

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Rotating electrical machines –
Part 27-4: Measurement of insulation resistance and polarization index of
winding insulation of rotating electrical machines**

**Machines électriques tournantes –
Partie 27-4: Mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation sur
le système d'isolation des enroulements des machines électriques tournantes**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2018 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
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 - webstore.iec.ch/advsearchform

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 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 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: sales@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 - webstore.iec.ch/advsearchform

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 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 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: sales@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Rotating electrical machines –

Part 27-4: Measurement of insulation resistance and polarization index of winding insulation of rotating electrical machines

Machines électriques tournantes –

Partie 27-4: Mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation sur le système d'isolation des enroulements des machines électriques tournantes

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.160.01

ISBN 978-2-8322-5252-9

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.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	8
4 Insulation resistance – components and influence factors.....	10
5 Polarization index.....	10
6 Measurement.....	11
6.1 Influences on the measurement of the insulation resistance.....	11
6.1.1 General	11
6.1.2 Winding temperature correction	11
6.2 Measuring equipment.....	12
6.3 Test object and measuring circuit.....	13
6.3.1 General	13
6.3.2 Three-phase stator windings.....	13
6.3.3 Other windings	14
6.4 Measuring voltage.....	15
6.4.1 Type and magnitude	15
6.4.2 Polarity.....	15
6.5 Measuring time	15
6.6 Safety	15
6.7 Measurement procedures.....	15
6.7.1 Standard procedure	15
6.7.2 Special procedures.....	16
7 Interpretation of measurement results.....	16
7.1 General.....	16
7.2 Suitability for testing and operation	16
7.3 Trending of insulation condition	17
7.4 Comparison between machines or between phases	17
7.5 Effects at very high values of insulation resistance	17
7.6 Limitations of the insulation resistance test.....	17
8 Recommended limits of insulation resistance and polarization index.....	18
8.1 General.....	18
8.2 Insulation resistance	18
8.3 Polarization index	18
9 Test report.....	19
9.1 Operational aged windings	19
9.2 New windings.....	20
Annex A (informative) Components of the direct current	21
A.1 Total current I_T	21
A.2 Capacitive current I_C	21
A.3 Conduction current I_G	22
A.4 Polarization current I_P	23
A.5 Surface leakage current I_L	24
A.6 Stress control coating current I_S	24

Annex B (informative) Graphical estimation of the slope parameter X for temperature correction from measurement data	25
Annex C (informative) Examples of test results of synthetic resin based high voltage windings	27
C.1 Machine with dry and clean surface of the insulation	27
C.2 Machine with a wet and contaminated surface	28
C.3 Machine with continuous stress control layers in galvanic contact with high voltage conductors	29
C.3.1 Stress control coating current I_S	29
C.3.2 Effects on insulation resistance and polarization index	30
C.3.3 Examples of test results	30
Annex D (informative) Measurement of leakage current to assess interphase insulation resistance	32
Annex E (informative) Other DC tests	34
E.1 General	34
E.2 Dielectric absorption ratio (DAR)	34
E.3 Monitoring charge and discharge currents	35
E.4 High voltage DC tests	37
E.4.1 General	37
E.4.2 Uniform-time voltage step test	37
E.4.3 Graded-time voltage step test	37
E.4.4 Ramped-time voltage step test	37
E.5 Wet insulation resistance measurement	38
Bibliography	39
Figure 1 – Equivalent circuit diagram of winding insulation in a DC voltage test	10
Figure 2 – Connection for testing of the entire winding	14
Figure 3 – Connection for phase-to-earth measurement	14
Figure A.1 – Relationships between different currents and time	21
Figure B.1 – Graphical estimation of the slope parameter X in a semi-logarithmic diagram	26
Figure C.1 – Total current versus time on a clean and dry insulation. The scales are logarithmic	27
Figure C.2 – Insulation resistance versus time on a clean and dry insulation	28
Figure C.3 – Total current versus time on a wet and contaminated insulation	28
Figure C.4 – Insulation resistance versus time on a wet and contaminated insulation	29
Figure C.5 – Total current versus time on a dry and clean surface with a continuous stress control coating	30
Figure C.6 – Insulation resistance versus time on a dry and clean surface with a stress control coating	31
Figure D.1 – Connection for phase-to-phase measurement. The test instrument shall be floating with respect to earth. Other phase to phase combinations are permitted	32
Figure D.2 – Measurement of interphase leakage current with a measurement instrument equipped with a guard connection	33
Figure D.3 – Measurement of interphase leakage current with a measurement instrument not equipped with a guard connection	33
Figure E.1 – Measurement of current and insulation resistance that results in a DAR of 1,09	35

Figure E.2 – Charge and discharge currents after a step voltage of 2,5 kV for the three-phase windings of a 50 MVA hydro-generator: 36

Table 1 – Values of the parameter X for the temperature correction 12

Table 2 – Guidelines for DC voltage magnitudes to be applied during the insulation resistance measurement 15

Table 3 – Recommended minimum insulation resistance values at a base temperature of 40 °C 18

Table 4 – Recommended minimum values of polarization index for high voltage insulation systems 19

Table B.1 – Example data from insulation resistance measurements at different winding temperatures 25

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 27-4: Measurement of insulation resistance and polarization index of 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 60034-27-4 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
2/1880/FDIS	2/1890/RVD

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

This document 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.

NOTE A table of cross-references of all IEC TC 2 publications can be found in the IEC TC 2 dashboard on the IEC website.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

INTRODUCTION

This document provides guidelines for measurement of the insulation resistance and the polarization index on stator and rotor winding insulation of rotating electrical machines. The document also describes typical insulation resistance characteristics, the effect of influential factors which impact or change these characteristics, and how these characteristics indicate winding condition. It recommends minimum acceptable values of insulation resistance for AC and DC rotating machine windings. Interpretation will depend on the nature of the insulation materials – specifically if the insulation is of the thermoset or thermoplastic type.

Insulation resistance measurement has been recommended and used for over 50 years to evaluate the condition of electrical insulation. It is recommended to track periodic measurements, accumulated over months and years of service or in connection with servicing and overhaul of rotating machines.

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, possible repair options and the recommended time interval between tests. These measurements give no indication of local weak points in the insulation system and the trend evaluations cannot be used to predict the time to failure of the winding insulation.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 27-4: Measurement of insulation resistance and polarization index of winding insulation of rotating electrical machines

1 Scope

This part of IEC 60034 provides recommended test procedures for the measurement of insulation resistance and polarization index of stator and rotor winding insulation of rotating electrical machines.

This document recommends minimum acceptable values of insulation resistance and polarization index of winding insulation valid for fully processed low and high voltage AC and DC rotating electrical machines with a rated power of 750 W or higher.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-411, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 411: Rotating machinery*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-411 and the following apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

rated voltage

<for an electric machine> rated line-to-line voltage for a three-phase AC machine, line-to-earth voltage for a single phase machine and rated direct voltage for DC machines or field windings

3.2

insulation resistance

R_{it}

<for an electric machine> capability of the electrical insulation of a winding to resist direct current and is determined by the quotient of the applied direct voltage divided by the total current across the machine insulation, taken at a specified time t from start of voltage application

Note 1 to entry: The voltage application time is usually 1 min (R_{i1}) and 10 min (R_{i10}); however other values can be used. Unit conventions: subscript values of 1 through 10 are assumed to be in minutes, subscript values of 15 and greater are assumed to be in seconds.

Note 2 to entry: Insulation resistance is sometimes abbreviated as IR.

3.3

polarization index

PI

quotient of the insulation resistance measured at two different times, usually $t_1 = 1$ min and $t_{10} = 10$ min after application of the direct voltage, that is an indicator of the condition of the insulation

Note 1 to entry: Other times are discussed in Clause E.2.

3.4

polarization current

I_P

current resulting from polarization processes, which decays with time of DC voltage application at a decreasing rate from an initial value to essentially zero

Note 1 to entry: The polarization current is also called absorption current.

3.5

conduction current

I_G

<for an electric machine> ohmic current that is constant with time and passes through the bulk of the main insulation

3.6

surface leakage current

I_L

ohmic current that is constant with time and passes over the surface of the end windings of the stator winding or between exposed conductors and the rotor body in insulated rotor windings if there are depositions of conductive materials, e.g., moisture or contamination

3.7

capacitive current

I_C

<for an electric machine> current of comparatively high magnitude and short duration (typically < 1 s), which decays exponentially with time of DC voltage application

3.8

stress control coating current

I_S

ohmic current that is constant with time, flowing in parallel to the surface leakage current through a continuous stress control coating on the surface of the end winding insulation between conductor and earth

3.9

total current

I_T

time dependent current, which is usually measured during insulation resistance measurement and is the sum of all current components

Note 1 to entry: The total current is the basis for the determination of the insulation resistance R_{it} and the polarization index PI .

3.10

polarity effect

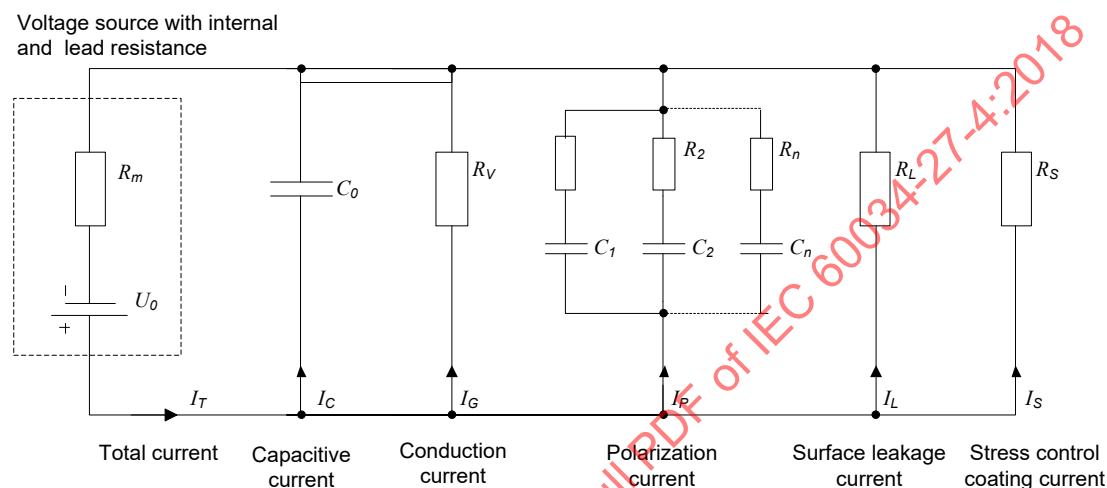
effect of obtaining different values of the insulation resistance R_{it} when the polarity of the insulation resistance meter leads are reversed

Note 1 to entry: This is observed when humidity is present in the insulation. It is caused by a phenomenon known as electro-endosmosis.

4 Insulation resistance – components and influence factors

The insulation resistance of a rotating machine winding is a function of the type and condition of the insulating materials, the insulation system design and the techniques used to manufacture the winding.

The insulation resistance is measured with DC voltage. The measurement of the resistance over time provides information on current components caused by different physical mechanisms. Figure 1 is a schematic showing the different direct current components. Information on the various current components is provided in Annex A.



IEC

Figure 1 – Equivalent circuit diagram of winding insulation in a DC voltage test

5 Polarization index

The polarization index is the quotient of the insulation resistances measured at two different times $t_1 = 1$ min and $t_{10} = 10$ min after application of direct voltage:

$$PI = \frac{R_{i10}}{R_{i1}} \quad (1)$$

Variants of the polarization index definition with a quotient of insulation resistance of other measuring times may be used in special applications and need to be indicated (see Annex E). More measurement points during the 10 min interval may yield additional information.

The polarization index describes the variation of the IR between two specific points in time and therefore, better than with a single insulation resistance value, it may indicate contamination and/or moisture deposition on the winding, or absorbed moisture in the winding. However, it may not indicate internal voids caused by improper impregnation or thermal deterioration.

The polarization index can be used to estimate the suitability of the winding for application of a voltage withstand test or for operation. It may provide information for assessing the condition of the insulation system.

Owing to the negligible polarization currents in the time interval from 1 min to 10 min, the determination of the polarization index may not apply for small machines with random-wound windings, for the field windings in generator rotors, for non-insulated field and squirrel-cage rotor windings and for DC machine armatures.

The polarization index depends on the type of the insulation system, especially on the nature of the insulation materials and procedures used for winding manufacture (for synthetic resin based or shellac- and asphalt based, see 7.1). Furthermore it depends on the kind of stress control coating (see Clause C.3) and the magnitude of the test voltage (see 6.4.1). The influence of the temperature on the polarization index is not significant under the condition that the winding temperature is constant between the 1 min and 10 min readings of the insulation resistance (see 6.1.2).

Before a winding is recommended for a voltage withstand test or for operation, the polarization index should have a minimum value (see recommendations in 8.3).

6 Measurement

6.1 Influences on the measurement of the insulation resistance

6.1.1 General

The resistance measurement result depends on environmental factors, mainly on the winding temperature and on the humidity content of the air. The winding temperature influence can be obtained from empirical data or an experimental measurement and used for the correction of measurement results taken at different temperatures (see 6.1.2).

The air relative humidity affects the surface leakage current and can usually not be estimated, as its effect further depends on the air temperature, surface properties of the insulation and the nature of any surface contamination. For this reason it is generally recommended to perform insulation resistance measurements at winding temperatures above the dew point.

6.1.2 Winding temperature correction

The variation of temperature affects all of the identified current components, except the capacitive current I_C , because an increase in temperature supplies thermal energy, which frees additional charge carriers and so reduces resistivity. Therefore the insulation resistance value of a winding depends on the winding temperature.

To allow a comparison of insulation resistance values obtained at different temperatures it is recommended that all IR values measured be corrected to a common base temperature of 40 °C, if applicable (see Table 1). If the R_i after 1 min of voltage application is > 5 GΩ, or if the R_i for a synthetic resin based insulation system is measured at a temperature less than 40 °C, then no correction is needed [4]. Otherwise the correction factor is calculated using Formula (2):

$$K_T = 0,5^{\frac{40-T}{X}} \quad (2)$$

Where

40 is the base temperature (°C);

T is the winding temperature (°C);

X is the slope parameter for an insulation system (K).

Formula (2) is based on Formula (A.3), taking into account all relevant current components.

NOTE 1 This formula expresses that the IR is reduced by half, if the winding temperature T increases by X Kelvin. The same empirical relation can be equally expressed by exponential functions with other bases, like e . The slope parameter can be directly transformed, in case of a basis e by dividing X with $-\ln(0,5)$.

NOTE 2 Base temperatures other than 40 °C can be used, e.g. 20 °C.

R_i at the base temperature is obtained by multiplying the resistance value measured at a winding temperature T with the correction factor K_T (Formula (3)):

$$R_{ic} = R_{iT} \times K_T \quad (3)$$

where

R_{ic} is the insulation resistance corrected to the base temperature (M Ω);

R_{iT} is the measured insulation resistance at winding temperature (M Ω);

K_T is the temperature correction factor.

The slope parameter X in Formula (2) characterizes the degree of insulation resistance temperature dependency of an individual insulation system. Preferably, this parameter is estimated experimentally. The recommended method is by performing IR measurements at several winding temperatures in the expected range where measurements may be made, including 40 °C, all above the dew point, and plotting the results on a semi-logarithmic scale. From the result of an exponential approximation the slope parameter X can be derived. An example for the procedure is given in Annex B. If experimental data are not available for an insulation system, the values for X in Table 1 can be used, Table 1 is based on empirical data, and there is no apparent reason for the discontinuity at 40 °C.

The temperature correction with an exponential approximation by equations 2 and 3 can cause significant errors with an increasing difference between winding temperature and base temperature. It is recommended to apply this method only for a winding temperature range as given in Table 1, which is derived from experimental measurements.

NOTE 3 If different insulation systems are used in the slot and the end winding regions, then it is the insulation system in the slot region that is relevant for temperature correction.

Table 1 – Values of the parameter X for the temperature correction

Types of insulation system	Slope parameter X K	Temperature range °C
Shellac and asphaltic based	10	10 to 60
Synthetic resin based	No correction ($K_T = 1$)	10 to 40
(e.g. epoxy, polyester, polyesterimide and others)	17	40 to 60

These values are based on experiments and are considered to be a conservative approach, i.e. minimum values. Typically the temperature dependency (Formula 2) is smaller, i.e. the slope parameter is higher.

For the estimation of the polarization index PI , the temperature correction is not required as the difference in winding temperature during the measurement of R_{i1} and R_{i10} is considered to be negligible.

