6 – Schematic test set-up of a digital dissipation factor measuring system with principle current oscillogram

If the measurement system uses high voltage insulated tools like e.g. fibre optic data links between measuring units and the control computer it can easily perform dissipation factor measurements on permanently earthed test objects like rotating machines in the field. Because the fibre optic cables act as a HV insulator, the battery powered measuring devices may be placed on high potential leads instead of low voltage connections to earth.

5 Test procedures

5.1 General

The dielectric dissipation factor test is applicable to stator winding components (bars or coils) in which the insulation is cured. This test is usable for single vacuum pressure impregnated or resin-rich (fully-loaded) bars, coils and complete windings including global vacuum pressure impregnation (VPI) technology. The test is not applicable to non-impregnated individual bars and coils or non-impregnated complete windings.

Dissipation factor measurement should be performed with AC line frequency voltage of sinusoidal wave shape and a low amount of harmonics according to IEC 60060-1.

The dielectric dissipation factor is usually measured over a specific range of voltage U/U_N starting at $0,2 U_N$ and ending at rated voltage of $1,0 U_N$. Values of $\tan \delta$ may be obtained in succeeding intervals like $0,2 U_N$. The diagram in Figure 7 gives an example of a stepped measuring procedure. As defined in 3.3, delta tan delta ($\Delta \tan \delta$) refers to the difference in dielectric dissipation factor measured between two specified voltages (see Figure 7). Voltage steps other than $0,2 U_N$ may also be used according to agreement between manufacturer and client.

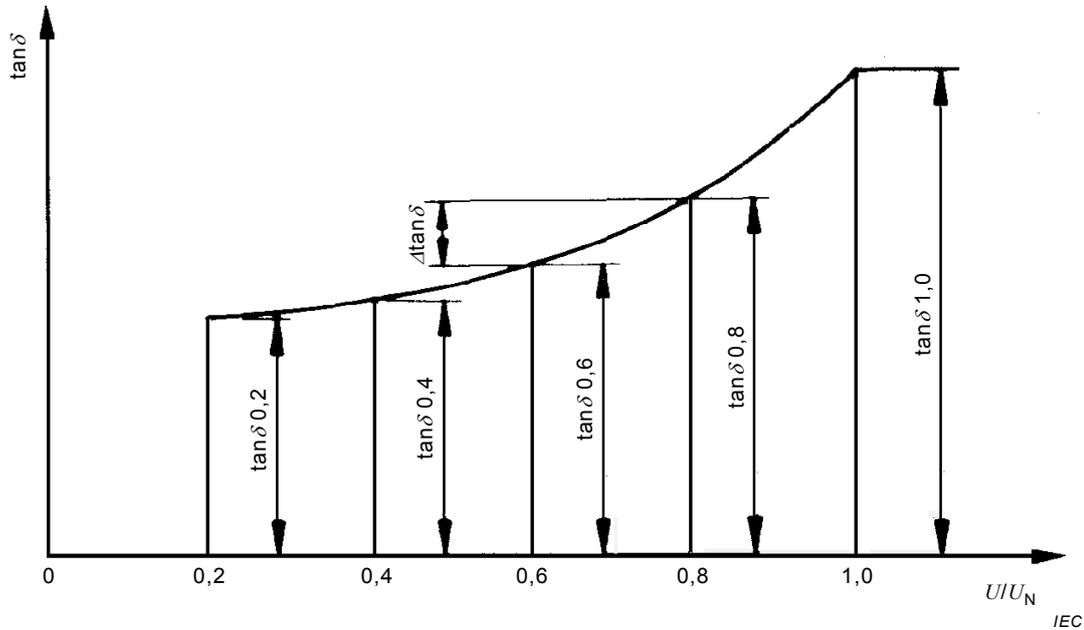


Figure 7 – Example of a curve of $\tan \delta$ versus voltage ratio U/U_N measured in voltage steps of $0,2 U_N$

The dielectric dissipation factor $\tan \delta$ is measured on stator bars/coils or complete windings. For coils, each coil side is to be measured separately and all results are recorded. The following information is obtained:

- dielectric dissipation factor at low voltage of $0,2 U_N$ ($\tan \delta_{0,2}$);
- delta tan delta for each voltage interval to identify the maximum value of dielectric dissipation factor increase ($\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$);
- characteristic tan delta tip-up as a difference between the two predefined voltage steps of $0,6 U_N$ and $0,2 U_N$ ($\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}$);
- shape of the curve of dielectric dissipation factor $\tan \delta$ versus test voltage U/U_N (Figure 7).

It is recommended that the voltage is increased step by step according to the agreed intervals like $0,2 U_N$. At each step the voltage has to be held unchanged until stabilized $\tan \delta$ values can be taken. Unstable readings may be caused by measuring system problems and should be investigated further.

If an automatic measuring system with continuously increased voltage is used, it shall also stop at the given voltage steps for a sufficient period to ensure stable measuring values or it shall provide an appropriate slow voltage increase to obtain reliable readings.

All dielectric dissipation factor measurements should be performed at ambient temperature and air atmosphere because under these ambient test conditions the most reproducible information about the condition of the insulation system can be achieved.

The dielectric dissipation factor versus voltage characteristic is affected to some extent by the temperature of the test object insulation. Stator winding temperature shall be uniform and close to ambient temperature (it may be checked by means of stator winding RTDs). The temperature of the main insulation, the ambient air temperature and the relative humidity shall be recorded.

NOTE The stray-capacitance of the test object to earth can influence the results of measurements.. The operating instructions of the instrument usually describes how this stray capacitance to be handled in order to minimize the negative impact.

5.2 Winding bars and coils

5.2.1 Test object preparation

The dielectric dissipation factor test is mainly used as a quality control test on newly manufactured bars and coils. It is an important method to prove the main insulation quality and to determine the consistency of the manufacturing process.

The test results are affected by the electrodes used to simulate the slot. To compare results between individual bars or coils, or groups of bars or coils, identical electrode systems shall be used.

In order to use the conductive slot coating as measuring electrode, it is not sufficient to contact it at a few single points because the contact resistance to the conductive slot coating would be much higher than in the slot. This high resistance would lead to unrealistic high dielectric dissipation factor measurements. Therefore, it is necessary to contact the conductive slot coating with metal plates, wrapped metal foil or spiralled wires along the entire length. Great care should be taken to minimize voids between the metal electrode and the conductive slot coating surface.

The use of guard electrodes is necessary to prevent erroneous surface effects at the end of the conductive slot coating on the dielectric dissipation factor readings (see Figures 8 and 9). All strands shall be electrically connected to avoid breakdown of the insulation of individual strands. The bar or coil to be tested should be suitably insulated from earth.

5.2.2 Guarding techniques

5.2.2.1 General

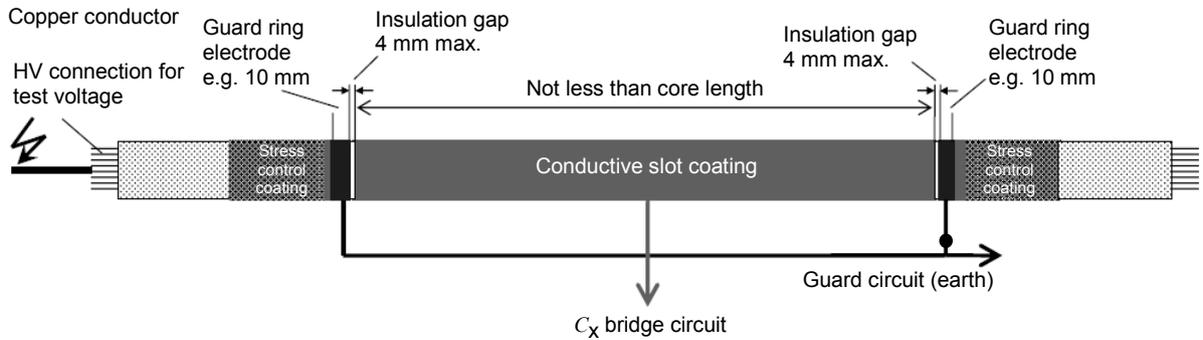
Various techniques of using guard electrodes are available to minimize measuring errors caused by additional currents starting from the end of the conductive slot coating to the high voltage side. A grounded guard ring electrode placed near the ends of the conductive slot coating (varnish or tape) should be used in order to minimise the influence of these additional currents on the dielectric dissipation factor measurement. The type of guard electrode (metal foil or conductive paint) that would be the most suitable depends on the manufacturing process of the bars or coils.

Depending on bar design, the conductive slot coating area may cover only the straight part of the bar or may also include the bends and part of the involutes of the bar.

5.2.2.2 Guard ring electrodes with insulation gap

For the dielectric dissipation factor measurement, different options of conductive slot coating and stress control may be used. Temporary grading tapes or capacitive grading electrodes can be applied in electrical contact to the conductive slot coating. Alternatively, grading varnish could be painted to obtain stress control. A small temporary gap (max. 4,0 mm) has to be created in the conductive slot coating about 10 mm from each end of the visible beginning of the end winding stress control coating. It shall be noted that the insulation gap width will have some influence on the measured dielectric dissipation factor values due to electric field enhancement and possible surface discharge activity at a broader insulation gap.

A guard ring electrode has to be applied adjacent to the insulation gap on top of the short remainder of conductive slot coating. The recommended material for the guard ring electrodes is a metal foil with conductive adhesive. However, any material demonstrated to be effective for the guard ring electrodes may be used. The guard ring electrode has to be applied adjacent to the small temporary insulation gap and shall not overlap the beginning of stress control coating as shown in Figure 8. The width of the metal guard ring electrode should be broad enough to insure low contact current density.



IEC

Figure 8 – Arrangement with guard rings electrodes on test objects with insulation gap (example of preferred insulation gap and guard ring electrode dimensions)

After dielectric dissipation factor measurement has been completed, the guarding insulation gap has to be carefully repainted with conductive slot coating varnish to avoid any inhomogeneity in the conductive slot coating system. Repainting the gap will require adequate cure time before additional testing of the test object may be performed.

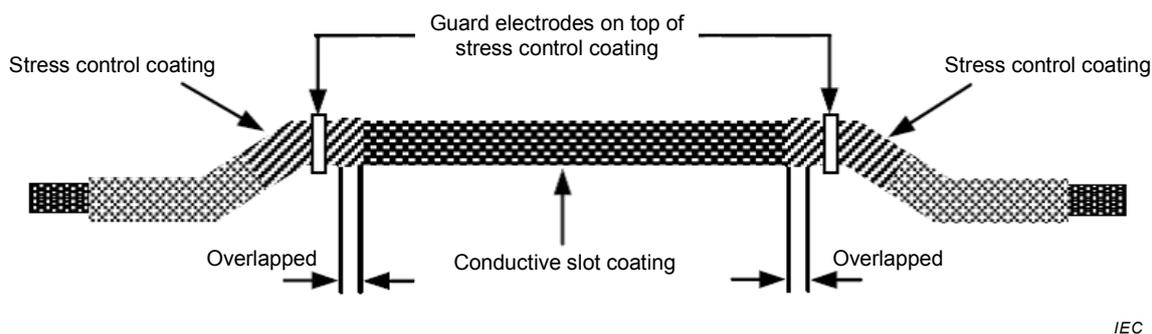
If a painted conductive slot coating and a painted stress control coating are used on the main insulation, the guard ring electrodes can be provided together with the painting procedure for the conductive slot coating.

The guard technique with an insulation gap can also be used together with taped slot and stress control coatings. If not well controlled, the cutting the insulation gap could affect the main insulation and therefore should not be the preferred method for production coils and bars.

Also, temporary grading tapes or capacitive grading electrodes could be used before the final stress grading system is applied. In this case, the same insulation gap and guard ring arrangement as described above should be used.

5.2.2.3 Guard ring electrodes on top of stress control coating

For new test objects with taped conductive slot coating and stress control coating, the application of guard ring electrodes as illustrated in Figure 9 should be used. It can also be used for painted conductive slot coating and stress control coating.



IEC

Figure 9 – Application of guard ring electrodes on top of stress control coating

The guard ring electrode has to be fixed on top of the stress control layer near the overlapped part of the conductive slot coating and the stress control coating. Locating the physical end of the conductive slot coating can be difficult if it is overlapped with the stress control coating. Nevertheless, the beginning of the guard ring electrode should be positioned as near as possible to the end of the overlapped part of grading system, but without covering this overlapped part. This procedure is normally used on production bars and coils since it is known at that time where the exact overlap of these two coatings is located.

This configuration will only have a minor effect on the dielectric dissipation factor results if the guard ring electrode is implemented properly. The implementation depends on the electrical properties of the stress control coating, the possible presence of an insulating sleeve, covering the overlapping area and the contact resistance between guard ring electrode and the surface of the stress control layer.