6.2 Measuring equipment

For direct measurement the preferred equipment is an insulation resistance meter. For R_{i1} readings below 5 000 M Ω , a digital instrument should have at least the following characteristics:

- Display: 3 digits
- Accuracy: ± 5 % of reading, ± 5 digits

If no insulation resistance meter is available, the insulation resistance can be obtained from a measurement of voltage and current (indirect measurement). For such indirect measurements

a stabilized DC voltage source, a voltmeter and a micro ammeter can be used. The voltage fluctuation of a real DC voltage source will introduce a variation of $i_c(t) = C_0 \, dU_0/dt$. Since the capacitance C_0 of most high voltage machines is large, a minimum stability and noise is required for the DC supply to neglect this effect. The insulation resistance is calculated from the volt- and ammeter readings using Formula (4).

$$R_{it} = U / I_t \quad (4)$$

where

R_{it} is the insulation resistance (M Ω) at time t;

U is the measured voltage (voltmeter reading) of the DC voltage source (V);

I_t is the measured current (ammeter reading) (μ A) at time t.

For the measurement of high IR values a meter with guard option is recommended, to avoid leakage and capacitive influences from the measuring cable.

The instrumentation shall take no more than 5 s to reach the test voltage.

6.3 Test object and measuring circuit

6.3.1 General

Depending on the aim of the test and the design of the test object, different measuring circuits apply. For checking the recommended minimum IR the test shall be performed on the entire winding. In order to check for insulation problems on each phase winding and between phase windings, measurements shall be performed phase by phase if each phase winding can be easily disconnected from one another. For trending purposes, the same connection shall always be applied.

If possible, external elements such as cables, switches, capacitors, current transformers, etc. shall be disconnected from the winding. Items still connected to the winding need to be recorded.

To obtain insulation resistance measurements on directly water-cooled windings, the water should be removed and the internal circuit thoroughly dried. In some water-cooled windings the manufacturer may have provided a means of measuring the insulation resistance without the need for the coolant to be drained. In general, if the water is not removed then the conductivity of the water should be less than what is recommended by the machine manufacturer. In this case, the water conductivity will largely dominate the insulation resistance; and thus $PI = 1$ and $R_{i10} = 1 \text{ M}\Omega$ may be expected.

In any case the winding elements that are not under test shall be connected with short leads to machine earth to avoid any undesirable effects, such as equalizing currents or AC current induced to test circuit.

6.3.2 Three-phase stator windings

6.3.2.1 Connection for measurements of the entire winding to earth

All phase windings are connected together as shown in Figure 2.

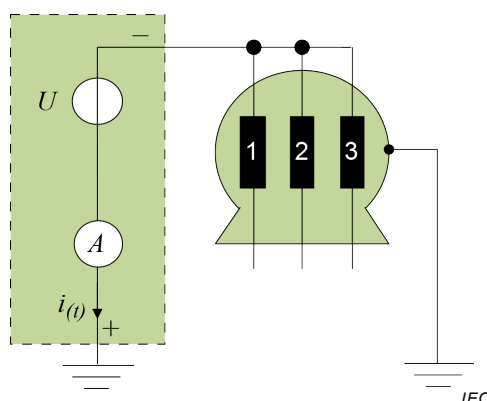


Figure 2 – Connection for testing of the entire winding

6.3.2.2 Connection for phase-to-earth measurements

Testing each phase winding separately (see Figure 3) is the preferred method for trending purposes and to achieve comparative values for the individual phases. The same circuit is applicable for testing more than one phase winding to earth, by connecting the desired phase windings to be tested together and the others to earth.

In case the measuring instrument is equipped with a guard option, instead of connecting the remaining phase windings to earth they can be connected to the guard in order to eliminate the effects from currents between phase windings, like leakage and stress control coating currents. Since this is a deviation from the standard procedure, it has to be noted in the test report.

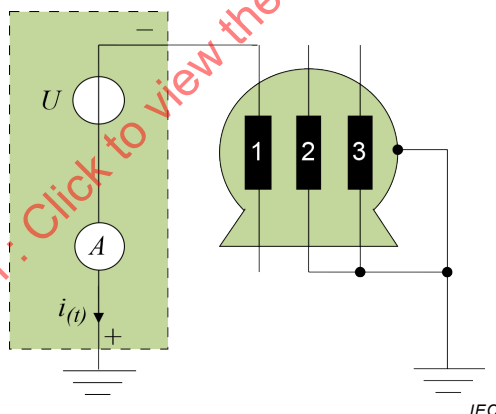


Figure 3 – Connection for phase-to-earth measurement

6.3.2.3 Connection for phase-to-phase measurements

This test is not a standard measurement procedure, however it may provide additional information of a diagnostic nature. See Annex D.

6.3.3 Other windings

Other windings, like field windings or a high voltage rotor winding shall be connected similarly to the phase-to-earth measurement of the stator winding (see 6.3.2.2).

All elements that are not part of the measuring circuit, such as brush rigging from static excitation, need to be disconnected from the test object e.g. by lifting or removing the brushes. Rotating diodes shall be bridged, to avoid problems in the case of winding damage during testing. The same has to be done with permanently installed monitoring equipment such as rotor current monitors or on-line temperature measuring systems.

6.4 Measuring voltage

6.4.1 Type and magnitude

The measurement of the insulation resistance requires the application of a DC voltage. The voltage magnitude shall be restricted to a value appropriate for the voltage rating of the winding and the basic insulation condition. This is particularly important in the case of low voltage machines or wet windings. If the voltage magnitude is too high, it may overstress the insulation and lead to an insulation failure. Guidelines for voltage magnitudes are presented in Table 2.

Table 2 – Guidelines for DC voltage magnitudes to be applied during the insulation resistance measurement

Rated voltage V	DC voltage magnitude V
< 1 000	500
1 000 to 2 500	500 to 1 000
2 501 to 5 000	1 000 to 2 500
5 001 to 12 000	2 500 to 5 000
> 12 000	5 000 to 10 000

NOTE Tests can be performed with higher magnitudes only if it is agreed between test service provider and the customer.

6.4.2 Polarity

Insulation resistance measurements are usually conducted at constant DC voltage having negative polarity. Negative polarity is preferred to accommodate the phenomenon of electro-endosmosis in case of humidity inside the insulation system.

6.5 Measuring time

Readings of the IR are taken after the test voltage has been applied for the specified time, e.g. after one min for insulation resistance R_{i1} and after 10 min for insulation resistance R_{i10} .

6.6 Safety

Due to the polarization effect, the winding insulation will maintain a charge for a long time after the voltage supply has been disconnected. It is important after the test to reduce the test voltage to zero and to earth the test object before the test instrument is disconnected. The earth shall remain applied to the terminals of the phase or winding for at least 4 times the duration of voltage application.

6.7 Measurement procedures

6.7.1 Standard procedure

The test voltage should be applied instantaneously and held constant throughout the test. The test voltage shall be reached in no more than 5 s. The counting of the measuring time starts after reaching the specified test voltage level. The readings are taken after the specified times. There are different procedures for testing all winding phases at the same time and measuring one phase at a time in multiphase windings.

When measuring all phases at the same time in a multiphase winding, or the winding in a single phase winding, after test completion, the test voltage is reduced to zero and for safety reasons, the test object should be immediately short-circuited, earthed and discharged for at least 4 times longer than the time the winding was energized (see 6.6).

In multiphase windings where each phase is tested one at a time (with the other phases earthed), after the test on the first phase is completed, the earth shall be applied and remain applied for at least 4 times longer than the duration of voltage application. As long as the first phase remains earthed, the second and other phases can be tested in turn by connecting the test instrument to it with the other phases earthed. As an alternative, connections can be changed when the discharge current with the terminal earthed is sufficiently low, e.g. 10 nA.

When insulation measurement is an important aspect of maintenance, it is recommended to check the operation of the instrument using high voltage resistances in the range of 100 MΩ. The check should be performed before and after the tests, and is especially important for battery operated instruments.

6.7.2 Special procedures

Other test procedures can be used in order to obtain additional information on the insulation condition. See Annex E.

7 Interpretation of measurement results

7.1 General

The insulation resistance and polarization index results can be used for at least the following purposes:

- a) Estimation of the suitability of a machine for the application of voltage withstand test, or for operation, may be based on obtaining the recommended minimum values for the insulation resistance and/or the polarization index (see 7.2).
- b) The insulation resistance and polarization index history of a given machine, measured at uniform conditions so far as the controllable variables are concerned, is recognized as a useful way of trending some aspects of the insulation condition over years (see 7.3).
- c) The insulation resistance and polarization index values of individual phase windings or of different machines of the same design, measured at uniform conditions so far as the controllable variables are concerned, can be used to compare the insulation conditions.

For these specific purposes a), b) and c) the measurement influences shall be considered (see 7.4).

7.2 Suitability for testing and operation

Insulation resistance and polarization index may be used to estimate the suitability of a machine for the application of a voltage withstand test or for operation. Machines should have both the insulation resistance and the polarization index above the recommended minimum values (see Tables 3 and 4). If the measured values are below the recommended minimum values, a voltage withstand test and operation of the machine are not recommended, unless there is a design reason or there is a past history for such low readings.

Insulation resistance testing may also be used to determine if a winding has failed a voltage withstand test. If the measured values taken after a voltage withstand test are significantly lower than the values before the voltage withstand application, insulation damage may have occurred during the voltage withstand testing, even if the test voltage did not collapse due to high fault currents.

If the measured values are below the recommended minimum values due to dirt or excessive moisture and an insulation defect can be excluded, cleaning and drying the winding may improve the measured results. The insulation resistance readings can be used to monitor the effectiveness of the drying progress.

If the insulation resistance R_{i1} at 40 °C is greater than 5 000 MΩ, the polarization index may be ambiguous and can be disregarded.

For shellac and asphalt based insulation systems, a very high polarization index (for example greater than 8) may indicate that the insulation has been thermally aged, and may have a risk of failure. If physical inspection (tapping on the insulation, for instance) confirms that the insulation is dry and brittle, it is best not to attempt cleaning or voltage withstand testing the winding. Failure may occur at any time if the machine is returned to operation.

7.3 Trending of insulation condition

If the insulation resistance (R_{i1}) history of a machine is available, comparison of the present test result with previous tests will help to assess the insulation condition. It is important, however, to compare tests under similar conditions, that is, winding temperature, voltage magnitude, test duration and relative humidity (see 6.1) and, if possible, the use of identical test equipment. For comparison of tests conducted at different winding temperatures, the results should be corrected to the same base temperature (see 6.1.2).

A sharp decline in the R_{i1} or PI from the previous reading may indicate surface contamination or moisture. When a low PI occurs at an elevated temperature (above 60 °C), a second measurement performed below 40 °C, but above the dew point is recommended as a check on the real insulation condition.

7.4 Comparison between machines or between phases

If R_{i1} is less than 5 000 MΩ for the complete winding, a significant difference in R_{i1} or PI between identical machines, may indicate surface contamination, moisture or insulation damage. In such a case, the reason for the difference should be investigated.

7.5 Effects at very high values of insulation resistance

Depending on the test voltage level and the condition of the insulation, the measured current may not exceed values in the sub-microampere-range. Any noise from external sources, such as voltage fluctuations generated by the test instrument, but also temperature fluctuations and even electrochemical effects caused by moisture, may generate currents that exceed the currents through the insulation. False readings are a consequence of such.

Especially during longer measurements sessions, the conditions can vary so that the results may lead to misinterpretation.

As general advice, the polarization index is not indicative of insulation condition when the insulation resistance reaches values in the range of 5 000 MΩ and above.

It is advisable to consult the manual of the test instrument. All manufacturers should publish the accuracy of the test instrument. This may also help judging the results.

7.6 Limitations of the insulation resistance test

Insulation resistance test data is useful in evaluating the presence of some insulation problems such as contamination, absorbed moisture, or severe cracking; however, some limitations are as follows:

- a) Insulation resistance of a winding is not directly related to its dielectric strength and if the insulation system of a winding will fail in service. The insulation resistance measurements give no indication of the distribution of weak points within the insulation, e.g. large voids caused by improper impregnation and thermal deterioration.

- b) Windings having an extremely large end winding surface area, large or slow-speed machines, round rotor field windings or machines with commutators may have insulation resistance values that are less than the recommended value. In these cases, historical trending of insulation resistance is useful in evaluating insulation condition.
- c) Because insulation resistance tests are conducted while a machine is at standstill, these tests will not detect problems due to rotation, such as loose coils, or vibration leading to end winding movement.

8 Recommended limits of insulation resistance and polarization index

8.1 General

The following insulation resistance and polarization index values are the lowest values at which the winding is recommended for a voltage withstand test or for operation. In some cases, special insulating materials or designs may provide lower values (e.g. at special designs of stress control coatings, see Clause C.3). Minimum values for such machines should be based on comparison with historic data.

The recommended values are not valid for complete windings which have not yet been impregnated.

8.2 Insulation resistance

Table 3 provides recommended minimum insulation resistance values R_{i1} of an entire winding corrected to the base temperature of 40 °C.

**Table 3 – Recommended minimum insulation resistance values
at a base temperature of 40 °C**

Test object	Minimum insulation resistance R_{i1} MΩ
High voltage shellac-and asphalt based insulation systems and all field windings	rated voltage (kV) + 1
High voltage synthetic resin based insulation systems (form-wound windings)	100
Low voltage random- and form-wound windings and DC armatures	5

If the minimum value of insulation resistance for the complete winding is not met, refer to section 6.3.2.2 for additional measurements that may be made. For more information, refer to Annex D.

8.3 Polarization index

Table 4 provides recommended minimum polarization index values of an entire winding. These values are only valid for insulation systems of high voltage machines, in which a characteristic polarization current I_p can lead to a marked change in the readings of the insulation resistance at 1 min and at 10 min.

If the winding temperature does change appreciably between the 1 min and 10 min readings of the insulation resistance, the values corrected to the base temperature of 40 °C are to be used for the calculation of the polarization index.

Table 4 – Recommended minimum values of polarization index for high voltage insulation systems

Types of high voltage insulation system	Minimum polarization index <i>PI</i>
Shellac and asphaltic based	1,5
Synthetic resin based (e.g. epoxy, polyester, polyesterimide and others)	2,0
NOTE These minimum values are based on the ratio of the 10 min to 1 min R_i readings.	

These recommended minimum values are not applicable for:

- Small machines with random-wound windings, machines with non-insulated field windings, squirrel-cage rotor windings and DC machine armatures (see Clause 5)
- Machines with stress control coatings having galvanic contact with the winding connections (see Clause A.6 and Clause C.3)
- Windings where R_{i1} is $>5\,000\text{ M}\Omega$ (see Clause 7.5).

9 Test report

9.1 Operational aged windings

The test report should, as a minimum, provide the data, the test decision and, if used for trending and comparison of insulation conditions, a statement on the interpretation of the measurement results. The test report should contain the following items:

- Identification information
 - Plant name
 - Machine number
- Date of measurement
- Climatic conditions
 - Ambient temperature
 - Winding temperature
 - Relative and ambient temperature to calculate the absolute humidity and dew point
- Instrument
 - Name, type
 - Manufacturer
 - Serial number
 - Calibration due date
- Test circuit, instrument settings and test conditions
 - Test voltage and polarity
 - Duration, if required
- Insulation characteristics at measurement conditions, and corrected to the base temperature:
 - 1 min insulation resistance
 - 10 min insulation resistance, if applicable
 - Polarization index, if applicable
 - Temperature correction, if applicable

- Graphical display of measurement curves, if applicable
 - Measured current vs. time, preferably in a log-log diagram
 - Measured insulation resistance vs. time, preferably in a log-log diagram
- Name of test personnel
- Document specific information
- Comment section e.g. for deviation from standard test procedure, observations, etc.

It is advisable to store the measurement results in the most original data-format for future reference.

Depending on the type of document, standalone test certificate or part of a condition assessment report, the content of the measurement report may be supplemented by additional information, e.g. operational mode, machine age, etc.

9.2 New windings

The insulation resistance measurement for new windings may be a supplementary part of the high voltage withstand test, with a 1 min insulation resistance test before and after the high voltage withstand test.

Consequently, most of the information required for complete reporting is part of the withstand test protocol. A selection of the required information defined in 9.1 may be sufficient.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

Annex A (informative)

Components of the direct current

A.1 Total current I_T

The total current is the sum of all currents caused by the application of the DC test voltage in the test object. It is available for measurement in the leads between voltage source and test object (Figure 1).

The general time characteristics of the total current and the contribution of the components are shown in Figure A.1. Examples for specific insulation conditions are given in Annex C.