This simplified guarding method may be useful in routine production testing when each test object needs to be measured individually.

5.2.3 Measuring procedure

To ensure a homogeneous production process quality, it is recommended to test such a sample size which is necessary for a statistically significant evaluation of the characteristic data of all bars or coils.

Dielectric dissipation factor measurement results may be affected during application of a test voltage. Therefore, some form of conditioning is recommended to stabilize partial discharge activity and dielectric losses, which influence the dielectric dissipation factor measurement. It is recommended to energize the bars or coils with high voltage for a consistent time (see IEC TS 60034-27). The high voltage test, which is a quality check of all new bars or coils, could be used for conditioning purpose.

Dielectric dissipation factor and capacitance values shall be recorded with stepwise increase of voltage according to Figure 7 and description in 5.1. The test results of each test object shall be recorded for reporting and possible statistical evaluation.

5.3 Complete windings

A dielectric dissipation factor measurement can be performed on the complete stator winding before as well as after assembly of the complete machine. Before assembly, the stator winding is specifically addressed, while e.g. bushings and other components may influence the measurement results after assembly. Dielectric dissipation factor measurements of complete windings in conjunction with other diagnostic methods are a useful tool for condition assessment of rotating electrical machines. Testing the new stator winding insulation provides the reference point for trending of ageing condition of the insulation system. A variation in dielectric dissipation factor values over a period of time may be an indication of a change in the

condition of the main insulation, conductive slot coating, stress control coating, end windings, or slot support systems.

The test method and the test equipment differ from that when testing individual bars or coils. Contrary to the test method for individual bars or coils, guarding techniques are not practicable for complete windings. Therefore, the comparison of the results with those of tests on individual bar or coils should take account of the fact that results from the complete winding will be considerably influenced by the nonlinear resistance of the stress grading coatings relative to the length of the slot portion. In the case of measurement of an individual phase, the other phases should be connected to the stator frame.

Maximum information about end windings and slot portion condition may be obtained by measuring the dielectric dissipation factor on each individual phase winding and the complete winding (all phases together) up to the rated voltage U_N for new machines.

In the case of on-site measurements on machines with an external neutral connection, only the individual phases may be measured to reduce the capacity requirement of the high voltage power supply.

Stator core and frame of complete machines are solidly grounded. When performing the dielectric dissipation factor measurement with an analogue Schering bridge an auxiliary pass adapter is needed to avoid operating the Schering bridge ungrounded. According to safety rules, handling an ungrounded instrument requires specially trained and experienced personnel. Digital equipment with long fibre optic connections between measuring device and control unit make it possible to connect the measuring box at the high voltage terminal of the tested phase to mitigate safety risks.

On grounded windings, different stray capacitances may influence the measurement. Nevertheless, because of the high phase winding capacitance, in most cases, these stray capacitances will not affect the readings significantly.

Dielectric dissipation factor measurement on large direct water cooled windings may be influenced by the resistance of water flow to ground potential. When the water conductivity and the dimensions of the insulation hoses are known, the water losses may be calculated and the measured dielectric dissipation factor corrected. Otherwise, the stator winding has to be drained and vacuum dried before starting the measurement.

In addition to the well-established type test of complete phase windings, a random sample test for global VPI-insulation systems may be agreed. A minimum of four coil-sides or two bars are manufactured as for the production machine, at the same time and under the same conditions as the production winding and accommodated in slot models.

The rating of the high voltage power supply shall be adequate to the capacity of the complete stator winding and has to be in accordance with IEC 60060-1 and IEC 60060-2 on high voltage test techniques.

6 Test results

6.1 General

From the dielectric dissipation factor measurements the following characteristic properties of the insulation system may be assessed:

- the value of dielectric dissipation factor $\tan \delta_{0,2}$ at low voltage ($0,2 U_N$) indicates the cure state of the insulation system and depends on the type and the different components of the electrical insulation system;
- the magnitude of $\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$ as a function of voltage gives some indication of the void content and delamination of the insulation system and depends on sev-

eral additional influences e.g. imperfect impregnation, cure state, inadequate electrical bonding between the test object and measurement electrode, contamination and humidity of the test object surface, the type and condition of the stress control coating and ageing condition for in-service measurements.

6.2 Winding bars and coils

The number of test objects from a production run can vary from all bars or coils to one or two bars (two or four coil sides) of a winding. The important criterion is to select a sample size that ensures the determination of whether the production process is under control. It is important to select enough samples to ensure that a statistically significant sampling has been made (see 5.2.3).

The maximum dielectric dissipation factor values of new single bars and coils up to a rated voltage of $U_N = 21$ kV measured at room temperature are given in Table 1.

To use Table 1, the accuracy of the characteristic values has to be computed according to the instrument specifications. These values refer to measurements made with the test objects guarded. This will provide a spread in the characteristic of the computed values. The maximum value of the spread shall be below the requirement limits.

For rated voltages above 21 kV, the values should be determined by special agreement.

Table 1 – Maximum values of dielectric dissipation factor of single bars and coils in new condition with guard ring electrodes up to a rated voltage of $U_N = 21$ kV

Characteristic values measured at room temperature		
1	initial value of tan delta at $0,2U_N - \tan \delta_{0,2}$	20×10^{-3}
2	delta tan delta per $0,2U_N$ up to $U_N - \Delta \tan \delta / 0,2U_N$	5×10^{-3}
3	tan delta tip-up between $0,6U_N$ and $0,2U_N - (\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2})$	5×10^{-3}

The values in Table 1 are also valid for global VPI test objects, according to 5.3, impregnated in slot simulations.

In addition to the data-spreadsheet of test results a diagram showing the dielectric dissipation factor versus voltage curve would be useful to aid interpretation of test results. The following conclusions can be derived from typical data of new bars or coils.

- 1) Too high a contact resistance of the applied measuring electrode can affect the $\tan \delta$ results by showing a higher than true value at low voltage followed by reducing values (negative dielectric dissipation factor tip-up) over the first voltage intervals. In such a case, with increasing voltage additional contact points will ignite which decrease the contact resistance.
- 2) Negative dielectric dissipation factor tip-up can also occur with some type of bar and coil designs that use an inner conductor shield, if the contact resistance between the inner conductor shield and the copper strands decreases with increasing voltage.
- 3) If the insulation is not well cured, the initial value of dielectric dissipation factor $\tan \delta_{0,2}$ would be higher due to larger polarization losses of the polymer.
- 4) The capacitance value of the bar or coil tested is a measure for correct impregnation and curing of main insulation. The capacitance $C_{0,2}$ at low voltage of $0,2 U_N$ may be used to calculate the relative dielectric permittivity of the insulation system by using the geometric design values of the bar or coil.
- 5) A smooth increase of dielectric dissipation factor versus test voltage is unavoidable even on high quality VPI produced bars/coils because mica-insulation will always include some micro-delamination inside the small anisotropic mica particles. However, if part of the insulation is not fully impregnated, it will be characterized by a significant increase of dielectric dissipation factor tip-up.

For aged bars and coils which were dielectric dissipation factor tested after they were removed from a stator with years of operation, the following interpretation of test results may be made.

- 1) A steep increase of dielectric dissipation factor starting far below phase-to-ground voltage is a sign of severe delamination between conductor and insulation or delamination between insulation layers inside the main insulation due to high operational stresses or over-bending during extraction procedure.
- 2) The variation of capacitance $\Delta C / 0,2 U_N$ with increasing voltage together with dielectric dissipation factor increase values $\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$ are sensitive measures for void content and delamination of main insulation.
- 3) In case of older electrical insulation systems e. g. based on asphalt or shellac, long term thermal aging could affect the organic material of the insulation system. This could increase the initial dielectric dissipation factor value $\tan \delta_{0,2}$.
- 4) If a decision is needed on which bars of a removed winding should be re-used, a Gaussian probability distribution plot of $\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$ values of all bars could help to distinguish between good and bad condition of main insulation.
- 5) If the old bars are measured with guard electrodes on the surface of the taped stress control coating, the possible influence of contamination at the end windings has to be taken into account.

6.3 Complete windings

Each new complete stator winding should be subject to dielectric dissipation factor measurements to control the quality of manufacture. The test results are strongly affected by the end-winding stress control coating. Therefore no limits are provided.

Further, aged complete stator windings may be subject to dielectric dissipation factor measurements during maintenance outages of the machine in order to assess the insulation condition. Again, the ambient conditions and surface conditions of the stress control coating will influence the measurements, so no absolute limits can be imposed. However, trending these data over time may provide a means of condition assessment. A change in the dielectric dissipation factor during the service life may be the result of deterioration processes. If a consistent trend towards increasing dielectric dissipation factor is observed then a visual inspection of the machine as well as the performance of other diagnostic tests may be appropriate. At service aged windings reduced test voltage down to 0,6 rated voltage could be agreed between both parties.

A combination of electrical, thermal, mechanical, and environmental factors can affect the insulation system.

These stresses may result in:

- delamination between layers of the insulation;
- delamination between a layer of the insulation and the conductor;
- abrasion at the outer surface of the insulation;
- on old insulation systems circumferential cracking, most likely in the extension of the straight part;
- contamination of the endwindings of the machine due to, for example, corona (in air-cooled machines), deposition of oil and dust, etc.

The measured dielectric dissipation factor on a complete winding represents the average value over the entire sample. For this reason, this test does not necessarily respond to only the most severely deteriorated part of the winding. That is, the test cannot determine whether a high dielectric dissipation factor value is due to a large number of coils/bars in the phase individually containing a low number of small voids, or due to a severely deteriorated single coil or bar. The latter case is potentially more severe from the perspective of winding longevity. In

such a case where high values of power factor or tip-up are recorded, further division of the winding into individual parallels or coil groups may be necessary to ascertain the extent of any damage. Such sub-division may not be practical. Alternatively, off-line and on-line partial discharge measurements in accordance with applicable IEC standards, may be performed.

An important point to note when performing dielectric dissipation factor measurements on complete windings is the grounding configuration (see 5.3). While some measuring instruments are capable of working with grounded test objects, this may not always be the case. If the instrument is not designed to make measurements on grounded test objects, then the core or frame ground of the winding has to be disconnected from ground. While this action may be possible in factories and repair facilities generally, such a disconnection is not possible on installed machines. Consequently, the power supply and measuring instrument are operated ungrounded.

NOTE Due to safety concerns, in the case of grounded test objects and if ungrounded measuring instruments are used, it is desirable that individuals with appropriate training and experience perform these measurements.

Connected equipment, e.g. cables, bus-ducts, instrument transformers, etc., shall be disconnected from the winding to prevent disturbing influences. Furthermore, rotor, bearings, slot RTDs, instrument screening, etc. have to be securely connected to the frame to have the same potential during test (ground potential in the case of grounded object, frame floating potential in the case of an ungrounded object).

On hydrogen cooled generators it is recommended to perform the dielectric dissipation factor measurement under normal air atmosphere to derive trending information about the ageing condition of the insulation system such as delamination. Measurements under operational hydrogen pressure would suppress partial discharge activity in voids.

The measuring principle of the dielectric dissipation factor test is not effective in detecting individual weak points of the winding and therefore not intended for such application. However off-line and on-line partial discharge measurements according to IEC TS 60034-27 and IEC TS 60034-27-2 could identify partial discharges at local weak points of the insulation in an early stage.

7 Test report

7.1 General

The test report should contain all data necessary for quality analysis of the insulation system of a new winding and for future trend analysis of operational aging of stator winding insulation.

In the case of individual coils/bars each test object shall have the same nomenclature in the test sheet as marked on the object itself. The three characteristic values given in Table 1 should be recorded by appropriate means for future reference.