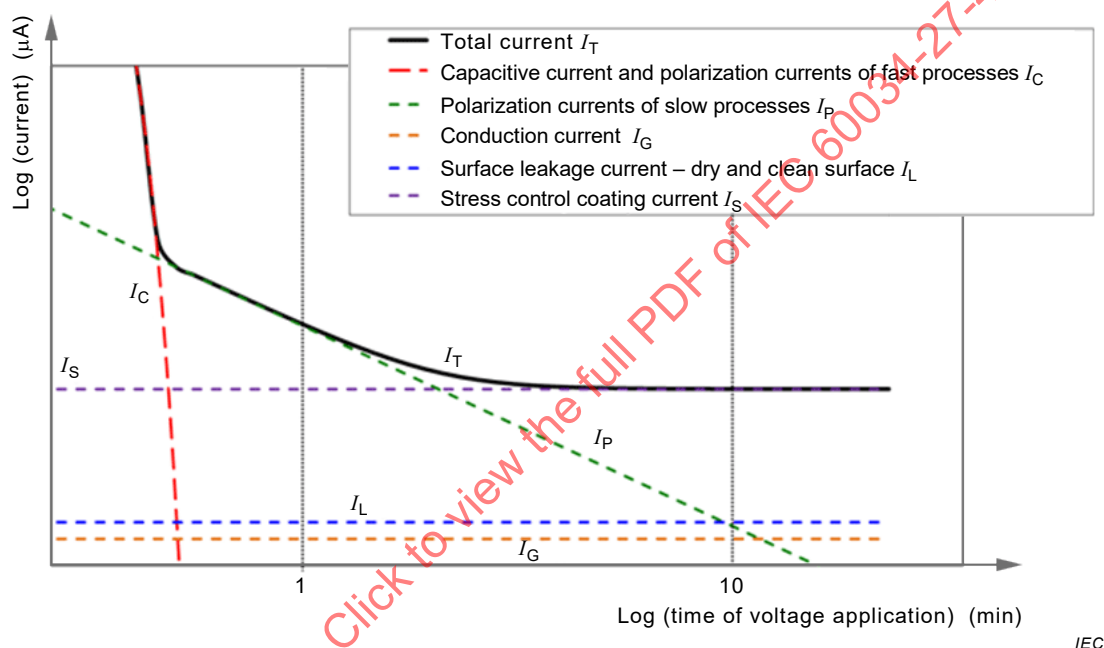


Figure A.1 – Relationships between different currents and time

A.2 Capacitive current I_C

The capacitive current is caused by charging or discharging the capacitance of the winding via the circuit resistance, consisting of the internal resistance of the voltage source and the lead resistances. The capacitive current $i_c(t)$ depends on time (t) in seconds according to Formula (A.1).

$$i_c(t) = \frac{\Delta U_0}{R_m} \cdot e^{-\frac{t}{R_m \cdot C_0}} \quad (\text{A.1})$$

where

U_0 is the voltage (V);

R_m is the internal resistance of the voltage source and lead resistances (Ω);

C_0 is the capacitance (F).

When a voltage step of ΔU_0 is applied to the winding, the capacitive current peak is the quotient of ΔU_0 and the resistance R_m . The time constant of the exponential current decay function is the product of the resistance R_m and the capacitance C_0 . Even for large windings with a capacitance in the range of microfarads, the time constant would not exceed one second or so with typical measurement instruments having a relatively low R_m . Therefore the capacitive current has too short a duration to affect the measurement of the insulation resistance and the polarization index.

A.3 Conduction current I_G

The conduction current is caused by directed movement of electrons and ions in the electric field. At low field magnitudes, conduction is predominantly caused by ions. At high field magnitudes, when approaching the dielectric breakdown strength, electrons increasingly contribute to conduction.

Given that $R_m \ll R_V$, the conduction current I_G of an insulation volume element between parallel electrodes is given by Formula A.2):

$$I_G = \frac{U_0}{R_V} \quad (\text{A.2})$$

where

U_0 is the voltage (V);

R_V is the volume resistance $R_V = \frac{d}{\kappa_V \cdot A} (\Omega)$;

κ_V is the specific volume conductivity (S/m);

d is the distance between electrodes (m);

A is the electrode area (m²).

The conduction current through the insulation bulk depends on the dielectric material, the electric field magnitude, the temperature and the moisture content of the insulation. The specific volume conductivity is not very dependent on the electric field magnitude, as long as the stress during measurement is well below the breakdown strength. The temperature may not have a significant effect if the activation energy of the insulation material is low, in which case the activation energy depends on the mobility of ions and electrons in the insulation material with temperature according to:

$$\kappa_V = \kappa_0 \cdot e^{-\frac{W_a}{k \cdot T}} \quad (\text{A.3})$$

where

κ_V is the specific volume conductivity (S/m);

κ_0 is the material parameter (S/m);

W_a is the activation energy (eV);

k is the Boltzmann constant (eV/K);

T is the absolute temperature (K).

The volume conductivity, and therefore the conduction current, exponentially depends on the activation energy and the temperature (see Formulae A.2 and A.3).

The presence of humidity within the insulation structure increases the conduction current due to the conductivity of the water itself and by an increasing number of ions from the dissociation of internal contaminants and of hydrolytic decomposition products. With

increasing humidity content the specific volume conductivity can increase by several orders of magnitude.

A.4 Polarization current I_p

Polarization in solid dielectrics is an effect caused by the electric field, which aligns dipoles either being induced by the field or which exist permanently. The dipole alignment process in the field, called relaxation, requires time, which depends on the inertia inherent to the mechanism. In the equivalent circuit the different mechanisms are represented by R-C series combinations (Figure 1, indices 1,2...n). The relaxation time constants $\tau_j = R_j \cdot C_j$ ($j = 1...n$) vary in a wide range, from extremely fast processes like the electron polarization up to relatively long durations for slow processes like the interfacial polarization, with time constants ranging from milliseconds to hours.

Given that the internal and lead resistances are of negligible influence ($R_m \ll R_j$), the polarization current $I_p(t)$ can be generally expressed as a function of time (t) by Formula (A.4).

$$i_p(t) = \Delta U_0 \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_j}} \quad (\text{A.4})$$

where

U_0 is the voltage (V);

τ_j is the relaxation time constant of a polarization mechanism j , $\tau_j = R_j \cdot C_j$ (s);

R_j, C_j is the characteristic resistance and capacitance of a polarization mechanism j (Ω), (F).

Because the currents of the fast processes decay towards zero in the sub-milliseconds range, for the insulation resistance measurement only slow polarization processes are of relevance. Therefore, only the interfacial polarization effect remains. It is caused by the slow drift of ions and a minor amount of free electrons, which accumulate at the internal interfaces and at the electrodes. As there are different kinds of microscopic and macroscopic interfaces present in insulations with composite dielectrics, the polarization current is a superposition of current components with different magnitudes and time constants. An empirical expression for the polarization current sum is given by Formula (A.5). Some of the time constants may be many minutes or hours.

$$i_p(t) = \beta \cdot \Delta U_0 \cdot C_0 \cdot t^{-n} \quad (\text{A.5})$$

where

β is a factor, representing the insulation and its condition;

U_0 is the voltage (V);

C_0 is the geometric capacitance (F);

n is the exponent representing the insulation and its condition.

As a higher temperature increases ion mobility and electron availability, the polarization current raises with increasing temperature.

Also the presence of humidity and contamination will increase the availability of charge carriers for interfacial polarization.

For dry and clean insulation the polarization current is dominant. Since the polarization current is a straight line in a log-log diagram, the preferred way to display the current graphically is a log(i) versus log(t) diagram.

A.5 Surface leakage current I_L

The surface leakage current is caused by conduction in foreign layers, in case of inherently conducting solid deposits mainly by electrons or, in oil films and wet layers from water, predominantly by ions. Wet surface layers can be formed either by direct wetting or by accumulation of water molecules from the air due to adsorption, hygroscopicity of foreign layers and condensation.

The surface leakage current depends on the surface resistance according to Formula (A.6):

$$I_L = \frac{U_0}{R_L} \quad (\text{A.6})$$

where

U_0 is the voltage (V);

R_L is the surface leakage resistance, $R_L = \frac{l}{\kappa_L \cdot b}$ (Ω);

κ_L is the specific layer conductivity (S·m/m);

l is the length of the layer between electrodes (m);

b layer width (m).

The surface leakage resistance can drop with increasing relative humidity of air in the range between 30 % and 90 % by several orders of magnitude and follows changes in the relative humidity nearly instantly.

When condensation conditions arise (surface temperature < dew point temperature), the surface resistance will further decrease, as the amount of water on the surface increases.

The surface leakage resistance of wet layers depends on the temperature by an empirical exponential relationship.

Dry deposition of layers from intrinsically conducting materials, like copper or carbon dust, may reduce the surface leakage resistance significantly. The properties and dependencies are dominated by electron conduction mechanisms. As metal dust oxidizes with air to metal oxides, its surface leakage resistance is higher than that of carbon dust layers.

The contribution of surface leakage current depends on the insulation condition of the end winding; in the case of a measurement performed on each phase winding with the others connected to earth, this contribution is mainly due to the phase break portion of the end winding.

A.6 Stress control coating current I_S

If a continuous stress control coating covers the complete end winding of a stator, and the coating is in galvanic contact with the winding connections by design, a stress control coating current occurs. Since this specific stress control design is a unique design, the technical background and the consequences for the measurement and the interpretation of insulation resistance and polarization index are outlined in Clause C.3.

Annex B (informative)

Graphical estimation of the slope parameter X for temperature correction from measurement data

The following is an example of the estimation of X from an insulation resistance measurement of a complete winding. The values in Table B.1 are obtained at different temperatures.

**Table B.1 – Example data from insulation resistance
measurements at different winding temperatures**

Winding temperature T °C	Insulation resistance R_{I1} MΩ
26	625
33	433
45	308
58	165
64	103

For the estimation of the slope parameter X of Formula 2, the single data points are plotted in a semi-logarithmic diagram. The data points may be fitted with either one or two straight lines. For two lines, the fitting procedure should be separated into two temperature regions: more than 40 °C and less than 40 °C. The line fitting can be achieved mathematically by regression with an exponential function of any basis. With the functional approximation line in the diagram, the parameter X can be directly obtained by choosing an insulation resistance value R' and a second value R'' , with $R'' = 2 \times R'$ and reading the corresponding temperature values of the fitting line. The difference between the temperature values is equal to the slope parameter X (see Figure B.1). For the example data in Table B.1, the slope parameter X is 16 K.

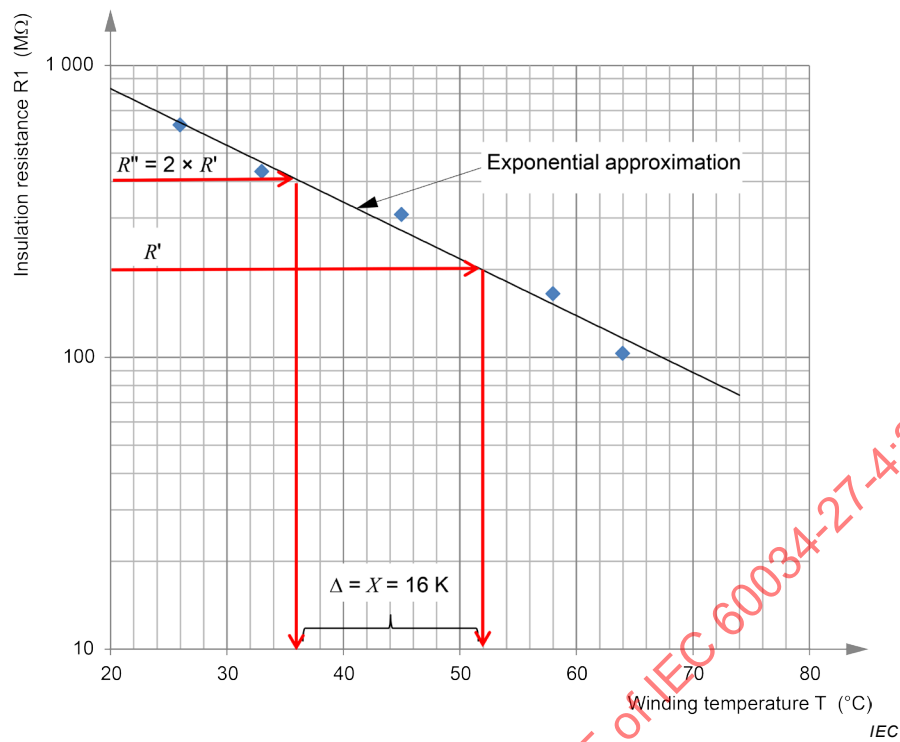


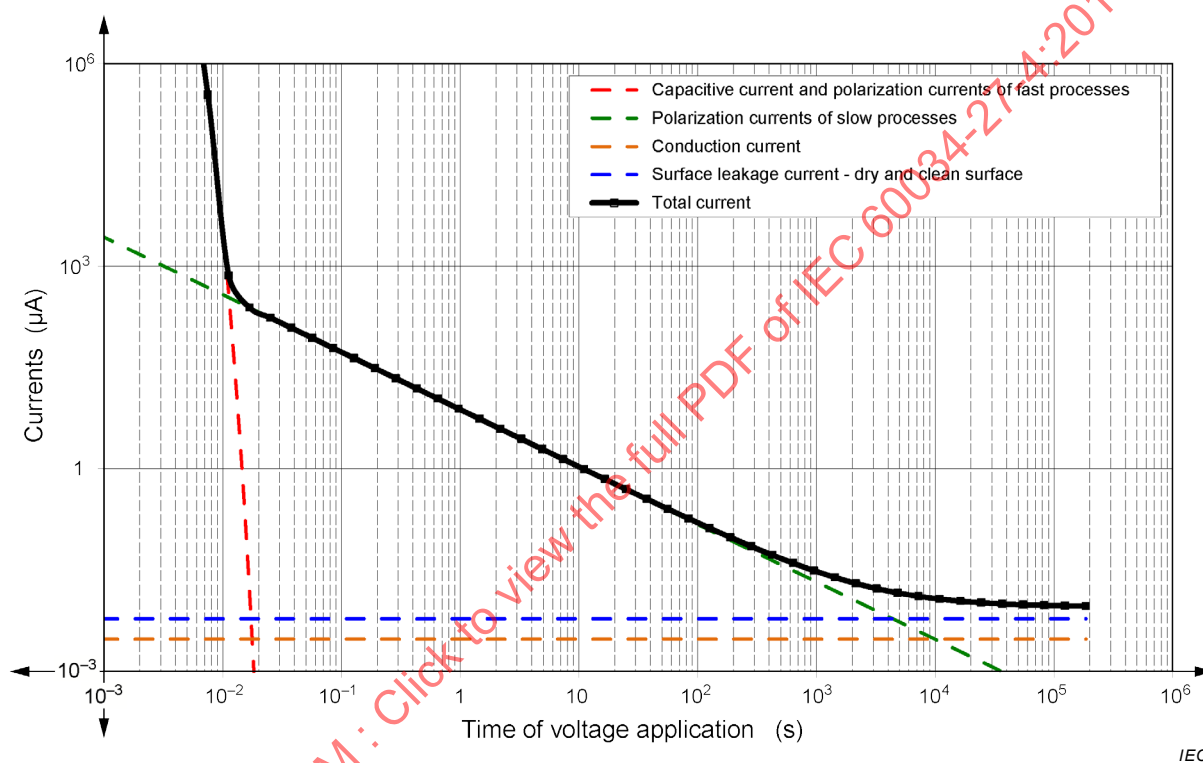
Figure B.1 – Graphical estimation of the slope parameter X in a semi-logarithmic diagram

Annex C (informative)

Examples of test results of synthetic resin based high voltage windings

C.1 Machine with dry and clean surface of the insulation

The diagram in Figure C.1 shows the DC current components and the total current versus time of voltage application for a winding with dry and clean surfaces.



**Figure C.1 – Total current versus time on a clean and dry insulation.
The scales are logarithmic**

From the total current versus time the insulation resistance versus time and the polarization index is obtained (see Figure C.2).

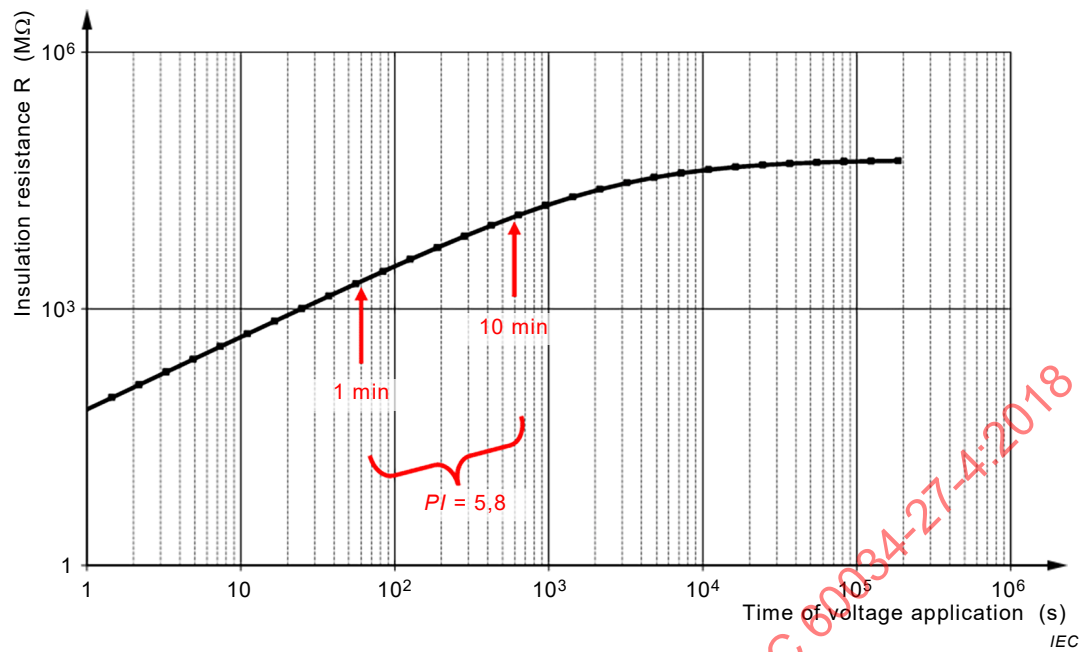


Figure C.2 – Insulation resistance versus time on a clean and dry insulation

C.2 Machine with a wet and contaminated surface

The diagram in Figure C.3 shows the DC current components and the total current versus time of voltage application for a winding with wet and contaminated surfaces.

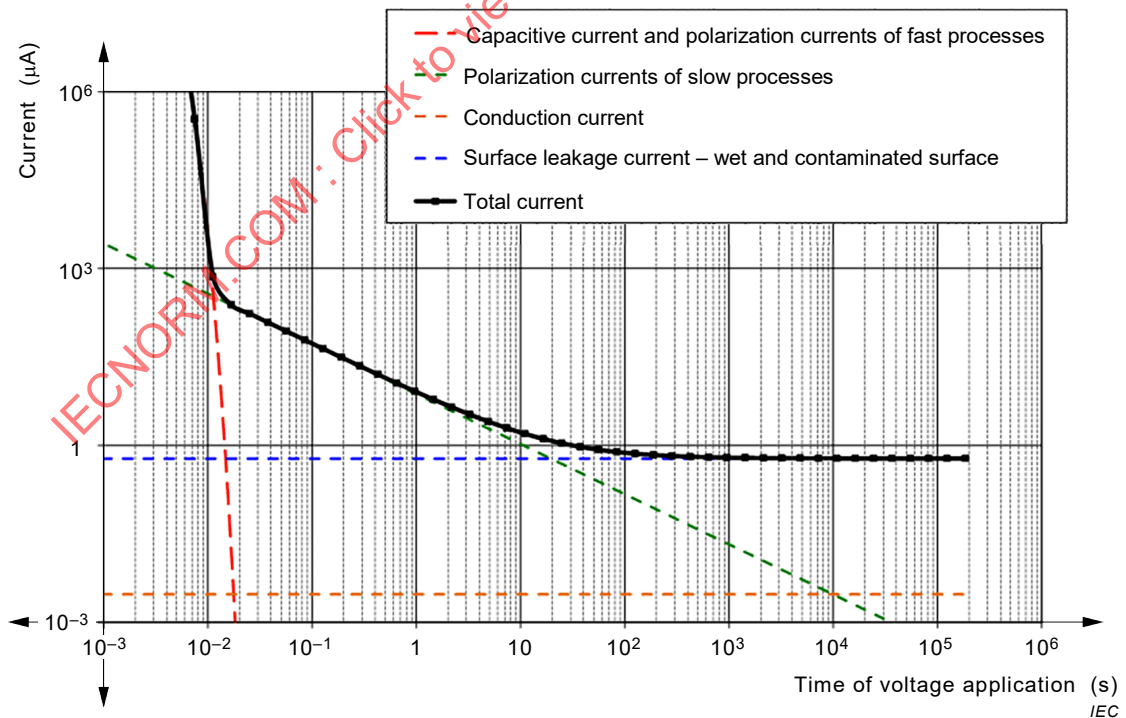


Figure C.3 – Total current versus time on a wet and contaminated insulation

From the total current versus time the insulation resistance versus time and the polarization index is obtained (see Figure C.4). Due to the surface leakage current contribution, the polarization index may drop significantly in comparison to the clean and dry condition (see Clause C.1).

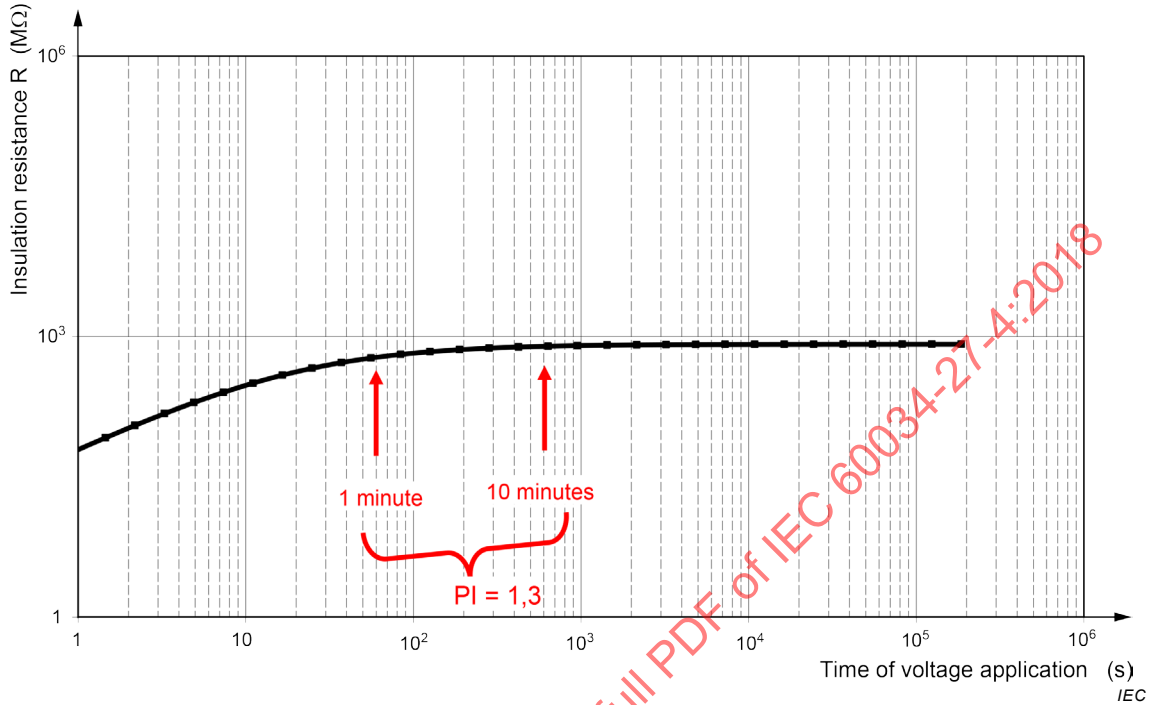


Figure C.4 – Insulation resistance versus time on a wet and contaminated insulation

C.3 Machine with continuous stress control layers in galvanic contact with high voltage conductors

C.3.1 Stress control coating current I_S

If a stress control coating covers the complete end winding of a stator, a stress control coating current occurs. The current flows through contacts between the filler particles embedded in the resin based coating, which is applied on top of the insulation as a varnish or a tape. The filler, mostly doped silicon carbide or iron oxide, behaves as semi-conductor and exhibits a strong dependency on the applied electrical field, which can be approximated by a formula with an exponential dependency from the applied voltage (Formula C.1):

$$I_S = \frac{U_0}{R_S} \quad (\text{C.1})$$

where

U_0 is the voltage (V);

R_S is the stress control coating resistance, $R_S = \frac{l}{\kappa_S \cdot b}$ (Ω);

κ_S is the specific surface conductivity $\kappa_S = \kappa_0 \cdot e^{\beta \cdot \frac{U_0}{l}}$ (S·m/m);

κ_0 is the specific surface conductivity for $U_0/l \rightarrow 0$ (S·m/m);

l is the length of the surface layer between electrodes (m);

b is the layer width (m);

β is the material parameter.

The positive exponent of the specific surface conductivity indicates that the stress control coating resistance decreases, when the specific voltage stress U_0/l increases.

The stress control coating resistance decreases with increasing temperature.

The contribution of the stress control coating current to the total current becomes significant only if the layer is in galvanic contact with the winding conductors by design or by a low series resistance, e.g. from humidity or conductive deposits at the insulating surface between stress control coating end and the winding connection or insulation cracks in the end winding.

C.3.2 Effects on insulation resistance and polarization index

If the end winding is covered with a stress control coating that has galvanic contact to winding connections at high voltage potential, the stress control coating current may become dominant. The insulation resistance values may fall below the recommended limits, especially if the end windings are short. The same effect influences the polarization index. The curve of time dependence of the insulation resistance becomes flat, so that consequently the polarization index may be close to 1 (see Figure C.6). Due to these effects, the recommended minimum values in Table 3 and 4 do not apply.

In order to identify such a stress control coating design, the applied test voltage should be varied. Due to the exponential dependency of the stress control coating current from the applied voltage, the insulation resistance would exhibit a decline with increasing test voltage level.

C.3.3 Examples of test results

The diagram in Figure C.5 shows the DC current components and the total current versus time of voltage application for a winding with a continuous stress control coating which is galvanically connected to the phase winding connections. The surface is dry and clean.

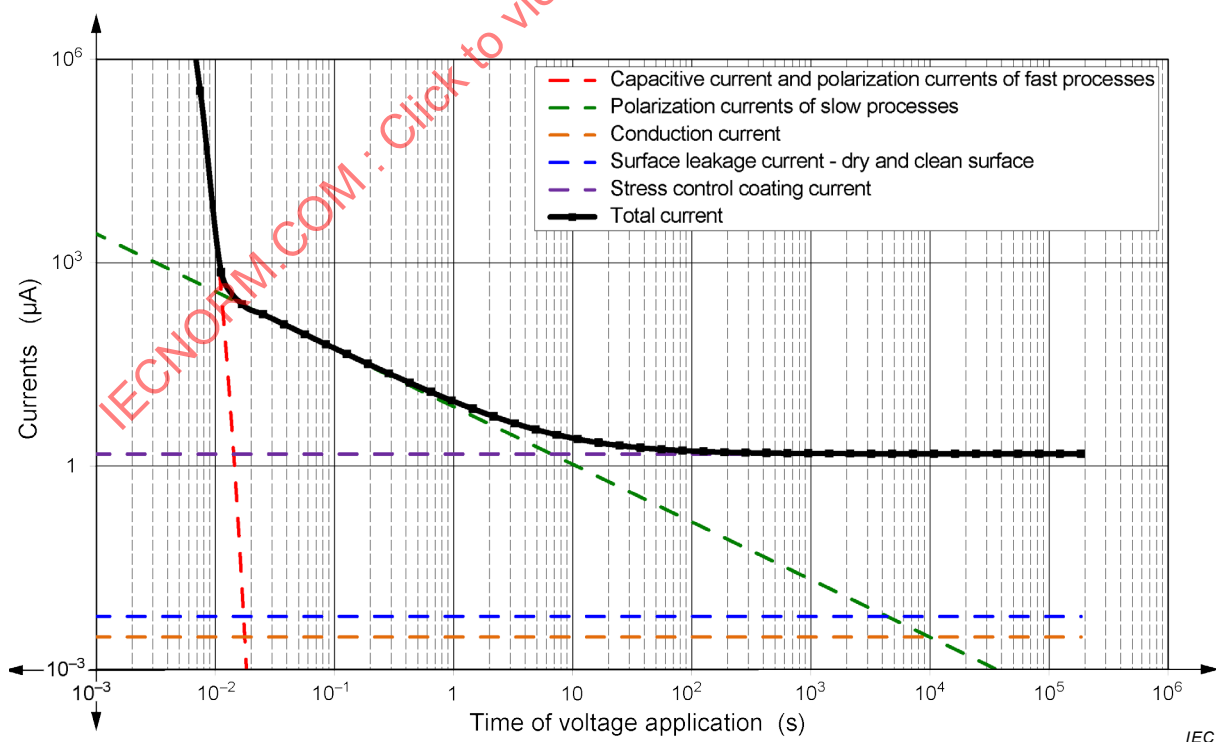


Figure C.5 – Total current versus time on a dry and clean surface with a continuous stress control coating

From the total current versus time the insulation resistance versus time and the polarization index is obtained (see Figure C.6). Because of the current through the stress control coating, the polarization index may drop significantly in comparison to a winding without continuous stress control coating (see Clause C.1).

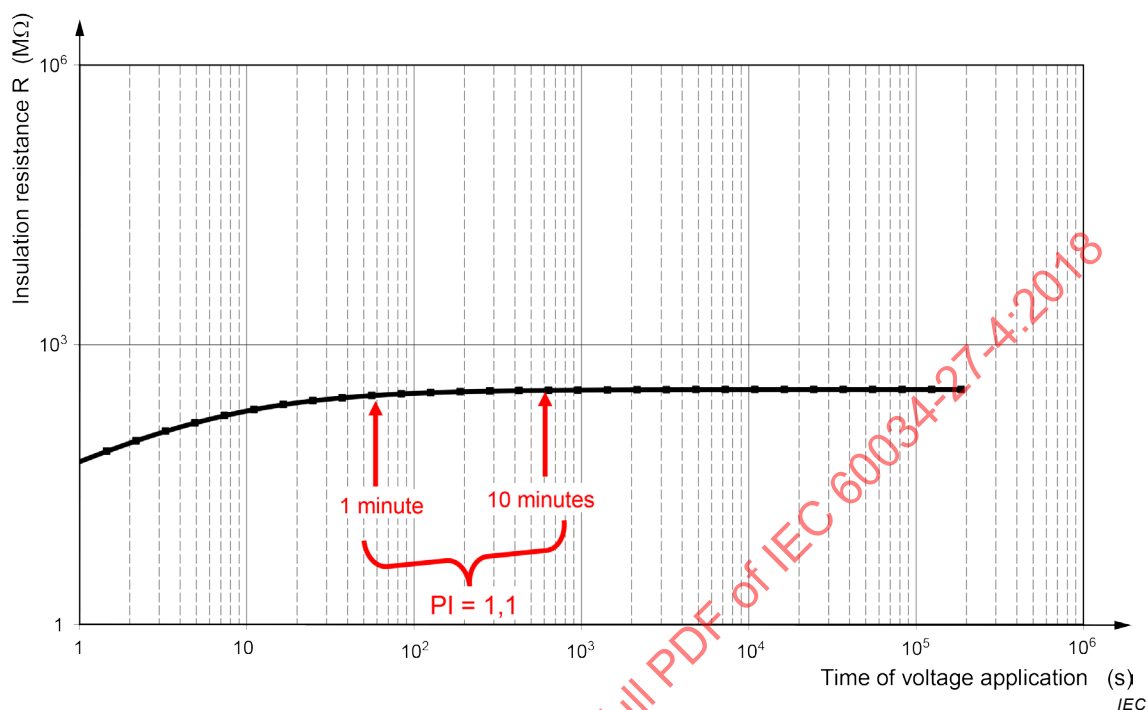


Figure C.6 – Insulation resistance versus time on a dry and clean surface with a stress control coating

Annex D (informative)

Measurement of leakage current to assess interphase insulation resistance

During a phase-to-earth test of a single phase winding, current may flow from the energized phase winding to the other earthed phase windings due to leakage in the end winding. Typical sources of interphase leakage currents could be cracked insulation and/or porosity of the insulation, mechanical erosion of the insulation due to vibration, contaminated mechanical support blocking between phase windings or at the terminals, etc. A high phase-to-phase leakage current in operation may lead to a phase-to-phase short circuit, that usually results in severe winding damage.

Testing of the IR between phases is a non-standard procedure. For testing the IR between phase windings, the desired phase windings are connected between the test leads of the measuring instrument and the remaining phase winding(s) need to be earthed (Figure D.1).