7.2 New coils, bars and winding

For new machines, dielectric dissipation factor measurement is part of the total quality testing procedure, which is documented in detail. Therefore the measurement results of dielectric dissipation factor testing of individual bars or coils and complete winding should be listed in the documentation of the machine. The following information should be provided in the test report:

Machine data

- manufacturer/name of project
- type and serial number

- year of manufacture
- rated voltage
- rated current
- rated output
- rated power factor
- rated frequency
- thermal insulation class/maximum permitted winding temperature
- type of insulation system
- stator cooling system/cooling media
 - indirect cooled: air/hydrogen
 - direct cooled: air/hydrogen/water

Test condition and equipment

- name and number of test specification describing the test procedure
- drawing of test circuit used
- test equipment
- accuracy of test equipment
- organisation responsible for testing and quality assurance
- location and date of testing
- ambient temperature
- relative humidity
- ambient air pressure
- test frequency
- for complete stator windings: winding temperature, coolant water conductivity
- names of test specialist and counter signer
- for single bars and coils: kind of guarding technique

Measurement results

- table of dielectric dissipation factor and capacitance values at different voltage steps
- table of characteristic values $\tan \delta_{0,2}$, $\Delta \tan \delta / 0,2U_N$, $\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}$, $C_{0,2}$
- graph of dielectric dissipation factor versus voltage

7.3 Operational aged winding

When measuring an aged stator winding insulation, during a maintenance outage on site, a special test report shall be prepared containing the following:

Owner's data

- owner/user
- name of plant/location
- unit

Machine data

- manufacturer/name of project
- type and serial number

- year of manufacture
- original winding/date of rewind
- rated voltage
- rated current
- rated output
- rated power factor
- rated frequency
- insulation class/maximum permitted winding temperature
- insulation system
- stator cooling system/cooling media
 - indirect cooled: air/hydrogen
 - direct cooled: air/hydrogen / water

Operational data (if available)

- operation mode (continuous/intermittent)
- inverter driven
- total and/or equivalent operating hours to date
- total number of starts to date, if available categorized in hot, warm and cold starts
- number of sudden trips to date
- maximum stator winding temperature and conditions
- average stator winding temperature
- important events that stressed the machine up to date

Test condition and equipment

- name and reference number of test specification describing the test procedure
- drawing of test circuit used
- test equipment
- accuracy of test equipment
- organisation responsible for testing and quality assurance
- location and date of testing
- test frequency
- ambient temperature
- relative humidity
- ambient air pressure
- winding temperature,
- coolant water conductivity,
- names of test specialist and counter signer
- for single bars and coils: kind of guarding technique

Measurement results

- table of dielectric dissipation factor and capacitance values at different voltage steps
- table of characteristic values $\tan \delta_{0,2}$, $\Delta \tan \delta_{0,2} U_N$, $\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}$, $C_{0,2}$
- graph of dielectric dissipation factor versus voltage

Annex A
(informative)

Relationship between power factor and dissipation factor

As stated in 4.1, the preferred and exclusively used loss characteristic in this International Standard is the dielectric dissipation factor $\tan \delta$, which is defined as the ratio between the current I_R in phase with applied voltage U and the current in quadrature I_C , as shown in the phasor diagram in Figure A.1. This ratio is given in Equation (A.1).

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \tag{A.1}$$

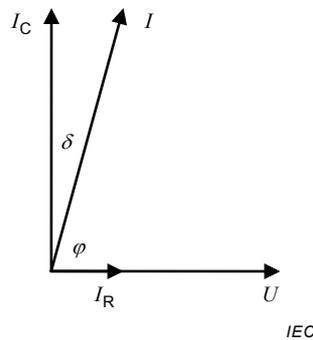


Figure A.1 – Phasor diagram

Another parameter, commonly used in North America, in insulation diagnostics is the dielectric power factor (PF). The power factor is defined as the ratio between the current in phase with applied voltage I_R and the total current I (see Equation A.2).

$$PF = \frac{I_R}{I} \tag{A.2}$$

The relation between the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ and power factor PF is shown in Equation (A.3).

$$PF = \frac{\tan \delta}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta}} \tag{A.3}$$

Comparison of the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ and the sometimes otherwise used insulation power factor $\cos \varphi$ show that these values are very nearly the same, if the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ is less than 100×10^{-3} , which may be presumed for all modern stator winding insulation systems.

In order to make possible a comparison between dielectric power factor and dielectric dissipation factor values the following Table A.1 is given.

Table A.1 – Comparison between correlating values of dielectric power factor $\cos \varphi$ and dielectric dissipation factor $\tan \delta$ and their difference

Dielectric power factor $\cos \varphi$	Angle φ (degree)	Angle δ (degree)	Dielectric dissipation factor $\tan \delta$	Difference
$5,000 \times 10^{-3}$	89,713 520	0,286 480	$5,000 \times 10^{-3}$	$< \pm 0,001 \times 10^{-3}$
$10,000 \times 10^{-3}$	89,427 033	0,572 967	$10,000 \times 10^{-3}$	$< \pm 0,001 \times 10^{-3}$
$20,000 \times 10^{-3}$	88,854 008	1,145 992	$20,004 \times 10^{-3}$	$\pm 0,004 \times 10^{-3}$
$50,000 \times 10^{-3}$	87,134 016	2,865 984	$50,063 \times 10^{-3}$	$\pm 0,063 \times 10^{-3}$
$100,000 \times 10^{-3}$	84,260 830	5,739 170	$100,504 \times 10^{-3}$	$\pm 0,504 \times 10^{-3}$

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	33
2 Références normatives	33
3 Termes et définitions	33
4 Théorie et techniques de mesure.....	34
4.1 Mesure du facteur de dissipation diélectrique.....	34
4.2 Pont de Schering analogique	37
4.3 Pont à transformateur	38
4.4 Mesure numérique du déphasage	39
5 Procédures d'essai	41
5.1 Généralités	41
5.2 Barres et bobines d'enroulement.....	42
5.2.1 Préparation de l'objet en essai.....	42
5.2.2 Techniques de garde	43
5.2.3 Procédure de mesure	45
5.3 Enroulements complets.....	45
6 Résultats d'essai	46
6.1 Généralités	46
6.2 Barres et bobines d'enroulement.....	46
6.3 Enroulements complets.....	48
7 Rapport d'essai	49
7.1 Généralités	49
7.2 Bobines, barres et enroulement neufs.....	49
7.3 Enroulement vieilli en fonctionnement.....	51
Annexe A (informative) Relation entre le facteur de puissance et le facteur de dissipation	53
Bibliographie.....	55
Figure 1 – Circuit parallèle et diagramme vectoriel.....	35
Figure 2 – Circuit en série et diagramme vectoriel	35
Figure 3 – Pertes diélectriques avec tension croissante (schéma).....	37
Figure 4 – Pont de Schering à haute tension – Circuit de base	38
Figure 5 – Pont à transformateur	39
Figure 6 – Schéma de montage d'essai d'un système de mesure numérique du facteur de dissipation à l'aide d'un oscillogramme à courant de principe.....	40
Figure 7 – Exemple de courbe de $\tan \delta$ en fonction du rapport de tension U/U_N mesuré par paliers de tension de $0,2 U_N$	41
Figure 8 – Disposition avec électrodes à anneau de garde sur des objets d'essai avec espace d'isolation (exemple de dimensions préférentielles pour l'espace d'isolation et l'électrode à anneau de garde).....	43
Figure 9 – Application d'électrodes à anneau de garde sur un revêtement de protection anti-effluves	44
Figure A.1 – Diagramme de phase	53

Tableau 1 – Valeurs maximales du facteur de dissipation diélectrique de barres et bobines uniques à l'état neuf équipées d'électrodes à anneau de garde jusqu'à une tension assignée de $U_N = 21$ kV47

Tableau A.1 – Comparaison entre les valeurs de corrélation du facteur de puissance diélectrique $\cos \varphi$ et du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ et leur différence.....54

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27-3: Mesure du facteur de dissipation diélectrique sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes

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 60034-27-3 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes.

Cette première édition annule et remplace la première édition de l'IEC TR 60894 parue en 1987. Cette édition constitue une révision technique.

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

- a) intégration de la mesure numérique du facteur de dissipation et de la capacité;
- b) indication de valeurs limites pour le facteur de dissipation;

- c) description détaillée des techniques de mesure;
- d) extension du domaine d'application aux enroulements complets.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1803/FDIS	2/1804/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60034, publiées sous le titre général *Machines électriques tournantes*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

INTRODUCTION

La présente Norme internationale fournit des lignes directrices pour la mesure du facteur de dissipation diélectrique sur les barres ou bobines de stator préformées ainsi que pour des enroulements complets.

Le facteur de dissipation diélectrique est une mesure des pertes diélectriques dans l'isolation des enroulements statoriques. La mesure du facteur de dissipation diélectrique est un moyen approprié pour évaluer la qualité d'une isolation d'enroulement statorique neuve, mais également vieillie, sur les machines électriques tournantes. Cette méthode est particulièrement utile pour évaluer l'homogénéité de la qualité de fabrication et le comportement diélectrique de l'isolation dans son ensemble. Pour les enroulements statoriques vieillis, le facteur de dissipation diélectrique fournit des informations relatives à l'état de l'isolation.

Les mesures du facteur de dissipation diélectrique ne donnent aucune indication sur la répartition de la perte dans l'isolation et – contrairement aux mesures de décharges partielles à l'arrêt – ne permettent pas de localiser les points faibles du système d'isolation.

Le principe essentiel consiste à mesurer le facteur de dissipation diélectrique sur une plage de tensions et à dériver différents paramètres caractéristiques de perte diélectrique en tant que base d'évaluation.

Les limites empiriques vérifiées dans la pratique peuvent être utilisées comme base d'évaluation de la qualité des systèmes d'isolation des enroulements statoriques en cours de fabrication. De plus, l'évaluation des tendances, par exemple les essais de diagnostic utilisés dans le cadre de l'évaluation fonctionnelle des systèmes d'isolation ou en relation avec l'entretien courant, le dépannage et la révision des machines tournantes, peut également fournir des informations sur les processus de vieillissement, les mesures supplémentaires à prendre et les intervalles entre les opérations de révision périodique. Cependant, ces évaluations de tendances ne peuvent pas être utilisées pour prévoir le temps de fonctionnement avant défaillance d'une isolation d'enroulement statorique.

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27-3: Mesure du facteur de dissipation diélectrique sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60034 fournit des lignes directrices pour les procédures d'essai et l'interprétation des résultats d'essai concernant les mesures du facteur de dissipation diélectrique sur l'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes. Ces lignes directrices sont valables pour les machines électriques tournantes à revêtement d'encoche conducteur dont la tension assignée est supérieure ou égale à 6 kV.

Cette norme s'applique aux barres et bobines de stator individuelles préformées situées à l'extérieur d'un noyau (non installées), aux barres et bobines de stator individuelles installées dans un noyau et aux enroulements statoriques préformés complets des machines à l'état neuf ou vieilli.

La présente Norme internationale s'applique à tout type de barres, bobines et enroulements complets imprégnés sous vide ou à imprégnation riche en résine (pleine charge) rubanés. Elle ne s'applique pas aux barres et bobines individuelles non imprégnées ou aux enroulements complets non imprégnés.

Elle fournit les exigences relatives aux caractéristiques du facteur de dissipation diélectrique des barres et bobines de stator préformées individuelles des machines dont la tension assignée est supérieure ou égale à 6 kV lorsqu'elles sont soumises aux essais avec des tensions alternatives de 50 Hz ou 60 Hz.

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 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et exigences générales*

IEC 60060-2, *Techniques des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure*

3 Termes et définitions

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

3.1

tension assignée

U_N

tension ou plage de tensions entre des lignes aux bornes (également appelée tension entre phases) assignée, généralement par un fabricant, pour les conditions de fonctionnement spécifiées d'une machine

3.2

facteur de dissipation diélectrique

$\tan \delta$

tangente de l'angle de pertes diélectriques δ (complément de l'angle du facteur de puissance de l'isolation) à des valeurs prédéterminées de température, de fréquence et de tension ou de contrainte diélectrique

Note 1 à l'article: D'autres termes sont parfois utilisés pour cette propriété: tan delta, tangente de pertes, facteur de perte diélectrique ou facteur de puissance diélectrique. Il existe une différence physique entre le facteur de dissipation diélectrique et le facteur de puissance (le cosinus de l'angle du facteur de puissance ou le sinus de l'angle de pertes diélectriques), mais les deux mesures sont presque identiques, lorsque le facteur de dissipation diélectrique est inférieur à 100×10^{-3} (voir 4.1).

Note 2 à l'article: Bien que le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ soit exprimé en valeur absolue dans la présente norme, il est également exprimé en pourcentage dans d'autres documents.