Extreme care is necessary after each test, since the full test voltage may still be present on the windings, even if the test instrument has an automatic short circuit applied at the conclusion of the test. Both phase windings have to be discharged to earth by appropriate means.

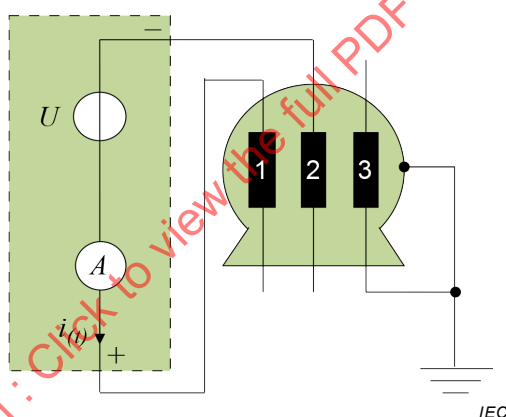


Figure D.1 – Connection for phase-to-phase measurement.
The test instrument shall be floating with respect to earth.
Other phase to phase combinations are permitted

A variation of the phase-to-earth measurement test circuit in Figure D.1 can be used to assess the interphase insulation resistance (Figure D.2). For this phase-to-phase test, the resistance between phase windings is accounted for. An HV supply with an accessible (to the user) guard point is required, but it may be difficult to find a commercial instrument. Alternatively some commercial megohmmeter test instruments may have a guard circuit.

When phase 1 in Figure D.2 is energized, the current is the summation of the phase 1 to earth (i_1) and the phase 1 to 2 leakage (i_{12}), and phase 1 to 3 leakage (i_{13}). Phase 2 and 3 are earthed to the guard of the voltage supply via an ammeter. The voltage drop of the ammeter is very low compared to the full applied voltage. Therefore, phase 2 to earth and phase 3 to earth current may be neglected.

The total current delivered by the voltage source is in Formula (D.1):

$$i = i_1 + i_{12} + i_{13} \quad (\text{D.1})$$

By connecting the return current of the earthed phase windings ammeter to the guard of the high voltage supply, the contribution of each phase winding is separated.

An alternative connection to assess the interphase leakage when there is no guard available on the measurement instrument is shown in Figure D.3.

A phase-to-phase leakage current higher than 0,1 times the phase-to-earth current may indicate an abnormal condition between the phase windings, if there is no design reason for this behaviour.

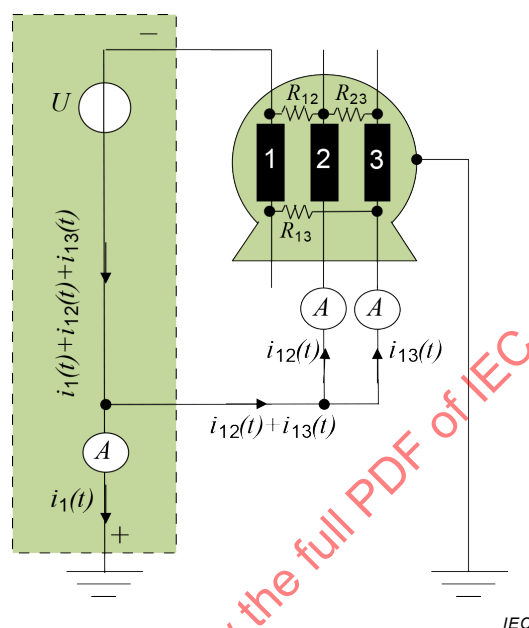


Figure D.2 – Measurement of interphase leakage current with a measurement instrument equipped with a guard connection

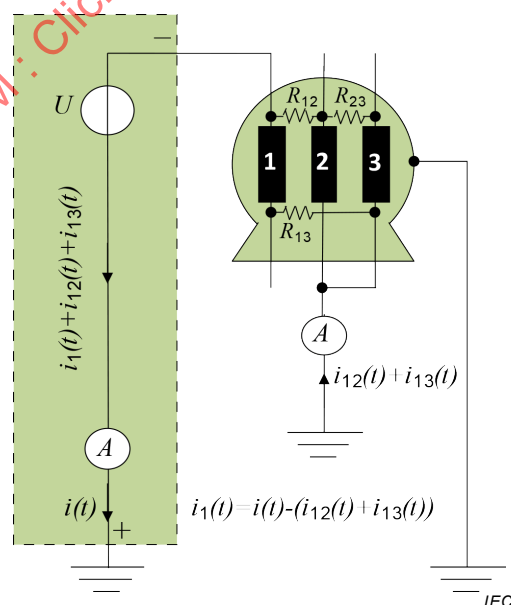


Figure D.3 – Measurement of interphase leakage current with a measurement instrument not equipped with a guard connection

Annex E (informative)

Other DC tests

E.1 General

The insulation resistance measurement and determination of the polarization index, described in this standard, are not the only methods which are used in practice to gain a better understanding of the condition of a winding by means of direct voltage and current. In addition to the determination of the insulation resistance and polarization index, modern insulation testers provide other options.

The target of this annex is to provide an overview of these additional methods to gain a better understanding of the condition of a winding of a rotating machine, by means of changing the measuring time, direct test voltage or environmental conditions which are used nowadays.

E.2 Dielectric absorption ratio (*DAR*)

The polarization index (*PI*) is traditionally defined as the ratio of the 10 min insulation resistance (R_{i10}) to the 1 min insulation resistance (R_{i1}). In older insulation systems, such as asphaltic-mica, the polarization currents often takes 10 min or more to decay to nearly zero.

However in random-wound low voltage machines and in field windings, the polarization current may decay to nearly zero in less than a minute. Thus some users calculate variants of the conventional *PI*. The variants include, but are not limited to, the one shown in Formula (E.1).

$$DAR = R_{i1}/R_{i30} \quad (E.1)$$

where

DAR is the dielectric absorption ratio,

R_{i1} is the insulation resistance reading after the application of voltage for 60 s,

R_{i30} is the insulation resistance reading after the application of voltage for 30 s.

Figure E.1 shows an example of the insulation resistance measure in the first minute from a random wound stator winding, where the R_{i1} of 4 083 MΩ and R_{i30} of 3 745 MΩ, yielding a *DAR* of 1,09. Some insulation resistance testers have an automatic test setting to perform the *DAR* measurement. The distinguishing feature is the shorter time the direct voltage is applied and thus the shorter time that the winding should be earthed (see 6.6). Since with insulation systems that do not contain mica the polarization current may be essentially zero after a minute, by using shorter times for the ratio, the test time can be considerably shortened with little loss of information about the degree of contamination or moisture polarization present. When measuring R_{i30} , the test object shall reach the test voltage in less than 1 s.

There are limitations in applying other ratios:

- a) There is no standard for what time intervals the R_i values are to be recorded. Different organizations use different ratios (see 3.3).
- b) There is no agreed pass-fail criterion for the *DAR*, as have been established for the traditional *PI*.

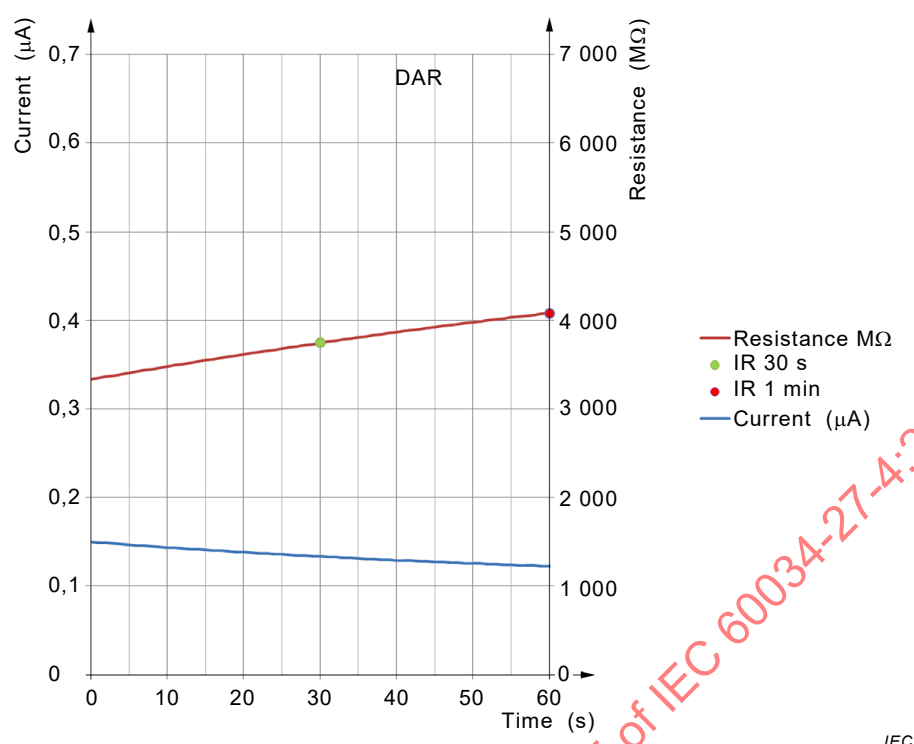


Figure E.1 – Measurement of current and insulation resistance that results in a *DAR* of 1,09

E.3 Monitoring charge and discharge currents

As stated in Clause A.4, the polarization current is primarily determined by the interfacial polarization within the insulation. Both are temperature dependent.

After the applied direct voltage is removed, the discharge current can be monitored as a function of time using a suitable discharge circuit. The discharge current manifests itself in two components: a capacitive discharge current component, which decays nearly instantaneously, depending upon the discharge resistance; and the polarization discharge current, which will decay from a high initial value to nearly zero with characteristics similar to the initial charging current, but with the opposite polarity. Normally, neither the surface leakage nor the conduction current affects the discharge current. Figure E.2 below shows the charge and discharge currents for the three-phase windings of a 50 MVA hydro-generator in linear scale (a) and in logarithmic scale (b). The separation between the charge and discharge currents allows visualizing the magnitude of the leakage current.

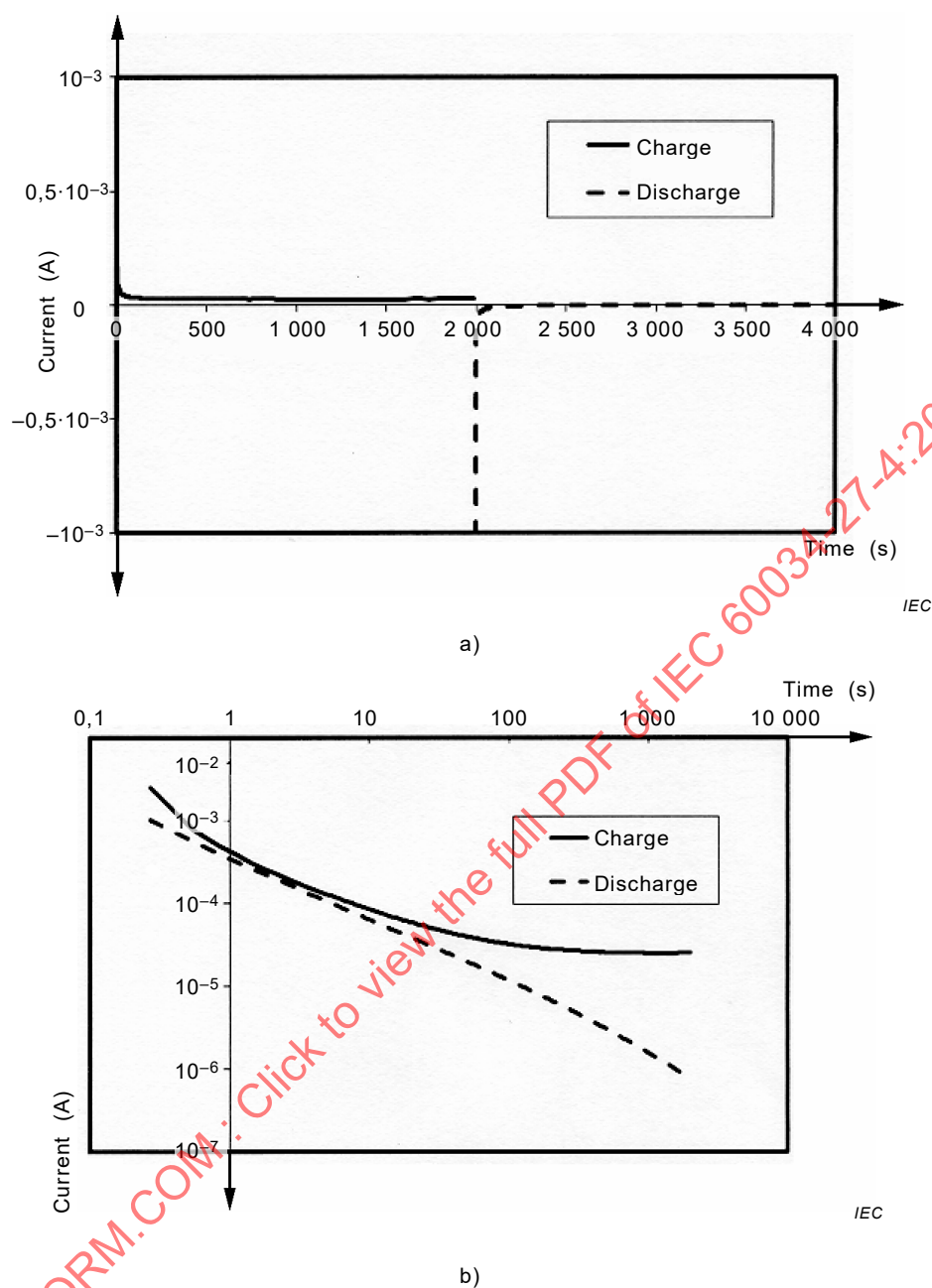


Figure E.2 – Charge and discharge currents after a step voltage of 2,5 kV for the three-phase windings of a 50 MVA hydro-generator:
a) linear scale; b) logarithmic scale with the discharge time reset to zero and using a positive value for the discharge current

Since the discharge current is the result of the depolarization currents, an abnormally high difference between the charge to discharge current may indicate an internal insulation problem such as lack of curing, thermal aging, mechanical damage or moisture polarization within the bulk insulation wall.

Assuming that the polarization current component I_p is identical with the discharge current with the reversed polarity, the empirical parameters of Formula A.5 can be obtained from the experimental data to build the equivalent model of Figure 1.

E.4 High voltage DC tests

E.4.1 General

An insulation resistance measurement is traditionally performed at a constant voltage level that is well below the peak voltage to which the winding will be subjected to in service. However some insulation testers provide the possibility to determine the current with an increasing DC voltage level to voltages greater than the peak voltage in service. Three techniques have been used for direct-voltage testing at higher levels: uniform-time step, graded-time step, and ramped voltage test. These tests are described in more detail in [2]¹. The following should be noted:

- The winding/phase should be earthed for a sufficiently long time after DC voltage is removed.
- DC voltage can short-circuit stress grading coatings and lead to local electric field enhancements in insulation system, with possible irreversible effects.
- Performing a high voltage DC test on site on a stator winding in unknown condition, could risk flashover or insulation breakdown.

E.4.2 Uniform-time voltage step test

This method involves application of the high direct voltage in a series of uniform voltage steps at regular time intervals. Current readings are taken at the end of each interval and the current versus voltage curve is plotted. During and after testing, the curve is examined for sudden increases or other variations in conduction current versus applied voltage response, that may indicate insulation weakness.

Dielectric polarization may dominate the current measurements and mask significant variations in conduction current. To minimize this effect, the test voltage may be held at each level long enough to allow the polarization current to decay to a negligible value. For older asphalt-mica and shellac mica-folium windings, a time interval of 1 min is the minimum; but up to 6 min is employed by some users of this method. For modern epoxy-mica insulation systems, the time interval is usually 1 min.

E.4.3 Graded-time voltage step test

It is usually not practical to hold each voltage step long enough to make the polarization current negligible. To avoid introducing error from incomplete polarization current decay and to shorten the time required to obtain current versus voltage curves, complex volt-time schedules were developed. The basic idea of these test schedules is to adjust the voltage, in steps, according to a diminishing time schedule so the polarization component of the measured current is linearized, i.e., proportional to the applied voltage. By following a predetermined test schedule, relative changes in conduction current become more readily discernible. Although the graded-time step test is more difficult to perform than the uniform-time step test, it does reduce the total test time and results in better assessment of the conduction current. The time duration at each voltage step is variable and is determined by the characteristics of the insulation.