3.3

delta tan delta

$\Delta \tan \delta$

différence du facteur de dissipation diélectrique mesuré pour deux tensions d'essai successives par paliers de $0,2 U_N$

3.4

«tip-up» du tan delta

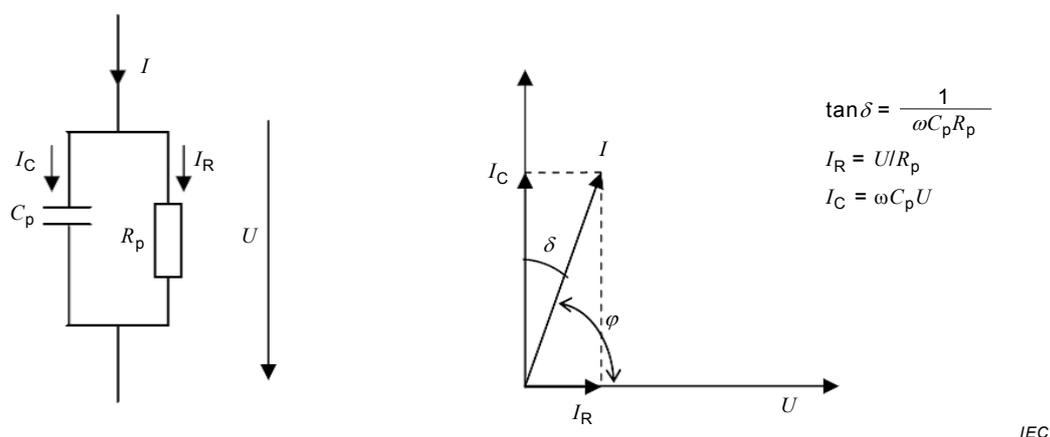
différence du facteur de dissipation diélectrique mesuré pour les deux tensions $0,6 U_N$ et $0,2 U_N$

Note 1 à l'article: Des différences de facteur de dissipation diélectrique peuvent être utilisées avec d'autres paliers de tension que ceux mentionnés au 3.3 et 3.4 mais les limites suggérées dans le Tableau 1 ne seront pas valables dans ce cas.

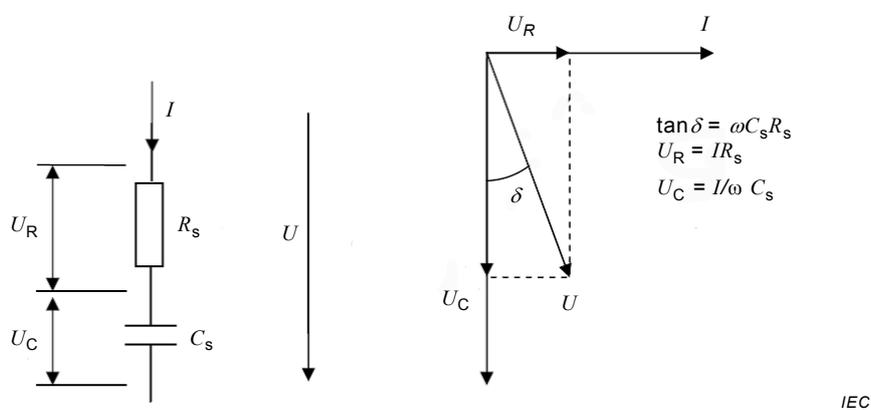
4 Théorie et techniques de mesure

4.1 Mesure du facteur de dissipation diélectrique

Suivant la définition du 3.2, le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ est la tangente de l'angle de pertes diélectriques δ (complément de l'angle du facteur de puissance de l'isolation φ) à une tension U , une fréquence et une température prédéterminées. La perte diélectrique du système d'isolation peut être représentée respectivement par un schéma d'équivalence des circuits en parallèle (C_p, R_p) ou en série (R_s, C_s) des éléments (voir Figure 1 et Figure 2).

**Légende**

- C_p capacité en parallèle
- R_p résistance en parallèle
- ω $2\pi f$ fréquence angulaire
- I_C courant dans le trajet capacitif
- I_R courant dans le trajet résistif
- U tension au niveau du système d'isolation
- I courant total au travers du système d'isolation

Figure 1 – Circuit parallèle et diagramme vectoriel**Légende**

- C_s capacité en série
- R_s résistance en série
- U tension au niveau du système d'isolation
- I courant total au travers du système d'isolation
- U_C tension au niveau de la capacité
- U_R tension aux bornes de la résistance

Figure 2 – Circuit en série et diagramme vectoriel

Une comparaison entre le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ et le facteur de puissance de l'isolation $\cos \varphi$ parfois utilisé par ailleurs montre que ces valeurs sont presque identiques, si le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ est inférieur à 100×10^{-3} , ce qui peut être présumé pour tous les systèmes d'isolation d'enroulements statoriques modernes.

NOTE La caractéristique de perte privilégiée et exclusivement utilisée dans la présente norme est le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$. Mais pour permettre d'établir une comparaison entre les valeurs du facteur de puissance de l'isolation $\cos \varphi$ et du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$, un tableau est fourni en Annexe A.

Comme indiqué à la Figure 1, le vecteur du courant d'isolation I peut être divisé en deux composantes perpendiculaires, qui représentent un courant capacitif I_C (90° d'avance par rapport à la tension U) et un courant résistif I_R (en phase avec la tension U). L'angle de déplacement de phase δ est dû à une composante résistive ajoutée à la composante capacitive de l'isolation. Le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ peut être exprimé dans l'équation suivante:

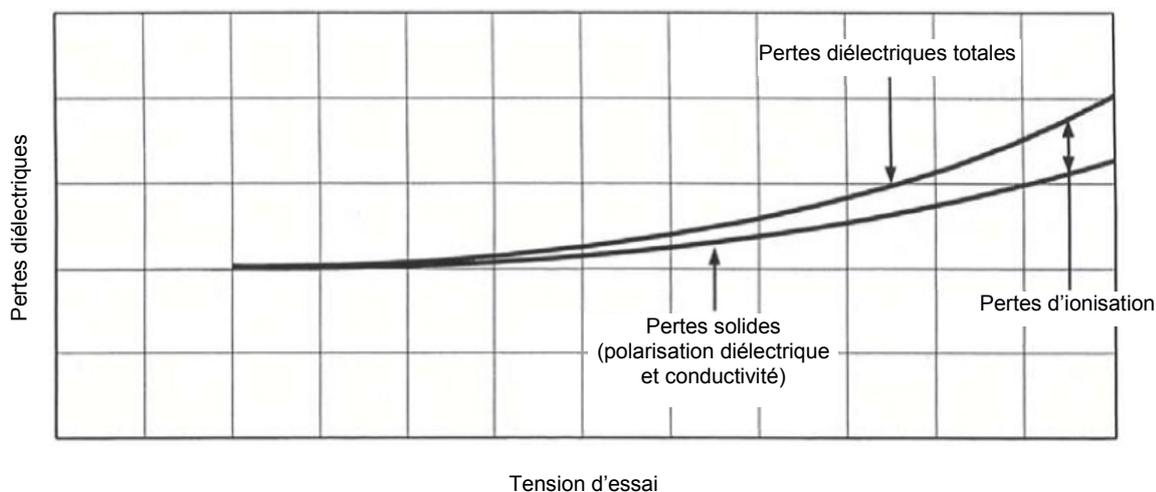
$$\tan \delta = \omega C_S R_S = \frac{1}{\omega C_P R_P}$$

La composante capacitive C_S ou C_P représente la capacité sans perte de l'isolation en essai tandis que la composante résistive R_S ou R_P fait la synthèse des différents types de pertes. Les caractéristiques de perte considérées sont celles essentiellement associées à l'isolation principale de masse entre le faisceau du conducteur (y compris l'écran de conducteur interne, le cas échéant), le revêtement conducteur de l'encoche et l'enveloppe reliée à la terre. Dans le cas des mesures sur barres ou bobines statoriques uniques, seule la partie de l'isolation qui est diélectriquement en série avec l'isolation de masse entre dans le résultat de mesure car des électrodes à anneau de garde peuvent être utilisées. Dans le cas des mesures du facteur de dissipation sur enroulements complets, l'influence du revêtement de protection anti-effluves ainsi que l'état de la surface ambiante doivent être pris en considération. Ces facteurs d'influence peuvent être importants lors de la comparaison des résultats d'essai obtenus à partir de différentes mesures.

La mesure du facteur de dissipation diélectrique à des tensions inférieures au seuil de décharge partielle représente l'amplitude des pertes diélectriques dans l'isolation solide (absorption diélectrique et pertes conductrices) et les conditions de contact électrique avec l'électrode de mesure reliée à la terre. La composante du facteur de dissipation diélectrique résultant des pertes diélectriques varie généralement très peu avec la tension, mais une perte mesurée supérieure à la normale de manière significative indique une différence dans la structure de l'isolation, telle qu'il peut en résulter d'une composition incorrecte de la résine ou d'une polymérisation non appropriée.

Lorsque la tension d'essai augmente, deux différents types de pertes diélectriques s'accroissent (voir Figure 3):

- pertes diélectriques du matériau d'isolation solide (polarisation, conductivité);
- des décharges partielles dans les occlusions gazeuses (vacuoles) de la structure d'isolation provoquent une augmentation du facteur de dissipation diélectrique et un nombre croissant de vacuoles commencent à subir une décharge tandis que la tension appliquée augmente. La valeur des pertes diélectriques et par conséquent la valeur de $\tan \delta$ continueront à augmenter.

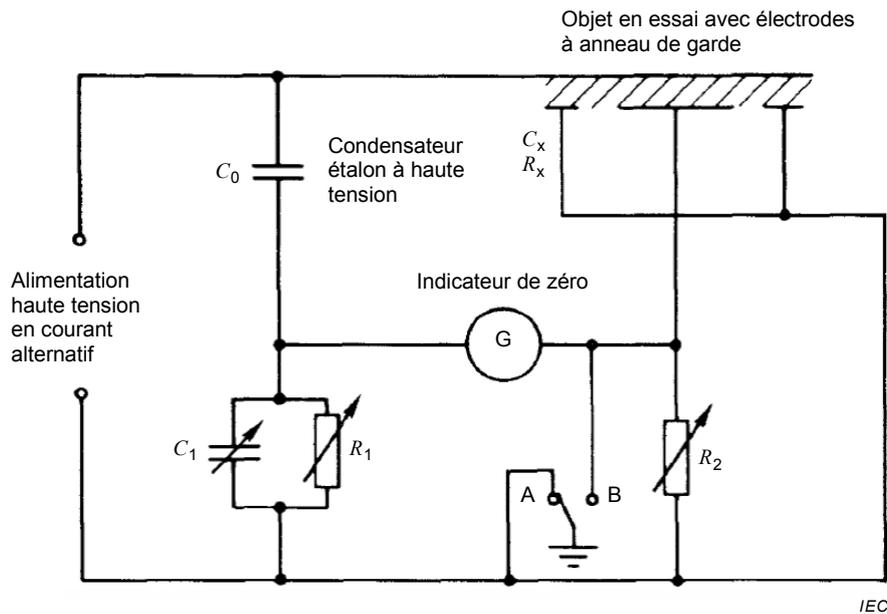


IEC

Figure 3 – Pertes diélectriques avec tension croissante (schéma)

4.2 Pont de Schering analogique

La mesure est effectuée à l'aide du pont de Schering analogique ou d'un type de pont équivalent, tel qu'un pont à transformateur (voir 4.3), ou au moyen d'équipements de mesure numériques modernes (voir 4.4). On utilise une tension d'alimentation alternative d'amplitude variable, présentant des caractéristiques assignées suffisantes pour fournir la tension mesurée aux bornes de la capacité de l'objet en essai et satisfaisant aux exigences de l'IEC 60060-2. La Figure 4 présente le schéma des circuits de base pour un pont de Schering à haute tension, lors de la mesure d'une barre ou d'une bobine d'enroulement statorique avec une capacité sans perte présumée C_x et des pertes résistives de R_x , utilisant un circuit d'essai équipé d'électrodes à anneau de garde. La branche haute tension du pont inclut le condensateur étalon à haute tension (C_0) présentant de très faibles pertes diélectriques. Le dispositif du pont de Schering lui-même comprend les branches basse tension avec des ensembles variables de décades résistives (R_1 et R_2) et capacitives (C_1) à haute précision. La condition d'équilibre du pont, exigence nécessaire pour une mesure correcte, est surveillée par un "indicateur de zéro" sensible (voir Figure 4).



Légende

Positions du commutateur de mise à la terre:	A pour essais sur bobines ou barres non reliées à la terre
	B pour essais sur enroulements en condition de mise à la terre
C_0 Capacité du condensateur étalon	C_x Capacité de l'objet en essai
C_1 Capacité variable de la branche d'équilibrage 1	R_2 Résistance variable de la branche d'équilibrage 2
R_1 Résistance variable de la branche d'équilibrage 1	R_x Résistance de l'objet en essai

Figure 4 – Pont de Schering à haute tension – Circuit de base

Le pont de Schering analogique est très sensible aux perturbations produites par la capacité parasite par rapport au potentiel de terre. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser des câbles de mesure coaxiaux à double écran avec conducteur d'équipotentialité à écran actif, c'est-à-dire un circuit de mise à la terre Wagner.

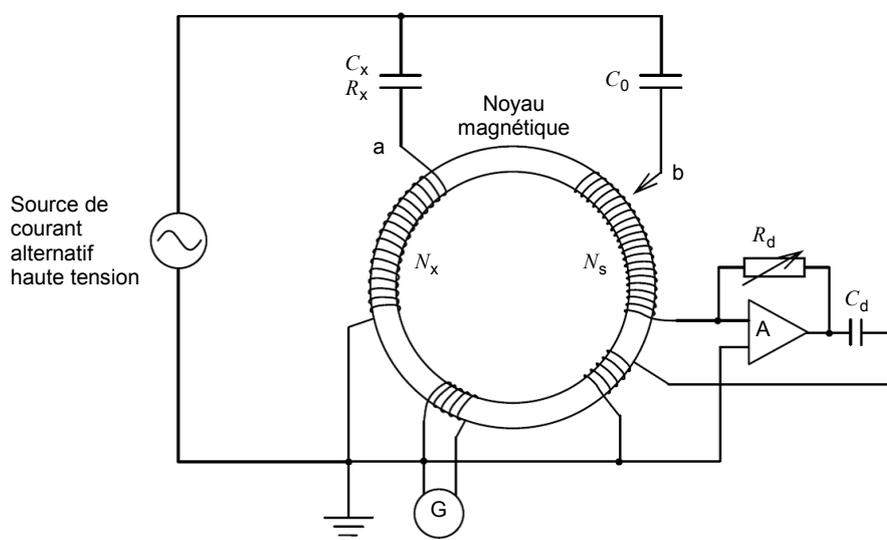
Actuellement, la plupart des ponts analogiques tels que le pont de Schering à haute tension utilisent une procédure d'équilibrage automatisée pour la partie de l'équipement du pont qui inclut les branches basse tension avec les éléments de pont variables C_1 , R_1 et R_2 .

On utilise un condensateur étalon à haute tension comme norme de référence C_0 dans le circuit du pont. La valeur nominale de la capacité est généralement 100 pF ou 1 000 pF avec une marge de tolérance inférieure à 5 % dans le comportement à long terme. Il convient que le facteur de dissipation diélectrique de ce condensateur étalon soit inférieur à $0,01 \times 10^{-3}$ jusqu'à la tension d'essai maximale.

4.3 Pont à transformateur

Le pont à transformateur constitue un autre exemple type de pont analogique. Le pont est automatisé en appliquant un comparateur de courant comprenant des amplificateurs et des transformateurs opérationnels. Un exemple de circuit est illustré à la Figure 5. Les enroulements sous le condensateur étalon C_0 et la capacité de l'objet en essai C_x sont enroulés en sens inverse l'un par rapport à l'autre autour d'un noyau magnétique à forte perméabilité. Lorsque le pont est équilibré par un réglage du nombre de tours N_s et de la résistance R_d , le flux ou la force magnétomotrice dans le noyau magnétique devient nul. Le potentiel des points a et b est alors développé par la chute de tension aux bornes de très petites résistances en courant continu d'enroulements N_x et N_s et devient pratiquement nul. Cette méthode permet d'éliminer l'influence des capacités parasites par rapport au sol. Par

conséquent, cette méthode de pont n'exige pas, comme le pont de Schering, un circuit de mise à la terre Wagner.



IEC

Légende

C_x	capacité de l'objet en essai
R_x	résistance de l'isolation de l'objet en essai
C_0	condensateur étalon
N_x	nombre de tours de bobine dans la branche de l'objet en essai
N_s	nombre de tours de bobine dans la branche de référence
R_d	résistance réglable pour l'équilibrage du pont
C_d	capacité réglable pour l'équilibrage du pont
G	instrument pour vérifier l'équilibrage du pont
A	amplificateur

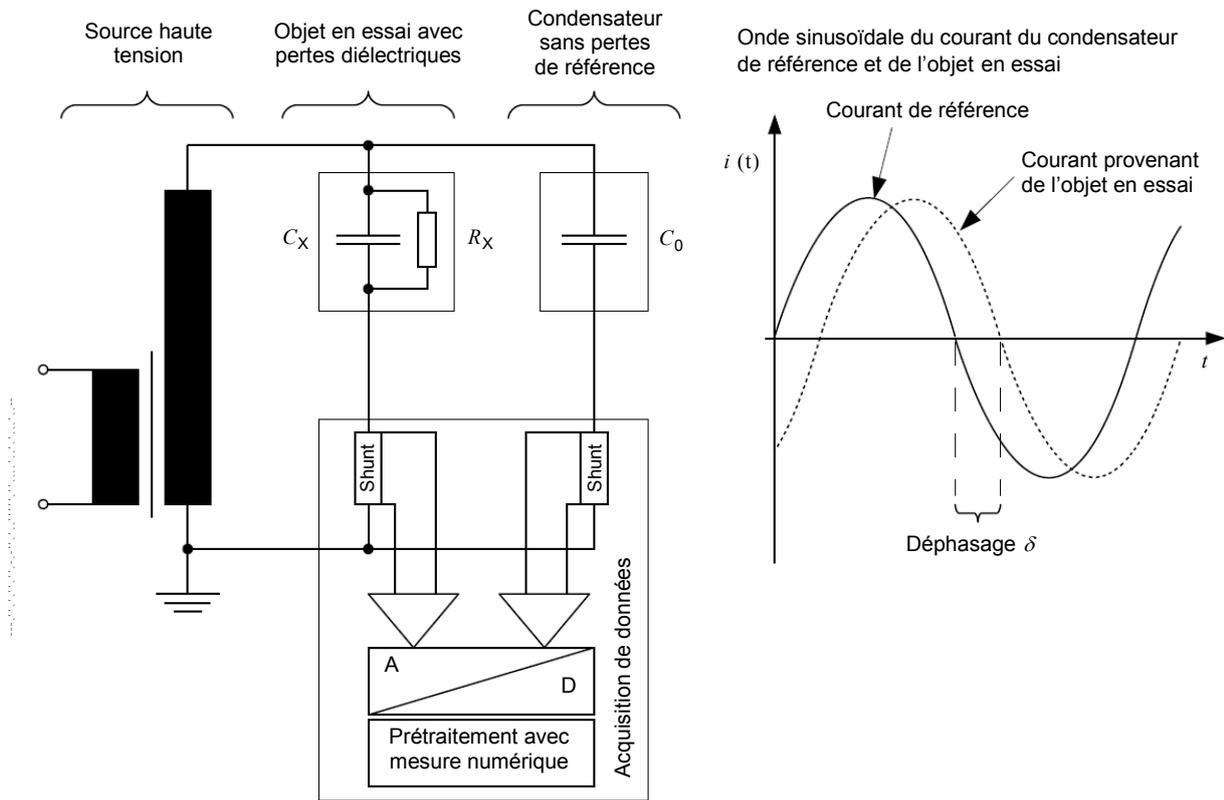
Figure 5 – Pont à transformateur

4.4 Mesure numérique du déphasage

Le développement de l'électronique numérique, en particulier des convertisseurs analogiques-numériques et des dispositifs de filtrage à haute résolution, a entraîné l'apparition de systèmes de mesure numériques du facteur de dissipation et de la capacité commandés entièrement par ordinateur. La Figure 6 illustre un exemple de montage d'essai avec un circuit à haute tension incluant le trajet de l'objet en essai (C_x , R_x) et le trajet de référence avec un condensateur étalon C_0 et l'équipement de mesure électronique du côté basse tension. Le principe de mesure est fondé sur un enregistrement précis des courants au travers du condensateur étalon (de référence) et du trajet de l'objet en essai avec une tension élevée comme marqueur de référence. Le facteur de dissipation diélectrique est calculé à partir de ces courants, ou en mesurant la différence de phase entre ces courants. Un équipement numérique à haute sensibilité utilisé pour la mesure du facteur de dissipation peut être caractérisé par les éléments suivants:

- mesure simultanée du courant et de la tension à onde sinusoïdale dans les deux trajets à haute tension avec une forte amplitude et une précision de temps élevée;
- suppression des harmoniques et du bruit externe au niveau d'une onde sinusoïdale de courant et de tension par un filtrage numérique dans le domaine temps ou fréquence;

- mesure sensible et fiable du déphasage de courant entre le trajet de référence et le trajet de l'objet en essai;
- calcul du facteur de dissipation $\tan \delta$ et de la capacité C_x sur la base des informations de déphasage et d'amplitude provenant de la mesure numérique du courant;
- affichage des valeurs réelles de $\tan \delta$ et C_x de l'isolation de l'enroulement statorique en corrélation avec la tension d'essai appliquée durant la procédure d'essai commandée par ordinateur.



IEC

Légende

C_0 capacité du condensateur étalon à haute précision sans pertes

C_x, R_x capacité et résistance d'isolation des barres ou bobines avec pertes diélectriques

Figure 6 – Schéma de montage d'essai d'un système de mesure numérique du facteur de dissipation à l'aide d'un oscillogramme à courant de principe

Si le système de mesure utilise des instruments isolés contre les hautes tensions, tels que des liaisons de données à fibres optiques entre les unités de mesure et l'ordinateur de commande, il peut facilement réaliser des mesures du facteur de dissipation sur des objets dotés d'une mise à la terre permanente tels que des machines tournantes dans le champ. Etant donné que les câbles à fibres optiques agissent comme un isolateur haute tension, les dispositifs de mesure alimentés par batteries peuvent être placés sur des connexions à fort potentiel au lieu de connexions basse tension à la terre.

5 Procédures d'essai

5.1 Généralités

L'essai du facteur de dissipation diélectrique est applicable aux composants des enroulements statoriques (barres ou bobines) dans lesquels l'isolation est polymérisée. Cet essai est utilisable pour les barres, bobines et enroulements complets uniques imprégnés sous vide ou riches en résine (pleine charge), y compris pour la technologie d'imprégnation sous pression à vide (VPI) globale. L'essai n'est pas applicable aux barres et bobines individuelles non imprégnées ou aux enroulements complets non imprégnés.

Il convient de réaliser la mesure du facteur de dissipation à une tension de fréquence de ligne alternative de forme sinusoïdale et présentant peu d'harmoniques, conformément à l'IEC 60060-1.

Le facteur de dissipation diélectrique est généralement mesuré sur une plage spécifique de tensions U/U_N débutant à $0,2 U_N$ et se terminant à une tension assignée de $1,0 U_N$. Les valeurs de $\tan \delta$ peuvent être obtenues selon des intervalles successifs tels que $0,2 U_N$. Le diagramme de la Figure 7 montre un exemple de procédure de mesure par paliers. Suivant la définition du 3.3, delta tan delta ($\Delta \tan \delta$) se rapporte à la différence du facteur de dissipation diélectrique mesuré entre deux tensions spécifiées (voir Figure 7). Des paliers de tension autres que $0,2 U_N$ peuvent également être utilisés selon accord entre le fabricant et le client.

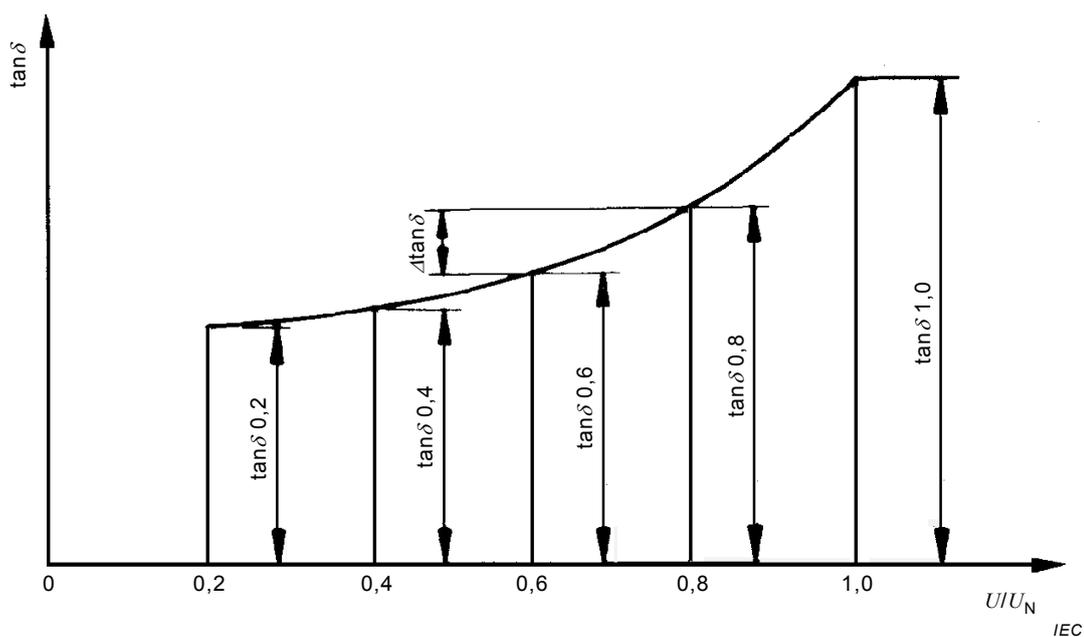


Figure 7 – Exemple de courbe de $\tan \delta$ en fonction du rapport de tension U/U_N mesuré par paliers de tension de $0,2 U_N$

Le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ est mesuré sur des barres/bobines de stator ou des enroulements complets. Pour les bobines, chaque côté de bobine doit être mesuré séparément et tous les résultats sont enregistrés. On obtient les informations suivantes:

- facteur de dissipation diélectrique pour une basse tension de $0,2 U_N$ ($\tan \delta_{0,2}$);
- delta tan delta pour chaque intervalle de tension afin d'identifier la valeur maximale de l'augmentation du facteur de dissipation diélectrique ($\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$);
- «tip-up» du tan delta caractéristique en tant que différence entre les deux paliers de tension prédéfinis de $0,6 U_N$ et $0,2 U_N$ ($\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}$);

- forme de la courbe du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ en fonction de la tension d'essai U/U_N (Figure 7).