E.4.4 Ramped-time voltage step test

The ramped voltage test method can be considered a step voltage test in which the voltage steps and time intervals are made very small. As the size of the voltage and time increments approaches zero, a voltage ramp is formed. A programmable direct-voltage test set is used to automatically ramp the voltage at a preselected rate. Insulation current versus applied voltage is recorded, providing continuous observation and analysis of the current response as the test progresses. The application of a ramped voltage, instead of discrete voltage steps, automatically linearizes the geometric capacitive and polarization components of the current so that meaningful variations in the measured current are more easily observed.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

The principal advantages of the ramped voltage test over the conventional stepped voltage methods are that it gives better control and improved warning of impending failure to avoid damage to the insulation. Elimination of the human variable from the time, voltage, and current parameters yields overall test results which are much more repeatable. The rate of increase in voltage is typically 1 kV/min or 2 kV/min.

E.5 Wet insulation resistance measurement

In stator windings that may be subjected to severe contamination, it is more and more common to detect if the insulation system is sealed against contamination by wetting the insulated surfaces and subsequently measuring the insulation resistance and polarization index (see [3]). Three different methods are used:

- The insulation resistance is determined during locally wetting a clean and dry insulation system with a delicate mist of water containing a non-ionic wetting agent by spraying
- The insulation resistance is determined after completely wetting the windings of a clean and dry insulation system with water containing a non-ionic wetting agent by spraying
- The insulation resistance is determined after completely submerging the windings of a clean and dry insulation system in water containing a non-ionic wetting agent

The wetting agent is added to the water in a proportion sufficient to reduce the surface tension of water to a value of 30 mN/m or less at 25 °C. The insulation resistance measurement is performed with a direct voltage of 500 V.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

Bibliography

- [1] IEEE 43:2013, *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*
 - [2] IEEE 95:2002, *IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) with High Direct Voltage*
 - [3] NEMA MG1:2009, *Motors and Generators*
 - [4] Suzuki, K., Maeda, S., Mio, K., "Temperature Dependence of Insulation Resistance and Current Components for Stator Bars", 2016 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, pp 20-23, June 2016
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	43
INTRODUCTION	45
1 Domaine d'application	46
2 Références normatives	46
3 Termes et définitions	46
4 Résistance d'isolement – composantes et facteurs d'influence	48
5 Index de polarisation	48
6 Mesure	49
6.1 Influences sur la mesure de la résistance d'isolement	49
6.1.1 Généralités	49
6.1.2 Correction de la température de l'enroulement	49
6.2 Equipement de mesure	51
6.3 Objet en essai et circuit de mesure	52
6.3.1 Généralités	52
6.3.2 Enroulements statoriques triphasés	52
6.3.3 Autres enroulements	53
6.4 Tension de mesure	53
6.4.1 Type et amplitude	53
6.4.2 Polarité	54
6.5 Temps de mesure	54
6.6 Sécurité	54
6.7 Procédures de mesure	54
6.7.1 Procédure normalisée	54
6.7.2 Procédures spéciales	55
7 Interprétation des résultats de mesure	55
7.1 Généralités	55
7.2 Aptitude aux essais et au fonctionnement	55
7.3 Evaluation des tendances de l'état de l'isolation	56
7.4 Comparaison entre les machines ou entre les phases	56
7.5 Effets des valeurs très élevées de résistance d'isolement	56
7.6 Limites de l'essai de résistance d'isolement	56
8 Limites recommandées pour la résistance d'isolement et l'index de polarisation	57
8.1 Généralités	57
8.2 Résistance d'isolement	57
8.3 Index de polarisation	57
9 Rapport d'essai	58
9.1 Enroulements vieillis en fonctionnement	58
9.2 Enroulements neufs	59
Annexe A (informative) Composantes du courant continu	60
A.1 Courant total I_T	60
A.2 Courant capacitif I_C	60
A.3 Courant de conduction I_G	61
A.4 Courant de polarisation I_P	62
A.5 Courant de fuite de surface I_L	63
A.6 Courant de revêtement anti-effluves I_S	64

Annexe B (informative) Estimation graphique du paramètre de pente X pour la correction de température à partir des données de mesure.....	65
Annexe C (informative) Exemples de résultats d'essai pour des enroulements haute tension à base de résine synthétique.....	67
C.1 Machine à surface d'isolation sèche et propre.....	67
C.2 Machine à surface humide et contaminée	68
C.3 Machine à couches de revêtement anti-effluves continu en contact galvanique avec des conducteurs haute tension	69
C.3.1 Courant de revêtement anti-effluves I_S	69
C.3.2 Effets sur la résistance d'isolement et l'index de polarisation.....	70
C.3.3 Exemples de résultats d'essai.....	70
Annexe D (informative) Mesure du courant de fuite pour évaluer la résistance d'isolement entre phases.....	72
Annexe E (informative) Autres essais en courant continu.....	74
E.1 Généralités	74
E.2 Taux d'absorption diélectrique (TAD)	74
E.3 Surveillance des courants de charge et de décharge	75
E.4 Essais en courant continu à haute tension	77
E.4.1 Généralités.....	77
E.4.2 Essai par paliers de tension uniformes	77
E.4.3 Essai par paliers de tension graduels	77
E.4.4 Essai sous rampe de tension.....	78
E.5 Mesure de la résistance d'isolement avec mouillage	78
Bibliographie.....	79
Figure 1 – Schéma de circuit équivalent de l'isolation d'enroulement dans un essai de tension continue	48
Figure 2 – Connexion pour les essais sur l'enroulement complet	52
Figure 3 – Connexion pour une mesure phase-terre.....	53
Figure A.1 – Relations entre différents courants et le temps	60
Figure B.1 – Estimation graphique du paramètre de pente X dans un diagramme semi-logarithmique.....	66
Figure C.1 – Courant total en fonction du temps sur une isolation propre et sèche. Les échelles sont logarithmiques.....	67
Figure C.2 – Résistance d'isolement en fonction du temps sur une isolation propre et sèche.....	68
Figure C.3 – Courant total en fonction du temps sur une isolation humide et contaminée	68
Figure C.4 – Résistance d'isolement en fonction du temps sur une isolation humide et contaminée	69
Figure C.5 – Courant total en fonction du temps sur une surface sèche et propre avec un revêtement anti-effluves continu	71
Figure C.6 – Résistance d'isolement en fonction du temps sur une surface sèche et propre avec un revêtement anti-effluves	71
Figure D.1 – Connexion pour la mesure entre phases. L'instrument d'essai doit flotter par rapport à la terre. D'autres combinaisons de phases sont autorisées	72
Figure D.2 – Mesure du courant de fuite entre phases à l'aide d'un instrument de mesure équipé d'une connexion de garde	73

Figure D.3 – Mesure du courant de fuite entre phases à l'aide d'un instrument de mesure non équipé d'une connexion de garde	73
Figure E.1 – Mesure du courant et de la résistance d'isolement produisant un <i>TAD</i> de 1,09	75
Figure E.2 – Courants de charge et de décharge après application d'une tension de pas de 2,5 kV pour les enroulements triphasés d'un hydro-générateur de 50 MVA:.....	76
Tableau 1 – Valeurs du paramètre <i>X</i> pour la correction de température	51
Tableau 2 – Lignes directrices relatives aux amplitudes de tension continue à appliquer durant la mesure de résistance d'isolement.....	54
Tableau 3 – Valeurs minimales recommandées pour la résistance d'isolement à une température de base de 40 °C	57
Tableau 4 – Valeurs minimales recommandées pour l'index de polarisation des systèmes d'isolation à haute tension.....	58
Tableau B.1 – Exemple de données obtenues à partir de mesures de la résistance d'isolement pour différentes températures de l'enroulement.....	65

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27-4: Mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation sur le système d'isolation des enroulements 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 60034-27-4 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1880/FDIS	2/1890/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.

Ce document a été rédigé 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.

NOTE Un tableau de références croisées de toutes les publications du CE 2 de l'IEC est donné sur le tableau de bord du CE 2 sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document 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 au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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

INTRODUCTION

Le présent document fournit les lignes directrices pour la mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation sur le système d'isolation des enroulements de stator et de rotor des machines électriques tournantes. Ce document décrit également les caractéristiques typiques de résistance d'isolement, l'effet des facteurs déterminants qui influencent ou modifient ces caractéristiques ainsi que la façon dont ces caractéristiques indiquent l'état de l'enroulement. Il recommande des valeurs minimales acceptables pour la résistance d'isolement des enroulements des machines tournantes en courant alternatif et en courant continu. L'interprétation dépendra de la nature des matériaux d'isolation – plus particulièrement si l'isolation est de type thermodurcissable ou thermoplastique.

La mesure de la résistance d'isolement est recommandée et utilisée depuis plus de 50 ans pour évaluer l'état de l'isolation électrique. Elle est recommandée pour prendre des mesures périodiques, cumulées sur plusieurs mois et années de service ou en relation avec l'entretien courant, le dépannage et la révision des machines tournantes.

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 différentes options de réparation et les intervalles de temps recommandés entre les essais. Ces mesures ne donnent aucune indication sur la localisation des points faibles du système d'isolation et les évaluations de tendances ne peuvent pas être utilisées pour prévoir le temps de fonctionnement avant défaillance de l'isolation d'enroulement.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27-4: Mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation sur le système d'isolation des enroulements des machines électriques tournantes

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60034 fournit des procédures d'essai recommandées pour la mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation de l'isolation des enroulements de stator et de rotor des machines électriques tournantes.

Ce document recommande des valeurs minimales acceptables pour la résistance d'isolement et l'index de polarisation de l'isolation d'enroulement, applicables pour des machines tournantes à l'état fini, haute et basse tension en courant alternatif et en courant continu d'une puissance assignée de 750 W ou plus.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. 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 60050-411, *Vocabulaire Électrotechnique International – Chapitre 411: Machines tournantes*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60050-411 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

tension assignée

<pour une machine électrique> tension assignée entre phases pour une machine triphasée en courant alternatif, tension phase-terre pour une machine monophasée et tension continue assignée pour les machines en courant continu ou les enroulements de champ

3.2

résistance d'isolement

R_{it}

<pour une machine électrique> capacité de l'isolation électrique d'un enroulement à résister au courant continu, déterminée par le rapport de la tension continue appliquée divisée par le courant total traversant l'isolation de la machine, mesuré à un temps spécifié t après le début de l'application de la tension

Note 1 à l'article: La durée d'application de la tension est généralement de 1 min (R_{i1}) et de 10 min (R_{i10}); cependant, d'autres valeurs peuvent être utilisées. Conventions d'unité: les valeurs d'indice de 1 à 10 sont présumées être en minutes, les valeurs d'indice de 15 et plus sont présumées être en secondes.

Note 2 à l'article: La résistance d'isolement est parfois abrégée sous la forme RI.

3.3

index de polarisation

I_P

quotient de la résistance d'isolement mesurée à deux intervalles de temps différents, généralement $t_1 = 1$ min et $t_{10} = 10$ min après l'application de la tension continue, qui est un indicateur de l'état de l'isolation

Note 1 à l'article: D'autres intervalles de temps sont étudiés à l'Article E.2.

3.4

courant de polarisation

I_P

courant résultant des processus de polarisation, qui diminue avec la durée d'application de la tension continue selon un taux décroissant variant d'une valeur initiale à une valeur proche de zéro

Note 1 à l'article: Le courant de polarisation est parfois appelé courant d'absorption.

3.5

courant de conduction

I_G

<pour une machine électrique> courant ohmique constant dans le temps et traversant la masse de l'isolation principale

3.6

courant de fuite de surface

I_L

courant ohmique constant dans le temps et qui s'écoule sur la surface des développantes du stator ou entre les conducteurs exposés et le corps du rotor dans les enroulements de rotor isolés en cas de dépôts de matériaux conducteurs, par exemple en cas d'humidité ou contamination

3.7

courant capacitif

I_C

courant d'amplitude comparativement élevée et de courte durée (généralement < 1 s), qui diminue de façon exponentielle avec la durée d'application de la tension continue

3.8

courant de revêtement anti-effluves

I_S

<pour une machine électrique> courant ohmique constant dans le temps, circulant parallèlement au courant de fuite de surface au travers d'un revêtement anti-effluves continu à la surface de l'isolation d'une développante entre un conducteur et la terre

3.9

courant total

I_T

courant variable en fonction du temps, généralement mesuré au cours de la mesure de la résistance d'isolement et qui représente la somme de toutes les composantes du courant

Note 1 à l'article: Le courant total sert de base pour déterminer la résistance d'isolement R_{it} et l'index de polarisation I_P .

3.10

effet de polarité

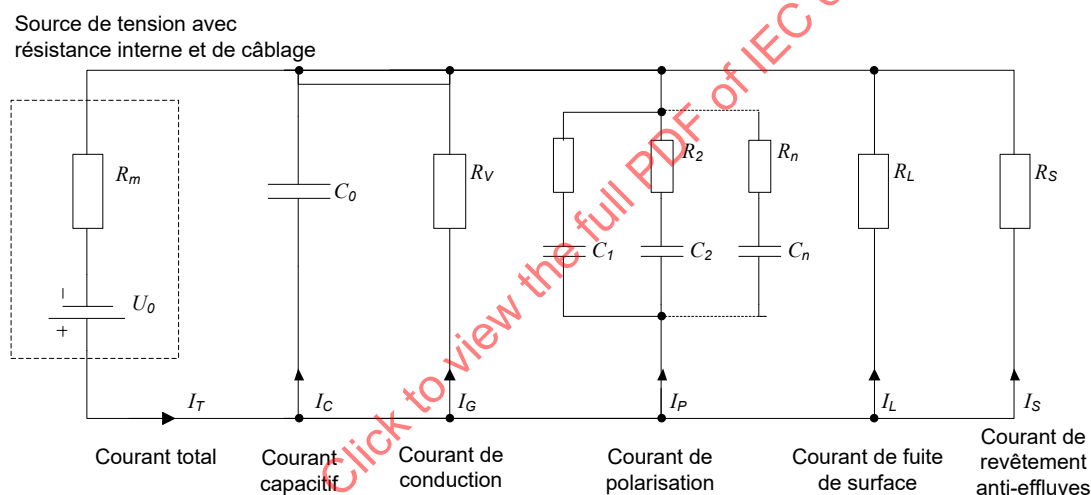
effet consistant à obtenir différentes valeurs de la résistance d'isolement R_{it} en inversant la polarité des cordons de mesure de la résistance d'isolement

Note 1 à l'article: Cet effet apparaît en présence d'humidité dans l'isolation. Il est provoqué par un phénomène connu sous le nom d'électroendosmose.

4 Résistance d'isolement – composantes et facteurs d'influence

La résistance d'isolement de l'enroulement d'une machine tournante dépend du type et de l'état des matériaux isolants, de la conception de l'isolation et des techniques utilisées pour la fabrication de l'enroulement.

La résistance d'isolement est mesurée avec une tension continue. La mesure de la résistance dans le temps fournit des informations sur les composantes du courant résultant de différents mécanismes physiques. La Figure 1 représente schématiquement les différentes composantes du courant continu. Des informations relatives aux diverses composantes du courant sont données dans l'Annexe A.



IEC

Figure 1 – Schéma de circuit équivalent de l'isolation d'enroulement dans un essai de tension continue

5 Index de polarisation

L'index de polarisation est le quotient des valeurs de résistance d'isolement mesurées à deux intervalles de temps différents $t_1 = 1$ min et $t_{10} = 10$ min après l'application d'une tension continue:

$$IP = \frac{R_{i10}}{R_{i1}} \quad (1)$$

Des variantes de la définition de l'index de polarisation utilisant un quotient de valeurs de résistance d'isolement mesurées pour d'autres intervalles de temps peuvent être utilisées dans le cadre d'applications spéciales; il est alors nécessaire de l'indiquer (voir Annexe E). Des points de mesure supplémentaires pendant un intervalle de 10 min peuvent fournir plus d'informations.

L'index de polarisation décrit la variation de la résistance d'isolement RI entre deux points spécifiques dans le temps et peut ainsi, mieux qu'une simple valeur de résistance d'isolement, indiquer une contamination et/ou une condensation d'humidité sur l'enroulement, ou l'absorption d'humidité dans l'enroulement. Cependant, il peut ne pas révéler les vacuoles internes provoquées par un défaut d'imprégnation ou une détérioration thermique.

L'index de polarisation peut être utilisé pour estimer si l'enroulement est adapté à l'application d'un essai de tenue en tension ou au fonctionnement. Il peut fournir des informations permettant d'évaluer l'état du système d'isolation.