Il est recommandé d'augmenter la tension palier par palier suivant les intervalles convenus, tels que $0,2 U_N$. A chaque palier, la tension doit être maintenue stable jusqu'à pouvoir relever des valeurs $\tan \delta$ stabilisées. Des relevés instables peuvent résulter de problèmes au niveau du système de mesure et il convient de les étudier de manière plus approfondie.

Si l'on utilise un système de mesure automatique à augmentation de tension continue, celui-ci doit également s'arrêter aux paliers de tension donnés pendant une période suffisante pour garantir la stabilité des valeurs de mesure ou il doit assurer une faible augmentation de tension appropriée afin d'obtenir des relevés fiables.

Il convient de réaliser toutes les mesures du facteur de dissipation diélectrique à température ambiante et dans l'atmosphère de l'air environnant car, dans ces conditions d'essai ambiantes, on peut obtenir la meilleure reproductibilité des informations sur l'état du système d'isolation.

La caractéristique du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la tension est affectée dans une certaine mesure par la température de l'isolation de l'objet en essai. La température de l'enroulement statorique doit être uniforme et proche de la température ambiante (elle peut être vérifiée au moyen des capteurs de température à résistance des enroulements statoriques). La température de l'isolation principale, la température de l'air ambiant ainsi que l'humidité relative doivent être enregistrées.

NOTE La capacité parasite de l'objet en essai par rapport à la terre peut influencer les résultats des mesures. Les instructions de fonctionnement de l'instrument décrivent généralement la façon dont la capacité parasite être prise en charge afin de minimiser l'impact négatif.

5.2 Barres et bobines d'enroulement

5.2.1 Préparation de l'objet en essai

L'essai du facteur de dissipation diélectrique est principalement utilisé comme essai de contrôle de la qualité sur les barres et bobines nouvellement fabriquées. Il s'agit d'une méthode importante pour démontrer la qualité de l'isolation principale et pour déterminer l'uniformité du processus de fabrication.

Les résultats d'essai sont influencés par les électrodes utilisées pour simuler l'encoche. On doit utiliser des systèmes d'électrodes identiques pour comparer les résultats entre les barres ou les bobines individuelles.

Pour utiliser le revêtement d'encoche conducteur comme électrode de mesure, il n'est pas suffisant d'établir un contact au niveau de quelques points uniques car, dans ce cas, la résistance de contact par rapport au revêtement d'encoche conducteur serait beaucoup plus importante que dans l'encoche. Cette forte résistance engendrerait des mesures élevées irréalistes du facteur de dissipation diélectrique. Par conséquent, il est nécessaire de mettre le revêtement d'encoche conducteur en contact avec des plaques métalliques, une feuille métallique enroulée ou des fils spiralés sur toute la longueur. Il convient de prendre soin de minimiser les espaces vides entre l'électrode métallique et la surface du revêtement d'encoche conducteur.

L'utilisation d'électrodes de garde est nécessaire pour prévenir les effets de surface erronés à la fin du revêtement d'encoche conducteur sur les relevés du facteur de dissipation diélectrique (voir Figures 8 et 9). Tous les brins doivent être électriquement connectés pour éviter une rupture de l'isolation des brins individuels. Il convient d'isoler convenablement la barre ou la bobine en essai par rapport à la terre.

5.2.2 Techniques de garde

5.2.2.1 Généralités

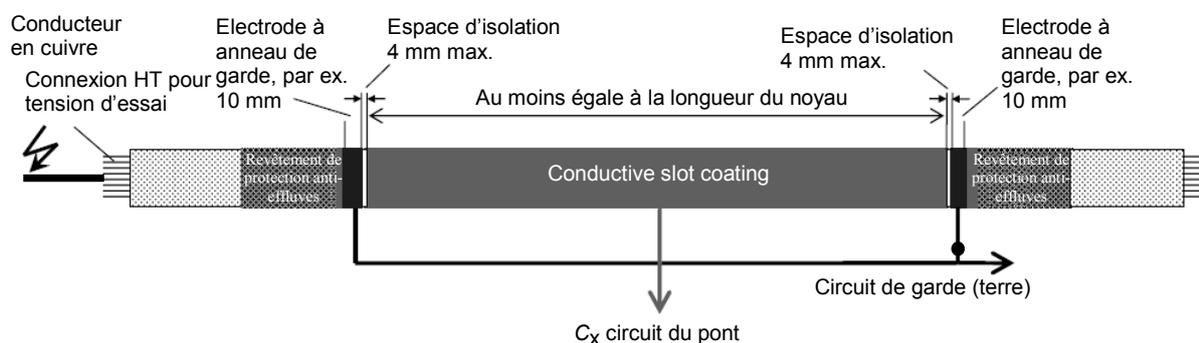
Il existe différentes techniques d'utilisation des électrodes de garde permettant de réduire les erreurs de mesure provoquées par les courants supplémentaires apparaissant à la fin du revêtement d'encoche conducteur vers le côté haute tension. Il convient d'utiliser une électrode à anneau de garde mise à la terre, placée à proximité des extrémités du revêtement d'encoche conducteur (vernis ou ruban), afin de réduire l'influence de ces courants supplémentaires sur la mesure du facteur de dissipation diélectrique. Le type d'électrode de garde le plus approprié (feuille métallique ou peinture conductrice) dépend du processus de fabrication des barres ou des bobines.

En fonction de la conception de la barre, la surface du revêtement d'encoche conducteur peut couvrir uniquement la partie droite de la barre ou peut également inclure les courbures et une partie des développantes de la barre.

5.2.2.2 Electrodes à anneau de garde avec espace d'isolation

Pour la mesure du facteur de dissipation diélectrique, différentes options de revêtement d'encoche conducteur et de protection anti-effluves peuvent être utilisées. Des rubans de garde temporaires ou des électrodes de garde capacitatives peuvent être appliqués en contact électrique avec le revêtement d'encoche conducteur. Il est possible également d'appliquer un vernis de garde pour obtenir une protection anti-effluves. Un petit espace temporaire (4,0 mm max.) doit être créé dans le revêtement d'encoche conducteur, à environ 10 mm de chaque extrémité du début visible du revêtement anti-effluves de la développante. Il faut noter que la largeur de l'espace d'isolation aura une influence sur les valeurs du facteur de dissipation diélectrique mesurées en raison d'une amplification du champ électrique et d'une éventuelle activité de décharge en surface au niveau d'un espace d'isolation plus large.

Une électrode à anneau de garde doit être appliquée de façon adjacente à l'espace d'isolation par-dessus la petite partie restante du revêtement d'encoche conducteur. Le matériau recommandé pour les électrodes à anneau de garde est une feuille métallique à adhésif conducteur. Cependant, tout matériau dont l'efficacité a été démontrée pour les électrodes à anneau de garde peut être utilisé. L'électrode à anneau de garde doit être appliquée de façon adjacente au petit espace d'isolation temporaire et ne doit pas chevaucher le début du revêtement de protection anti-effluves, comme indiqué à la Figure 8. Il convient que la largeur de l'électrode à anneau de garde métallique soit suffisamment importante pour assurer une faible densité de courant de contact.



IEC

Figure 8 – Disposition avec électrodes à anneau de garde sur des objets d'essai avec espace d'isolation (exemple de dimensions préférentielles pour l'espace d'isolation et l'électrode à anneau de garde)

Après la mesure du facteur de dissipation diélectrique, l'espace d'isolation de garde doit être soigneusement repeint avec un vernis de revêtement d'encoche conducteur afin d'éviter tout défaut d'homogénéité dans le système de revêtement d'encoche conducteur. Pour repeindre

l'espace, il faudra une durée de polymérisation adaptée avant de pouvoir pratiquer des essais supplémentaires sur l'objet en essai.

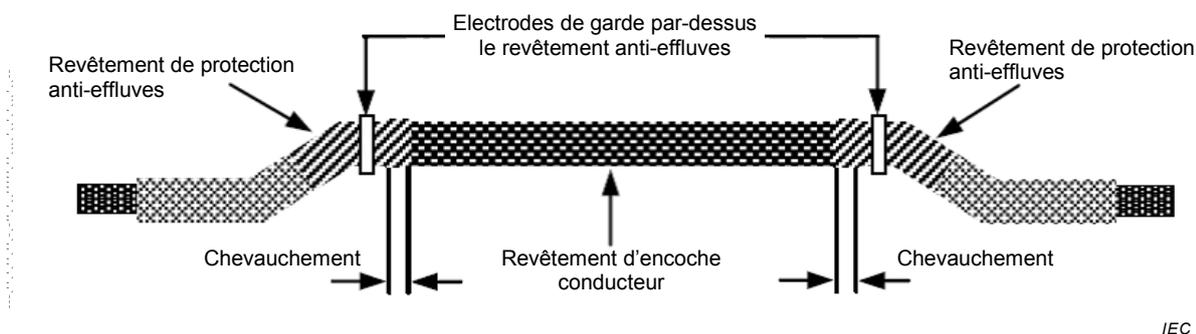
Si l'on utilise un revêtement d'encoche conducteur peint et un revêtement de protection anti-effluves peint sur l'isolation principale, les électrodes à anneau de garde peuvent être fournies en même temps que la procédure de peinture pour le revêtement d'encoche conducteur.

On peut également utiliser la technique de garde avec espace d'isolation ainsi que des revêtements d'encoche et de protection anti-effluves rubanés. S'il n'est pas bien contrôlé, le découpage de l'espace d'isolation est susceptible d'affecter l'isolation principale et, par conséquent, il convient de ne pas privilégier cette méthode pour les bobines et barres de production.

De même, des rubans de garde temporaires ou des électrodes de garde capacitives peuvent être utilisés avant d'appliquer le système de protection anti-effluves final. Dans ce cas, il convient d'utiliser une disposition de l'espace d'isolation et de l'anneau de garde identique à celle décrite ci-dessus.

5.2.2.3 Electrodes à anneau de garde sur un revêtement de protection anti-effluves

Pour les objets d'essai neufs à revêtement d'encoche conducteur et revêtement de protection anti-effluves rubanés, il convient d'utiliser l'application d'électrodes à anneau de garde comme illustré à la Figure 9. Elle peut également être utilisée pour un revêtement d'encoche conducteur et un revêtement de protection anti-effluves peints.



IEC

Figure 9 – Application d'électrodes à anneau de garde sur un revêtement de protection anti-effluves

L'électrode à anneau de garde doit être fixée par-dessus la couche de protection anti-effluves à proximité de la partie de chevauchement entre le revêtement d'encoche conducteur et le revêtement de protection anti-effluves. Il peut être difficile de localiser l'extrémité physique du revêtement d'encoche conducteur si elle est recouverte par le revêtement de protection anti-effluves. Néanmoins, il convient de positionner le début de l'électrode à anneau de garde aussi près que possible de la fin de la partie de chevauchement du système de garde, mais sans couvrir la partie de chevauchement. Cette procédure est normalement utilisée sur les barres et bobines de production car la localisation exacte du chevauchement entre ces deux revêtements est connue à ce moment.

Cette configuration n'aura qu'un effet mineur sur les résultats du facteur de dissipation diélectrique si l'électrode à anneau de garde est appliquée correctement. L'application dépend des propriétés électriques du revêtement de protection anti-effluves, de la présence éventuelle d'un manchon isolant, de la couverture de la zone de chevauchement et de la résistance de contact entre l'électrode à anneau de garde et la surface de la couche de protection anti-effluves.

Cette méthode de garde simplifiée peut être utile dans le cadre des essais de production individuels de série lorsqu'il est nécessaire de mesurer individuellement chaque objet en essai.

5.2.3 Procédure de mesure

Afin d'assurer une qualité homogène du processus de production, il est recommandé de soumettre aux essais la taille d'échantillon nécessaire pour permettre une évaluation statistiquement significative des données caractéristiques de toutes les barres ou bobines.

Les résultats de mesure du facteur de dissipation diélectrique peuvent être influencés durant l'application d'une tension d'essai. Par conséquent, on recommande une certaine forme de conditionnement pour stabiliser l'activité de décharge partielle et les pertes diélectriques, qui influencent la mesure du facteur de dissipation diélectrique. Il est recommandé d'alimenter les barres ou les bobines avec une haute tension pendant une durée raisonnable (voir l'IEC TS 60034-27). L'essai à haute tension, qui est un contrôle de la qualité de toutes les barres ou bobines neuves, est susceptible d'être utilisé à des fins de conditionnement.

Les valeurs du facteur de dissipation diélectrique et de la capacité doivent être enregistrées pour une augmentation graduelle de la tension conformément à la Figure 7 et la description du 5.1. Les résultats d'essai de chaque objet en essai doivent être enregistrés pour le rapport et l'évaluation statistique éventuelle.

5.3 Enroulements complets

Une mesure du facteur de dissipation diélectrique peut être réalisée sur l'enroulement statorique complet avant ou après le montage de la machine complète. Avant le montage, l'enroulement statorique est spécifiquement concerné, tandis que les manchons, par exemple, et d'autres composants peuvent influencer les résultats de mesure après le montage. Les mesures du facteur de dissipation diélectrique des enroulements complets associées à d'autres méthodes de diagnostic constituent un instrument utile pour l'évaluation de l'état des machines électriques tournantes. Les essais pratiqués sur l'isolation d'enroulement statorique neuve fournissent le point de référence pour établir les tendances de l'état de vieillissement du système d'isolation. Une variation des valeurs du facteur de dissipation diélectrique sur une période de temps peut indiquer une modification de l'état de l'isolation principale, du revêtement d'encoche conducteur, du revêtement de protection anti-effluves, des développantes ou des systèmes de support d'encoche.

La méthode d'essai et le matériel d'essai diffèrent de ceux utilisés pour les essais sur des barres ou des bobines individuelles. Contrairement à la méthode d'essai pour les barres ou bobines individuelles, les techniques de garde ne sont pas praticables pour des enroulements complets. Par conséquent, il convient, lorsque l'on compare les résultats avec ceux obtenus pour les essais sur barres ou bobines individuelles, de tenir compte du fait que les résultats de l'enroulement complet sont considérablement influencés par la résistance non linéaire des revêtements de protection anti-effluves en fonction de la longueur de la portion d'encoche. Il convient, lors de la mesure d'une phase individuelle, de connecter les autres phases à la carcasse du stator.

Un nombre maximal d'informations relatives à l'état des développantes et de la portion d'encoche peut être obtenu en mesurant le facteur de dissipation diélectrique sur chaque enroulement de phase individuel et sur l'enroulement complet (toutes les phases confondues) jusqu'à la tension assignée U_N pour les machines neuves.

Dans le cas de mesures effectuées in situ sur des machines à connexion neutre externe, seules les phases individuelles peuvent être mesurées afin de réduire l'exigence de capacité de l'alimentation haute tension.

Le noyau statorique et la carcasse des machines complètes sont solidement reliés à la terre. Lors de la mesure du facteur de dissipation diélectrique à l'aide d'un pont de Schering

analogique, un adaptateur auxiliaire est nécessaire pour éviter le fonctionnement du pont de Schering sans mise à la terre. Selon les règles de sécurité, la manipulation d'un instrument non relié à la terre exige un personnel spécifiquement formé et expérimenté. Un équipement numérique doté de connexions à fibres optiques longues entre le dispositif de mesure et l'unité de commande permet de connecter le boîtier de mesure à la borne haute tension de la phase en essai afin d'atténuer les risques pour la sécurité.

Sur les enroulements reliés à la terre, différentes capacités parasites peuvent influencer la mesure. Néanmoins, en raison de la capacité de l'enroulement de phase élevée, dans la plupart des cas, ces capacités parasites n'affectent pas les relevés de façon significative.

La mesure du facteur de dissipation diélectrique sur des enroulements larges à hydroréfrigération directe peut être influencée par la résistance du débit d'eau par rapport au potentiel de terre. Lorsque la conductivité de l'eau et les dimensions des tuyaux isolants sont connues, les pertes d'eau peuvent être calculées et le facteur de dissipation diélectrique mesuré peut être corrigé. A défaut, l'enroulement statorique doit être vidé et séché à vide avant de commencer la mesure.

En complément de l'essai de type bien établi, réalisé sur les enroulements de phase complets, un essai sur échantillon aléatoire peut faire l'objet d'un accord pour les systèmes d'isolation VPI globale. Quatre faisceaux ou deux barres au minimum sont fabriqués comme pour la machine de production, au même moment et dans les mêmes conditions que l'enroulement de production et placés dans les modèles d'encoche.

La valeur assignée de l'alimentation haute tension doit être adaptée à la capacité de l'enroulement statorique complet et doit être conforme à IEC 60060-1 et IEC 60060-2 relatives aux techniques d'essai à haute tension.

6 Résultats d'essai

6.1 Généralités

A partir des mesures du facteur de dissipation diélectrique, on peut évaluer les propriétés caractéristiques suivantes du système d'isolation:

- la valeur du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta_{0,2}$ à basse tension ($0,2 U_N$) indique l'état de polymérisation du système d'isolation et dépend du type et des différents composants du système d'isolation électrique;
- l'amplitude de delta $\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$ en fonction de la tension fournit une indication du contenu de la vacuole et du délaminage du système d'isolation et dépend de plusieurs influences supplémentaires, telles qu'une imprégnation imparfaite, l'état de polymérisation, une liaison électrique inappropriée entre l'objet en essai et l'électrode de mesure, la contamination et l'humidité de la surface de l'objet en essai, le type et l'état du revêtement de protection anti-effluves et l'état de vieillissement pour les mesures en service.

6.2 Barres et bobines d'enroulement

Le nombre d'objets en essai dans un cycle de production peut varier de l'ensemble des barres ou bobines à une ou deux barres (deux ou quatre faisceaux) d'un enroulement. Le critère majeur consiste à sélectionner une taille d'échantillon permettant de déterminer si le processus de production est sous contrôle. Il est important de sélectionner suffisamment d'échantillons pour s'assurer qu'un échantillonnage statistiquement significatif a été réalisé (voir 5.2.3).

Les valeurs maximales du facteur de dissipation diélectrique de barres et bobines neuves jusqu'à une tension assignée de $U_N = 21$ kV sont indiquées dans le Tableau 1.

Pour utiliser le Tableau 1, la précision des valeurs caractéristiques doit être calculée suivant les spécifications de l'instrument. Ces valeurs font référence aux mesures réalisées sur les objets en essai protégés par une garde, ce qui entraînera un écart de la caractéristique des valeurs calculées. La valeur maximale de cet écart doit être inférieure aux limites exigées.

Pour les tensions assignées supérieures à 21 kV, il convient que la détermination de ces valeurs fasse l'objet d'un accord particulier.

Tableau 1 – Valeurs maximales du facteur de dissipation diélectrique de barres et bobines uniques à l'état neuf équipées d'électrodes à anneau de garde jusqu'à une tension assignée de $U_N = 21$ kV

Valeurs caractéristiques mesurées à température ambiante		
1	valeur initiale de $\tan \delta$ à $0,2U_N$ – $\tan \delta_{0,2}$	20×10^{-3}
2	delta $\tan \delta$ par $0,2U_N$ jusqu'à U_N – $\Delta \tan \delta / 0,2U_N$	5×10^{-3}
3	«tip-up» du $\tan \delta$ entre $0,6U_N$ et $0,2U_N$ – $(\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2})$	5×10^{-3}

Les valeurs du Tableau 1 sont également applicables pour les objets en essai à isolation VPI globale, selon 5.3, imprégnés dans les simulations d'encoche.

En plus de la feuille de données des résultats d'essai, un diagramme représentant la courbe du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la tension serait utile pour faciliter l'interprétation des résultats d'essai. Les conclusions suivantes peuvent être établies à partir des données types des barres ou bobines neuves.

- 1) Une résistance de contact trop élevée de l'électrode de mesure appliquée peut affecter les résultats de $\tan \delta$ en présentant une valeur supérieure à la valeur réelle à basse tension suivie de valeurs en décroissance («tip-up» du facteur de dissipation diélectrique négatif) sur les premiers intervalles de tension. Dans ce cas, l'augmentation de la tension provoquera un allumage de points de contact supplémentaires, diminuant ainsi la résistance de contact.
- 2) Un «tip-up» négatif du facteur de dissipation diélectrique peut également apparaître pour certains types de conceptions de barres et bobines utilisant un écran de conducteur interne, si la résistance de contact entre l'écran de conducteur interne et les brins de cuivre diminue lorsque la tension augmente.
- 3) Si l'isolation n'est pas bien polymérisée, il est possible que la valeur du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta_{0,2}$ soit plus grande en raison de pertes de polarisation plus importantes du polymère.
- 4) La valeur de capacité de la barre ou de la bobine en essai est une mesure permettant l'imprégnation et la polymérisation correcte de l'isolation principale. La capacité $C_{0,2}$ à une basse tension de $0,2 U_N$ peut être utilisée pour calculer la permittivité diélectrique relative du système d'isolation en exploitant les valeurs de conception géométriques de la barre ou de la bobine.
- 5) Une augmentation progressive du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la tension d'essai est inévitable, même sur des barres/bobines produites avec une VPI de haute qualité car l'isolation au mica inclut toujours un microdélaminage à l'intérieur des petites particules de mica anisotropiques. Cependant, si une partie de l'isolation n'est pas complètement imprégnée, cela se caractérisera par une augmentation significative du «tip-up» du facteur de dissipation diélectrique.

Pour les barres et bobines vieilles qui ont subi un essai du facteur de dissipation diélectrique après leur retrait d'un stator ayant fonctionné durant plusieurs années, on peut réaliser l'interprétation suivante des résultats d'essai.

- 1) Une forte augmentation du facteur de dissipation diélectrique commençant largement en dessous de la tension phase-terre est le signe d'un délaminage important entre le conducteur et l'isolation ou d'un délaminage entre les couches d'isolation à l'intérieur de

l'isolation principale, dû à de fortes contraintes de fonctionnement ou à une flexion excessive durant la procédure d'extraction.

- 2) La variation de capacité $\Delta C / 0,2 U_N$ pour une augmentation de la tension ainsi que les valeurs d'augmentation du facteur de dissipation diélectrique $\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$ sont des mesures adaptées pour identifier le contenu des vacuoles et le délaminage de l'isolation principale.
- 3) Dans le cas de systèmes d'isolation électriques plus anciens, par exemple à base d'asphalte ou de gomme laque, le vieillissement à long terme est susceptible de détériorer le matériau organique du système d'isolation, ce qui pourrait augmenter la valeur initiale du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta_{0,2}$.
- 4) S'il est nécessaire de décider quelles barres d'un enroulement retiré il convient de réutiliser, une courbe de distribution statistique de Gauss des valeurs $\Delta \tan \delta / 0,2 U_N$ de l'ensemble des barres est susceptible d'aider à distinguer le bon ou le mauvais état de l'isolation principale.
- 5) Si les barres vieilles sont mesurées avec des électrodes de garde à la surface du revêtement de protection anti-effluves rubané, l'influence éventuelle d'une contamination au niveau des développantes doit être prise en compte.

6.3 Enroulements complets

Il convient de soumettre chaque enroulement statorique complet neuf à des mesures du facteur de dissipation diélectrique afin de contrôler la qualité de fabrication. Les résultats d'essai sont fortement influencés par le revêtement de protection anti-effluves des développantes. Par conséquent, aucune limite n'est fournie.

De plus, les enroulements statoriques complets vieillis peuvent être soumis à des mesures du facteur de dissipation diélectrique durant les travaux d'entretien de la machine afin d'évaluer l'état de l'isolation. Là encore, les conditions ambiantes et les conditions de surface du revêtement de protection anti-effluves influencent les mesures, c'est pourquoi aucune limite absolue ne peut être imposée. Cependant, une analyse de tendance de ces données au fil du temps peut permettre une évaluation de l'état. Une modification du facteur de dissipation diélectrique au cours de la durée en service peut résulter de processus de détérioration. Si l'on observe une tendance constante à l'augmentation du facteur de dissipation diélectrique, un examen visuel de la machine ainsi que la réalisation d'autres essais de diagnostic peuvent être appropriés. Pour les enroulements vieillis en service, une tension d'essai réduite à 0,6 de la tension assignée pourrait faire l'objet d'un accord entre les deux parties.