Les courants de polarisation étant négligeables dans l'intervalle de temps compris entre 1 min et 10 min, la détermination de l'index de polarisation ne peut pas s'appliquer aux petites machines à enroulements en vrac, aux enroulements de champ dans les rotors de générateur, aux enroulements de champ et de rotors à cage non isolés et aux induits de machines à courant continu.

L'index de polarisation dépend du type de système d'isolation, plus particulièrement de la nature des matériaux d'isolation et des procédures utilisées pour la fabrication de l'enroulement (pour les systèmes d'isolation à base de résine synthétique ou à base de gomme-laque et d'asphalte, voir 7.1). En outre, il dépend du type de revêtement anti-effluves (voir Article C.3) et de l'amplitude de la tension d'essai (voir 6.4.1). L'influence de la température sur l'index de polarisation n'est pas significative à condition que la température de l'enroulement soit constante entre les relevés à 1 min et 10 min de la résistance d'isolement (voir 6.1.2).

Avant de recommander un enroulement pour un essai de tenue en tension ou pour le fonctionnement, il convient de fixer une valeur minimale pour l'index de polarisation (voir recommandations au 8.3).

6 Mesure

6.1 Influences sur la mesure de la résistance d'isolement

6.1.1 Généralités

Le résultat de la mesure de résistance dépend de facteurs environnementaux, principalement de la température de l'enroulement et du taux d'humidité dans l'air. L'influence de la température de l'enroulement peut être déterminée d'après des données empiriques ou une mesure expérimentale et utilisée pour la correction des résultats de mesure obtenus à différentes températures (voir 6.1.2).

L'humidité relative de l'air influence le courant de fuite de surface et ne peut généralement pas être estimée car son effet est lui-même dépendant de la température de l'air, des propriétés de la surface de l'isolation et de la nature d'une éventuelle contamination de surface. Pour cette raison, il est généralement recommandé d'effectuer les mesures de la résistance d'isolement à des températures d'enroulement supérieures au point de rosée.

6.1.2 Correction de la température de l'enroulement

La variation de la température affecte toutes les composantes identifiées du courant, à l'exception du courant capacitif I_C , car une augmentation de la température produit de l'énergie thermique, qui libère des porteurs de charge supplémentaires et réduit ainsi la résistivité. Par conséquent, la valeur de la résistance d'isolement d'un enroulement dépend de la température de l'enroulement.

Pour permettre une comparaison des valeurs de résistance d'isolement obtenues à différentes températures, il est recommandé de corriger toutes les valeurs de RI mesurées selon une température de base commune de 40 °C, le cas échéant (voir Tableau 1). Si la valeur de R_i après une application de tension de 1 min est $> 5 \text{ G}\Omega$, ou si la valeur de R_i pour un système d'isolation à base de résine synthétique est mesurée à une température inférieure à 40 °C, alors aucune correction n'est nécessaire [4]. Si tel n'est pas le cas, le facteur de correction est calculé à l'aide de la Formule (2):

$$K_T = 0,5^{\frac{40-T}{X}} \quad (2)$$

Où

40 est la température de base (°C);

T est la température de l'enroulement (°C);

X est le paramètre de pente pour un système d'isolation (K).

La Formule (2) est basée sur la Formule (A.3), en tenant compte de toutes les composantes appropriées du courant.

NOTE 1 Cette formule montre que la RI est réduite de moitié si la température de l'enroulement T augmente de X Kelvins. La même relation empirique peut également être exprimée par des fonctions exponentielles avec d'autres bases, telles que e . Le paramètre de pente peut être directement transformé, dans le cas d'une base e en divisant X par $-\ln(0,5)$.

NOTE 2 Des températures de base autres que 40 °C peuvent être utilisées, par exemple 20 °C.

R_i à la température de base est obtenue en multipliant la valeur de résistance mesurée à une température d'enroulement T par le facteur de correction K_T (Formule (3)):

$$R_{ic} = R_{iT} \times K_T \quad (3)$$

où

R_{ic} est la résistance d'isolement corrigée selon la température de base ($\text{M}\Omega$);

R_{iT} est la résistance d'isolement mesurée à la température de l'enroulement ($\text{M}\Omega$);

K_T est le facteur de correction de la température.

Le paramètre de pente X dans la Formule (2) caractérise le degré d'influence de la température de résistance d'isolement sur un système d'isolation individuel. Il est préférable d'estimer ce paramètre de façon expérimentale. La méthode recommandée consiste à réaliser des mesures de la RI pour plusieurs températures d'enroulement dans la gamme attendue où des mesures peuvent être effectuées, y compris 40 °C, toutes supérieures au point de rosée, et de tracer les résultats sur une échelle semi-logarithmique. Le paramètre de pente X peut être dérivé du résultat d'une approximation exponentielle. L'Annexe B donne un exemple de cette procédure. En l'absence de données expérimentales pour un système d'isolation, les valeurs du paramètre X dans le Tableau 1 peuvent être utilisées. Le Tableau 1 est basé sur des données empiriques et il n'existe aucune raison apparente de discontinuité à 40 °C.

La correction de température avec une approximation exponentielle par les équations 2 et 3 peut entraîner des erreurs importantes avec une différence croissante entre la température de l'enroulement et la température de base. Il est recommandé d'appliquer cette méthode uniquement pour une gamme de températures d'enroulement indiquée dans le Tableau 1, qui est dérivée de mesures expérimentales.

NOTE 3 Si différents systèmes d'isolation sont utilisés dans les régions de l'encoche et des développantes, c'est le système d'isolation de la région de l'encoche qui est concerné par la correction de la température.

Tableau 1 – Valeurs du paramètre X pour la correction de température

Types de système d'isolation	Paramètre de pente X	Gamme de températures
	K	°C
A base de gomme-laque et d'asphalte	10	10 à 60
A base de résine synthétique (par exemple, époxy, polyester, polyesterimide et autres)	Pas de correction ($K_T = 1$)	10 à 40
	17	40 à 60

Ces valeurs sont fondées sur des données expérimentales et reflètent une approche prudente, c'est-à-dire qu'elles constituent des valeurs minimales. Généralement, l'influence de la température (Formule 2) est moindre, autrement dit, le paramètre de pente est supérieur.

Pour estimer l'index de polarisation IP , la correction de température n'est pas nécessaire car la différence de température de l'enroulement durant la mesure de R_{i1} et R_{i10} est considérée comme négligeable.

6.2 Equipement de mesure

Pour la mesure directe, l'équipement préférentiel est un appareil de mesure de résistance d'isolement. Pour les lectures de R_{i1} inférieures à 5 000 M Ω , il convient qu'un instrument numérique présente au minimum les caractéristiques suivantes:

- Affichage: 3 chiffres
- Précision: ± 5 % du relevé, ± 5 chiffres

Si aucun appareil de mesure de résistance d'isolement n'est disponible, la résistance d'isolement peut être obtenue à partir d'une mesure de la tension et du courant (mesure indirecte). Pour ces mesures indirectes, une source de tension continue stabilisée, un voltmètre et un micro-ampèremètre peuvent être utilisés. La fluctuation de tension d'une source de tension continue réelle introduira une variation de $i_c(t) = C_0 dU_0/dt$. La capacité C_0 de la plupart des machines à haute tension étant élevée, une stabilité et un bruit minimaux sont nécessaires pour que l'alimentation continue néglige cet effet. La résistance d'isolement est calculée à partir des lectures du voltmètre et de l'ampèremètre à l'aide de la Formule (4).

$$R_{it} = U / I_t \quad (4)$$

où

R_{it} est la résistance d'isolement (M Ω) au temps t ;

U est la tension mesurée (lecture du voltmètre) de la source de tension continue (V);

I_t est le courant mesuré (lecture de l'ampèremètre) (μ A) au temps t .

Pour la mesure de valeurs de RI élevées, un dispositif de mesure avec option de garde est recommandé pour éviter l'influence des fuites et l'influence capacitive du câble de mesure.

L'instrumentation ne doit pas prendre plus de 5 s pour atteindre la tension d'essai.

6.3 Objet en essai et circuit de mesure

6.3.1 Généralités

En fonction de l'objectif de l'essai et de la conception de l'objet en essai, différents circuits de mesure s'appliquent. Pour vérifier la RI minimale recommandée, l'essai doit être réalisé sur l'enroulement complet. Afin de détecter d'éventuels problèmes d'isolation sur chaque enroulement de phase et entre les enroulements de phase, les mesures doivent être réalisées phase par phase si chaque enroulement de phase peut être facilement déconnecté des autres. Pour évaluer les tendances, la même connexion doit être toujours appliquée.

Si possible, les éléments externes tels que les câbles, les commutateurs, les condensateurs, les transformateurs de courant, etc. doivent être déconnectés de l'enroulement. Il est nécessaire d'enregistrer les éléments toujours connectés à l'enroulement.

Pour obtenir des mesures de résistance d'isolement sur des enroulements directement refroidis à l'eau, il convient d'évacuer l'eau et de sécher complètement le circuit interne. Dans certains enroulements refroidis à l'eau, le fabricant peut avoir prévu un dispositif de mesure de la résistance d'isolement ne nécessitant pas l'évacuation du fluide de refroidissement. En général, si l'eau n'est pas évacuée, il convient que la conductivité de l'eau soit inférieure à celle recommandée par le fabricant de la machine. Dans ce cas, la conductivité de l'eau dominera largement la résistance d'isolement; ainsi, des valeurs $IP = 1$ et $R_{i10} = 1 \text{ M}\Omega$ peuvent être attendues.

Dans tous les cas, les éléments de l'enroulement qui ne sont pas soumis aux essais doivent être raccordés par des fils courts à la terre de la machine pour éviter les effets indésirables, tels que les courants d'égalisation ou un courant alternatif induit au circuit d'essai.

6.3.2 Enroulements statoriques triphasés

6.3.2.1 Connexion pour les mesures de l'enroulement complet à la terre

Tous les enroulements de phase sont connectés ensemble comme indiqué à la Figure 2.

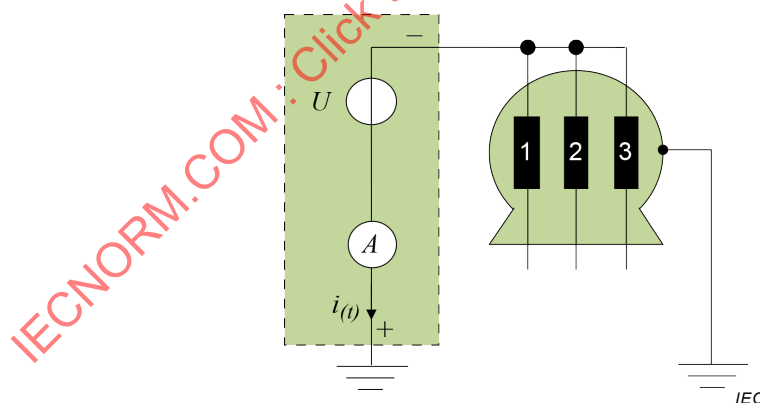


Figure 2 – Connexion pour les essais sur l'enroulement complet

6.3.2.2 Connexion pour les mesures phase-terre

La réalisation d'essais sur chaque enroulement de phase séparément (voir Figure 3) constitue la méthode recommandée pour évaluer les tendances et obtenir des valeurs comparatives pour les phases individuelles. Le même circuit est applicable pour les essais réalisés sur les enroulements polyphasés raccordés à la terre, en connectant les enroulements de phase destinés aux essais ensemble et les autres à la terre.

Si l'instrument de mesure est équipé d'une option de garde, au lieu de raccorder les enroulements de phase restants à la terre, il est possible de les connecter au système de garde afin d'éliminer les effets des courants entre les enroulements de phase, tels que les courants de fuite et les courants du revêtement anti-effluves. Cette démarche constituant un écart par rapport à la procédure normalisée, il faut la noter dans le rapport d'essai.

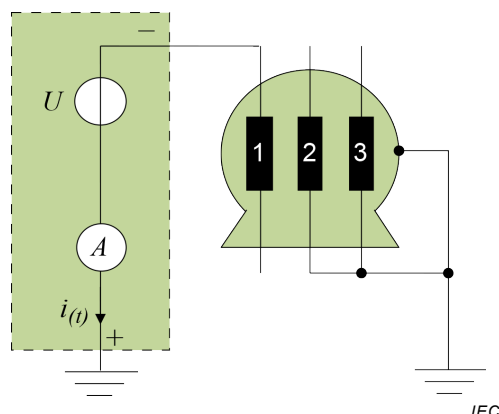


Figure 3 – Connexion pour une mesure phase-terre

6.3.2.3 Connexion pour les mesures entre phases

Cet essai n'est pas une procédure de mesure normalisée, mais elle peut fournir des informations supplémentaires d'ordre diagnostique. Voir l'Annexe D.

6.3.3 Autres enroulements

Les autres enroulements, tels que les enroulements de champ ou les enroulements statoriques haute tension, doivent être raccordés de la même manière que pour la mesure phase-terre de l'enroulement statorique (voir 6.3.2.2).

Il est nécessaire de déconnecter de l'objet en essai tous les éléments qui ne font pas partie intégrante du circuit de mesure, tels que les balais des systèmes d'excitation statique, en relevant ou en retirant ces balais. Les diodes tournantes doivent être montées en pont, pour éviter tout problème en cas d'endommagement de l'enroulement au cours des essais. La même procédure s'applique pour les équipements de surveillance installés de manière permanente, tels que les appareils de surveillance du courant du rotor ou les systèmes de mesure de la température en ligne.

6.4 Tension de mesure

6.4.1 Type et amplitude

La mesure de la résistance d'isolement nécessite l'application d'une tension continue. L'amplitude de tension doit être limitée à une valeur appropriée pour la tension assignée de l'enroulement et l'état de l'isolation de base. Ceci est particulièrement important dans le cas de machines basse tension ou d'enroulements mouillés. Si l'amplitude de tension est trop élevée, elle peut exercer des contraintes excessives sur l'isolation et provoquer une défaillance de l'isolation. Les lignes directrices relatives aux amplitudes de tension sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Lignes directrices relatives aux amplitudes de tension continue à appliquer durant la mesure de résistance d'isolement

Tension assignée V	Amplitude de tension continue V
< 1 000	500
1 000 à 2 500	500 à 1 000
2 501 à 5 000	1 000 à 2 500
5 001 à 12 000	2 500 à 5 000
> 12 000	5 000 à 10 000

NOTE Les essais peuvent être réalisés avec des amplitudes plus grandes si cette condition a fait l'objet d'un accord entre l'organisme d'essai et le client.

6.4.2 Polarité

Les mesures de résistance d'isolement sont généralement réalisées à une tension continue constante de polarité négative. Une polarité négative est préférable pour répondre au phénomène d'électroendosmose en cas d'humidité à l'intérieur du système d'isolation.

6.5 Temps de mesure

Les mesures de la RI sont prises après l'application de la tension d'essai pendant le temps spécifié, par exemple après 1 min pour la résistance d'isolement R_{i1} et après 10 min pour la résistance d'isolement R_{i10} .

6.6 Sécurité

En raison de l'effet de polarisation, l'isolation de l'enroulement maintiendra une charge pendant une longue durée après la déconnexion de la tension d'alimentation. Il est important, après l'essai, de réduire la tension d'essai à zéro et de relier l'objet en essai à la terre avant la déconnexion de l'instrument d'essai. La terre doit rester appliquée aux bornes de la phase ou de l'enroulement pendant un temps au moins égal à 4 fois la durée d'application de la tension.

6.7 Procédures de mesure

6.7.1 Procédure normalisée

Il convient d'appliquer la tension d'essai instantanément et de la maintenir constante tout au long de l'essai. La tension d'essai doit être atteinte en 5 s maximum. Le décompte du temps de mesure débute après l'obtention du niveau de tension d'essai spécifié. Les lectures sont faites après les temps spécifiés. Il existe différentes procédures pour soumettre à essai toutes les phases de l'enroulement simultanément et pour mesurer une phase à la fois dans les enroulements polyphasés.

Lors de la mesure simultanée de toutes les phases dans un enroulement polyphasé, ou de l'enroulement dans un enroulement monophasé, une fois l'essai terminé, la tension d'essai est réduite à zéro et, pour des raisons de sécurité, il convient immédiatement de court-circuiter, relier à la terre et décharger l'objet en essai pendant un temps au moins égal à 4 fois la durée de mise sous tension de l'enroulement (voir 6.6).