Une combinaison de facteurs électriques, thermiques, mécaniques et environnementaux peut affecter le système d'isolation.

Ces contraintes peuvent provoquer:

- un délaminage entre les couches d'isolation;
- un délaminage entre une couche d'isolation et le conducteur;
- une abrasion de la surface extérieure de l'isolation;
- sur les anciens systèmes d'isolation, une fissuration circonférentielle, plus probablement dans le prolongement de la partie droite;
- une contamination des développantes de la machine due, par exemple, à l'effet de couronne (dans les machines à refroidissement pas air), à un dépôt d'huile et de poussière, etc.

Le facteur de dissipation diélectrique mesuré sur un enroulement complet représente la valeur moyenne sur l'ensemble de l'échantillon. Pour cette raison, cet essai ne répond pas nécessairement à la seule partie la plus fortement détériorée de l'enroulement. C'est-à-dire que l'essai ne peut pas déterminer si un facteur de dissipation diélectrique élevé est dû à un nombre important de bobines/barres dans la phase contenant individuellement un faible nombre de petites vacuoles, ou s'il est dû à une bobine ou une barre unique fortement

détériorée. Ce dernier cas est potentiellement plus grave du point de vue de la longévité de l'enroulement. Dans le cas où l'on enregistre des valeurs élevées du facteur de puissance ou du «tip-up», il peut être nécessaire de procéder à une division supplémentaire de l'enroulement en parallèle ou groupes de bobines individuels pour s'assurer de l'étendue des dommages éventuels. Cette subdivision peut ne pas être pratique. En variante, on peut réaliser des mesures de décharges partielles à l'arrêt et en fonctionnement conformément aux normes IEC applicables.

La configuration de mise à la terre est un élément important à prendre en compte lors de la réalisation des mesures du facteur de dissipation diélectrique sur des enroulements complets (voir 5.3). Tandis que certains instruments de mesure sont capables de fonctionner avec des objets en essai reliés à la terre, cela peut ne pas toujours être le cas. Si l'instrument n'est pas conçu pour réaliser des mesures sur des objets d'essai mis à la terre, la terre du noyau ou du support de l'enroulement doit être déconnectée de la masse. Alors que cette action peut être possible dans les usines et les installations de réparation en général, ce type de déconnexion est impossible sur les machines installées. Par conséquent, l'alimentation électrique et l'instrument de mesure sont exploités sans raccordement à la terre.

NOTE Pour des raisons de sécurité, dans le cas d'objets d'essai reliés à la terre et si des instruments de mesure sans raccordement à la masse sont utilisés, il est souhaitable que des personnes ayant une formation et une expérience appropriées réalisent ce type de mesure.

Les matériels connectés, par exemple les câbles, les gaines à barres, les transformateurs des instruments, etc., doivent être déconnectés de l'enroulement pour éviter les influences perturbatrices. De plus, le rotor, les paliers, les capteurs de température à résistance de l'encoche, l'écran de l'instrument, etc. doivent être solidement raccordés à la carcasse pour avoir le même potentiel durant l'essai (potentiel de terre dans le cas d'un objet relié à la terre, potentiel flottant de la carcasse dans le cas d'un objet non relié à la terre)

Sur les générateurs refroidis à l'hydrogène, il est recommandé de réaliser la mesure du facteur de dissipation diélectrique dans une atmosphère d'air normale afin de déduire les informations sur les tendances concernant l'état de vieillissement du système d'isolation, telles que le délaminage. Des mesures réalisées sous pression opérationnelle d'hydrogène supprimeront l'activité de décharge partielle dans les vacuoles.

Le principe de mesure de l'essai du facteur de dissipation diélectrique n'est pas efficace pour détecter les points faibles individuels de l'enroulement et, par conséquent, il n'est pas destiné à cette application. Cependant, les mesures des décharges partielles à l'arrêt et en fonctionnement suivant l'IEC TS 60034-27 et l'IEC TS 60034-27-2 sont susceptibles d'identifier les décharges partielles au niveau des points faibles locaux de l'isolation à un stade précoce.

7 Rapport d'essai

7.1 Généralités

Il convient que le rapport d'essai contienne toutes les données nécessaires pour permettre une analyse de la qualité du système d'isolation d'un enroulement neuf et une analyse ultérieure des tendances du vieillissement opérationnel de l'isolation d'un enroulement statorique.

Dans le cas de bobines/barres individuelles, chaque objet d'essai doit avoir la même nomenclature dans la feuille d'essai que celle marquée sur l'objet lui-même. Il convient d'enregistrer ces trois valeurs caractéristiques données dans le Tableau 1 par des moyens appropriés pour référence ultérieure.

7.2 Bobines, barres et enroulement neufs

Pour les machines neuves, la mesure du facteur de dissipation diélectrique fait partie de la procédure d'essai globale de la qualité, qui est documentée en détail. Par conséquent, il

convient de répertorier les résultats de mesure des essais du facteur de dissipation diélectrique sur les barres ou bobines individuelles et l'enroulement complet dans la documentation de la machine. Il convient de fournir les informations suivantes dans le rapport d'essai:

Données relatives à la machine

- fabricant/nom du projet
- type et numéro de série
- année de fabrication
- tension assignée
- courant assigné
- puissance assignée
- facteur de puissance assigné
- fréquence assignée
- classe d'isolation thermique/température de l'enroulement maximale autorisée
- type de système d'isolation
- système de refroidissement/réfrigérant du stator
 - refroidissement indirect: air/hydrogène
 - refroidissement direct: air/hydrogène/eau

Conditions d'essai et matériel d'essai

- nom et numéro de la spécification d'essai décrivant la procédure d'essai
- schéma du circuit d'essai utilisé
- matériel d'essai
- précision du matériel d'essai
- organisation responsable des essais et de l'assurance qualité
- emplacement et date des essais
- température ambiante
- humidité relative
- pression de l'air ambiant
- fréquence d'essai
- pour les enroulements statoriques complets: température de l'enroulement, conductivité de l'eau de réfrigération
- noms du spécialiste des essais et du contresignataire
- pour les barres et bobines uniques: type de technique de garde

Résultats de mesure

- tableau des valeurs du facteur de dissipation diélectrique et de la capacité à différents paliers de tension
- tableau des valeurs caractéristiques $\tan \delta_{0,2}$, $\Delta \tan \delta / 0,2U_N$, $\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}$, $C_{0,2}$
- graphique du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la tension

7.3 Enroulement vieilli en fonctionnement

Lors de la mesure de l'isolation d'un enroulement statorique vieilli, au cours d'un arrêt pour entretien sur site, un rapport d'essai spécial doit être établi, incluant les informations suivantes:

Données relatives au propriétaire

- propriétaire/utilisateur
- nom de l'installation/localisation
- unité

Données relatives à la machine

- fabricant/nom du projet
- type et numéro de série
- année de fabrication
- enroulement original/date de rembobinage
- tension assignée
- courant assigné
- puissance assignée
- facteur de puissance assigné
- fréquence assignée
- classe d'isolation/température de l'enroulement maximale autorisée
- système d'isolation
- système de refroidissement/réfrigérant du stator
 - refroidissement indirect: air/hydrogène
 - refroidissement direct: air/hydrogène/eau

Données de fonctionnement (le cas échéant)

- mode de fonctionnement (continu/intermittent)
- commande par onduleur
- nombre d'heures de fonctionnement total et/ou équivalent à ce jour
- nombre total de démarrages à ce jour, si possible classés par catégories de démarrage à chaud, démarrage à température plus chaude que la température ambiante, et démarrage à froid
- nombre de déclenchements soudains à ce jour
- température et conditions maximales de l'enroulement statorique
- température moyenne de l'enroulement statorique
- événements importants ayant imposé des contraintes à la machine à ce jour

Conditions d'essai et matériel d'essai

- nom et numéro de la spécification d'essai décrivant la procédure d'essai
- schéma du circuit d'essai utilisé
- matériel d'essai
- précision du matériel d'essai
- organisation responsable des essais et de l'assurance qualité

- emplacement et date des essais
- fréquence d'essai
- température ambiante
- humidité relative
- pression de l'air ambiant
- température de l'enroulement,
- conductivité de l'eau de réfrigération,
- noms du spécialiste des essais et du contresignataire
- pour les barres et bobines uniques: type de technique de garde

Résultats de mesure

- tableau des valeurs du facteur de dissipation diélectrique et de la capacité à différents paliers de tension
- tableau des valeurs caractéristiques $\tan \delta_{0,2}$, $\Delta \tan \delta_{0,2} U_N$, $\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}$, $C_{0,2}$
- graphique du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la tension

Annexe A (informative)

Relation entre le facteur de puissance et le facteur de dissipation

Comme indiqué au 4.1, la caractéristique de perte privilégiée et exclusivement utilisée dans la présente Norme internationale est le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$, qui est défini par le rapport entre le courant I_R en phase avec la tension appliquée U et le courant quadratique I_C , comme indiqué dans le diagramme de phase de la Figure A.1. Ce rapport est donné par l'Equation (A.1).

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (\text{A.1})$$

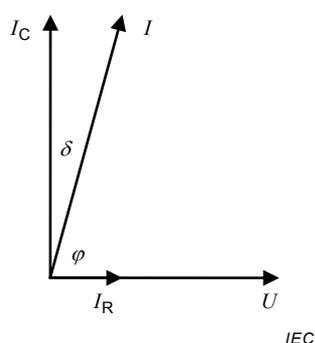


Figure A.1 – Diagramme de phase

Un autre paramètre, couramment utilisé en Amérique de Nord, dans le diagnostic de l'isolation est le facteur de puissance diélectrique (PF en anglais). Le facteur de puissance est défini comme le rapport entre le courant en phase avec la tension appliquée I_R et le courant total I (voir l'Equation A.2).

$$PF = \frac{I_R}{I} \quad (\text{A.2})$$

La relation entre le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ et le facteur de puissance PF est présentée dans l'Equation (A.3).

$$PF = \frac{\tan \delta}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta}} \quad (\text{A.3})$$

Une comparaison du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ et du facteur de puissance d'isolation parfois utilisé par ailleurs $\cos \varphi$ montre que ces valeurs sont très proches, si le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ est inférieur à 100×10^{-3} , ce que l'on peut présumer pour l'ensemble des systèmes d'isolation d'enroulement statorique modernes.

Le Tableau A.1 ci-après est fourni afin de permettre une comparaison entre les valeurs du facteur de puissance diélectrique et du facteur de dissipation diélectrique.

Tableau A.1 – Comparaison entre les valeurs de corrélation du facteur de puissance diélectrique $\cos \varphi$ et du facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ et leur différence

Facteur de puissance diélectrique $\cos \varphi$	Angle φ (degré)	Angle δ (degré)	Facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$	Différence
$5,000 \times 10^{-3}$	89,713 520	0,286 480	$5,000 \times 10^{-3}$	$< \pm 0,001 \times 10^{-3}$
$10,000 \times 10^{-3}$	89,427 033	0,572 967	$10,000 \times 10^{-3}$	$< \pm 0,001 \times 10^{-3}$
$20,000 \times 10^{-3}$	88,854 008	1,145 992	$20,004 \times 10^{-3}$	$\pm 0,004 \times 10^{-3}$
$50,000 \times 10^{-3}$	87,134 016	2,865 984	$50,063 \times 10^{-3}$	$\pm 0,063 \times 10^{-3}$
$100,000 \times 10^{-3}$	84,260 830	5,739 170	$100,504 \times 10^{-3}$	$\pm 0,504 \times 10^{-3}$

Bibliographie

- [1] EN 50209 (1998), *Essai de l'isolation des barres et des bobines des machines à haute tension*
 - [2] IEEE 286 (2000), *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation* (disponible en anglais seulement)
 - [3] PÜTTER, M.; KRÜGER, M.; KOCH, M.; HULKA, L., Laboratory and Field Measurements on Transformer Insulations with Different Dissipation Factor test Methods, 11th Insucon Conference, Birmingham, UK 2009, pp. 20 – 26 (disponible en anglais seulement)
 - [4] MOORE, W.J.M., MILJANIC, P.N., The Current Comparator. IEE Electrical Measurement Series 4; Peter Peregrinus Ltd, UK, 1988 (disponible en anglais seulement)
 - [5] IEC TS 60034-27, *Machines électriques tournantes – Partie 27: Mesures à l'arrêt des décharges partielles effectuées sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes*
 - [6] IEC TS 60034-27-2, *Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines* (disponible en anglais seulement)
-

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