Dans les enroulements polyphasés où chaque phase est soumise aux essais individuellement (les autres phases étant reliées à la terre), une fois l'essai terminé sur la première phase, la terre doit être appliquée et rester appliquée pendant un temps au moins égal à 4 fois la durée d'application de la tension. Tant que la première phase est reliée à la terre, la deuxième et les autres phases peuvent être soumises aux essais tour à tour en lui raccordant l'instrument d'essai tandis que les autres phases sont reliées à la terre. En variante, les connexions peuvent être modifiées quand le courant de décharge avec la borne reliée à la terre est suffisamment faible, par exemple 10 nA.

Lorsque la mesure d'isolement constitue un aspect important de la maintenance, il est recommandé de vérifier le fonctionnement de l'instrument à l'aide de résistances haute tension dans la gamme de 100 MΩ. Il convient de réaliser cette vérification avant et après les essais, et elle est particulièrement importante pour les instruments alimentés par batteries.

6.7.2 Procédures spéciales

D'autres procédures d'essai peuvent être utilisées afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état de l'isolation. Voir l'Annexe E.

7 Interprétation des résultats de mesure

7.1 Généralités

Les résultats de mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation peuvent être utilisés au minimum aux fins suivantes:

- L'estimation de la capacité d'une machine à subir un essai de tenue en tension, ou de son aptitude au fonctionnement, peut dépendre de l'obtention de valeurs minimales recommandées pour la résistance d'isolement et/ou l'index de polarisation (voir 7.2).
- L'historique des résultats de mesure de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation d'une machine donnée, établi dans des conditions uniformes pour les variables contrôlables, est reconnu comme un moyen utile d'évaluer les tendances pour certains aspects de l'état de l'isolation au fil des années (voir 7.3).
- Les valeurs de résistance d'isolement et d'index de polarisation d'enroulements de phase individuels ou de différentes machines de conception identique, mesurées en conditions uniformes pour les variables contrôlables, peuvent être utilisées pour comparer l'état des isolations.

Pour ces objectifs spécifiques a), b) et c), les influences de mesure doivent être prises en considération (voir 7.4).

7.2 Aptitude aux essais et au fonctionnement

La résistance d'isolement et l'index de polarisation peuvent être utilisés pour estimer l'aptitude d'une machine à subir un essai de tenue en tension ou son aptitude au fonctionnement. Il convient que la résistance d'isolement et l'index de polarisation des machines soient supérieurs aux valeurs minimales recommandées (voir Tableaux 3 et 4). Si les valeurs mesurées sont inférieures aux valeurs minimales recommandées, il n'est pas recommandé d'appliquer un essai de tenue en tension ni de faire fonctionner la machine, sauf pour des raisons de conception ou si un historique de mesures aussi basses existe déjà.

Les essais de résistance d'isolement peuvent également être utilisés pour déterminer si un enroulement a échoué à un essai de tenue en tension. Si les valeurs mesurées, enregistrées après un essai de tenue en tension, sont nettement plus basses que les valeurs enregistrées avant l'application de la tension, un endommagement de l'isolation peut s'être produit durant les essais de tenue en tension, même si la tension d'essai n'a pas chuté du fait de courants de défaut élevés.

Si les valeurs mesurées sont inférieures aux valeurs minimales recommandées en raison de la présence de saleté ou d'une humidité excessive et qu'un défaut d'isolation peut être exclu, le nettoyage et le séchage de l'enroulement peuvent améliorer les résultats mesurés. Les mesures de la résistance d'isolement peuvent être utilisées pour contrôler l'efficacité du processus de séchage.

Si la résistance d'isolement R_{i1} à 40 °C est supérieure à 5 000 MΩ, l'index de polarisation peut être ambigu et peut être ignoré.

Pour les systèmes d'isolation à base de gomme-laque et d'asphalte, un index de polarisation très élevé (par exemple supérieur à 8) peut indiquer que l'isolation a subi un vieillissement thermique, et peut présenter un risque de défaillance. Si l'examen physique (en touchant l'isolation, par exemple) confirme que l'isolation est sèche et fendillée, il est préférable de ne pas pratiquer de nettoyage ou d'essai de tenue en tension sur l'enroulement. Une défaillance peut survenir à tout moment si la machine est remise en fonctionnement.

7.3 Evaluation des tendances de l'état de l'isolation

Si un historique des mesures de la résistance d'isolement (R_{i1}) d'une machine est disponible, une comparaison du résultat d'essai actuel avec des résultats antérieurs pourra aider à évaluer l'état de l'isolation. Il est important, néanmoins, de comparer des essais réalisés dans des conditions similaires, à savoir la température de l'enroulement, l'amplitude de la tension, la durée de l'essai et l'humidité relative (voir 6.1) et, si possible, d'utiliser un équipement d'essai identique. Pour comparer des essais réalisés à des températures d'enroulement différentes, il convient de corriger les résultats selon la même température de base (voir 6.1.2).

Une forte baisse de la valeur de R_{i1} ou IP par rapport à une mesure précédente peut indiquer la présence d'une contamination de surface ou d'humidité. Si une valeur faible de IP apparaît à une température élevée (au-dessus de 60 °C), il est recommandé de réaliser une deuxième mesure en dessous de 40 °C, mais au-dessus du point de rosée, afin de vérifier l'état réel de l'isolation.

7.4 Comparaison entre les machines ou entre les phases

Si R_{i1} est inférieure à 5 000 MΩ pour l'enroulement complet, une différence significative de la valeur de R_{i1} ou IP entre des machines identiques peut indiquer une contamination de surface, la présence d'humidité ou un endommagement de l'isolation. Dans ce cas, il convient d'analyser la raison de cette différence.

7.5 Effets des valeurs très élevées de résistance d'isolement

En fonction du niveau de la tension d'essai et de l'état de l'isolation, le courant mesuré peut ne pas dépasser des valeurs situées en dessous du microampère. Tout bruit provenant de sources externes, par exemple les fluctuations de tension générées par l'instrument d'essai, mais également les fluctuations de température et même les effets électrochimiques provoqués par l'humidité, peut engendrer des courants supérieurs aux courants traversant l'isolation, ce qui occasionne des erreurs de mesure.

Lors de sessions de mesure plus longues, en particulier, les conditions peuvent varier au point de pouvoir conduire à une mauvaise interprétation des résultats.

A titre de conseil général, l'index de polarisation n'est pas indicatif de l'état de l'isolation quand la résistance d'isolement atteint des valeurs de l'ordre de 5 000 MΩ et plus.

Il est recommandé de consulter le manuel de l'instrument d'essai. Il convient que tous les fabricants publient le niveau de précision de l'instrument d'essai. On peut ainsi obtenir un meilleur jugement des résultats.

7.6 Limites de l'essai de résistance d'isolement

Les données d'essai de résistance d'isolement sont utiles pour évaluer la présence de certains problèmes tels que la contamination, l'humidité absorbée ou la fissuration sévère; cependant, certaines limites sont décrites ci-après:

- a) La résistance d'isolement d'un enroulement n'est pas directement liée à sa rigidité diélectrique et à la défaillance en service du système d'isolation d'un enroulement. Les mesures de la résistance d'isolement ne donnent aucune indication sur la répartition des

points faibles dans l'isolation, par exemple de grandes vacuoles provoquées par un défaut d'imprégnation ou une détérioration thermique.

- b) Les enroulements possédant une surface de développante extrêmement grande, les machines de grande taille ou à faible vitesse, les enroulements de champ de rotor rond ou les machines à commutateurs peuvent avoir des valeurs de résistance d'isolement inférieures à la valeur recommandée. Dans ce cas, l'évaluation historique des tendances de la résistance d'isolement est utile pour évaluer l'état de l'isolation.
- c) Les essais de résistance d'isolement étant réalisés lorsque la machine est à l'arrêt, ces essais ne permettent pas de détecter les problèmes dus à la rotation, tels que le desserrage des bobines, ou les vibrations provoquant un mouvement des développantes.

8 Limites recommandées pour la résistance d'isolement et l'index de polarisation

8.1 Généralités

Les valeurs suivantes de résistance d'isolement et d'index de polarisation sont les valeurs les plus basses recommandées pour l'enroulement dans le cadre d'un essai de tenue en tension ou du fonctionnement. Dans certains cas, des matériaux d'isolation ou des conceptions spécifiques peuvent présenter des valeurs inférieures (par exemple, pour les conceptions spéciales de revêtements anti-effluves, voir l'Article C.3). Il convient d'établir les valeurs minimales pour ces machines sur la base d'une comparaison avec des données historiques.

Les valeurs recommandées ne s'appliquent pas pour les enroulements complets qui n'ont pas encore été imprégnés.

8.2 Résistance d'isolement

Le Tableau 3 fournit des valeurs minimales recommandées pour la résistance d'isolement R_{i1} d'un enroulement complet corrigées pour une température de base de 40 °C.

Tableau 3 – Valeurs minimales recommandées pour la résistance d'isolement à une température de base de 40 °C

Objet en essai	Résistance d'isolement minimale R_{i1} MΩ
Systèmes haute tension à base de gomme-laque et d'asphalte et tous les enroulements de champ	tension assignée (kV) + 1
Systèmes haute tension à base de résine synthétique (enroulements préformés)	100
Enroulements basse tension en vrac ou préformés et induits en courant continu	5

Si la valeur minimale de la résistance d'isolement pour l'enroulement complet n'est pas respectée, se reporter à la section 6.3.2.2 pour pouvoir réaliser des mesures supplémentaires. Pour plus d'informations, voir l'Annexe D.

8.3 Index de polarisation

Le Tableau 4 fournit les valeurs minimales recommandées pour l'index de polarisation d'un enroulement complet. Ces valeurs sont uniquement applicables pour les systèmes d'isolation des machines à haute tension, dans lesquelles un courant de polarisation caractéristique I_p est susceptible d'occasionner une variation marquée des mesures de la résistance d'isolement à 1 min et à 10 min.

Si la température de l'enroulement varie de façon significative entre les mesures de la résistance d'isolement effectuées à 1 min et à 10 min, les valeurs corrigées à la température de base de 40 °C doivent être utilisées pour le calcul de l'index de polarisation.

Tableau 4 – Valeurs minimales recommandées pour l'index de polarisation des systèmes d'isolation à haute tension

Types de systèmes d'isolation à haute tension	Index de polarisation minimal <i>IP</i>
A base de gomme-laque et d'asphalte	1,5
A base de résine synthétique (par ex., époxy, polyester, polyesterimide et autres)	2,0
NOTE Ces valeurs minimales sont basées sur le rapport des mesures de R_i à 10 min et à 1 min.	

Ces valeurs minimales recommandées ne sont pas applicables pour:

- Les petites machines à enroulements en vrac, les machines à enroulements de champ non isolés, les enroulements de rotor à cage d'écureuil et les induits de machine en courant continu (voir Article 5)
- Les machines ayant des revêtements anti-effluves en contact galvanique avec les connexions des enroulements (voir Article A.6 et Article C.3)
- Les enroulements où R_{i1} est $>5\,000\text{ M}\Omega$ (voir Article 7.5)

9 Rapport d'essai

9.1 Enroulements vieillis en fonctionnement

Dans le rapport d'essai, il convient de fournir au minimum les données, la décision d'essai et, s'il est utilisé pour l'évaluation des tendances et la comparaison des états de l'isolation, un bilan relatif à l'interprétation des résultats de mesure. Il convient de fournir les informations suivantes dans le rapport d'essai:

- Informations d'identification
 - Nom de l'installation
 - Numéro de la machine
- Date de la mesure
- Conditions climatiques
 - Température ambiante
 - Température de l'enroulement
 - Température relative et ambiante pour le calcul de l'humidité absolue et du point de rosée
- Instrument
 - Nom, type
 - Fabricant
 - Numéro de série
 - Échéance d'étalonnage
- Circuit d'essai, réglages des instruments et conditions d'essai
 - Tension d'essai et polarité
 - Durée, si elle est exigée
- Caractéristiques de l'isolation selon les conditions de mesure, corrigées à la température de base:

- résistance d'isolement à 1 min
- résistance d'isolement à 10 min, le cas échéant
- Index de polarisation, le cas échéant
- Correction de température, le cas échéant
- Affichage graphique des courbes de mesure, le cas échéant
 - Courant mesuré en fonction du temps, de préférence sous forme de diagramme bi-logarithmique
 - Résistance d'isolement mesurée en fonction du temps, de préférence sous forme de diagramme bi-logarithmique
- Nom du personnel responsable des essais
- Informations spécifiques au document
- Section dédiée aux commentaires, par exemple, écart par rapport à la procédure d'essai normalisée, observations, etc.

Il est conseillé d'enregistrer les résultats de mesure dans le format de données le plus original en vue de consultations ultérieures.

En fonction du type de document, s'il s'agit d'un certificat d'essai individuel ou d'une partie d'un rapport d'évaluation de l'état, le contenu du rapport de mesure peut être complété par des informations supplémentaires, par exemple, le mode de fonctionnement, l'âge de la machine, etc.

9.2 Enroulements neufs

La mesure de la résistance d'isolement sur des enroulements neufs peut compléter l'essai de tenue en tension élevée, en réalisant un essai de résistance d'isolement de 1 min avant et après l'essai de tenue en tension élevée.

Par conséquent, la plupart des informations nécessaires pour établir un rapport complet sont intégrées dans le protocole d'essais de résistance. Une sélection des informations exigées, définies dans 9.1, peut être suffisante.

Annexe A (informative)

Composantes du courant continu

A.1 Courant total I_T

Le courant total est la somme de tous les courants engendrés par l'application de la tension d'essai continue dans l'objet en essai. Il est possible de le mesurer dans les connexions situées entre la source de tension et l'objet en essai (Figure 1).

Les caractéristiques générales de temps du courant total et la contribution des composantes sont illustrées dans la Figure A.1. Des exemples de conditions d'isolation spécifiques sont donnés dans l'Annexe C.

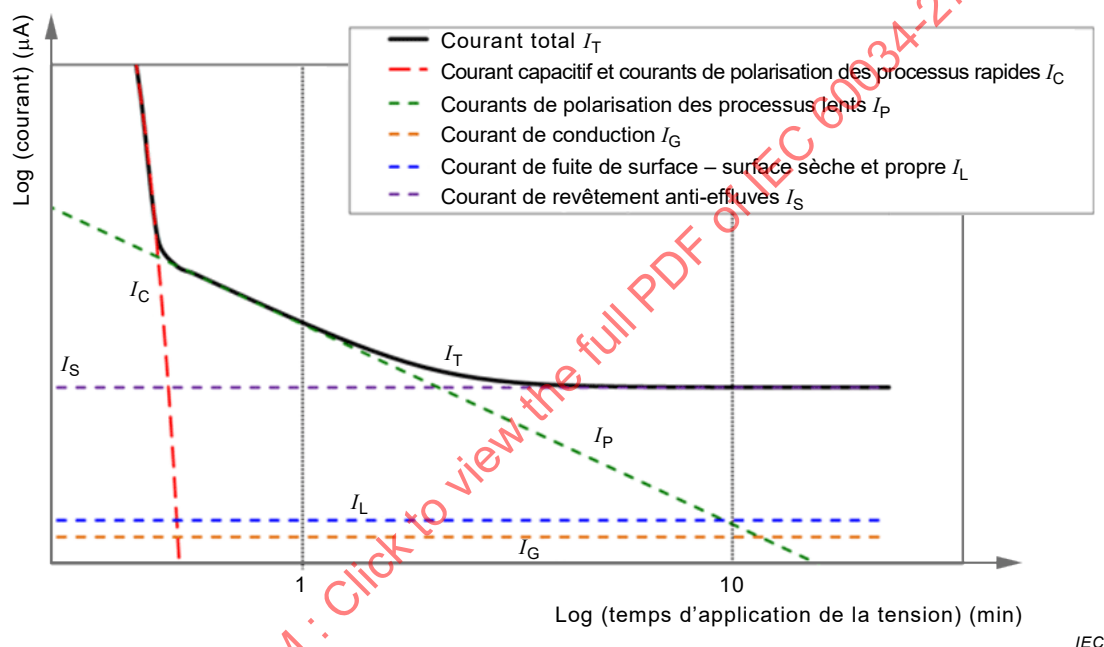


Figure A.1 – Relations entre différents courants et le temps

A.2 Courant capacitif I_C

Le courant capacitif est engendré par la charge ou la décharge de la capacité de l'enroulement à travers la résistance du circuit, composée de la résistance interne de la source de tension et des résistances des connexions. Le courant capacitif $i_c(t)$ est dépendant du temps (t) en secondes selon la Formule (A.1).

$$i_c(t) = \frac{\Delta U_0}{R_m} \cdot e^{-\frac{t}{R_m \cdot C_0}} \quad (\text{A.1})$$

où

U_0 est la tension (V);

R_m est la résistance interne de la source de tension et les résistances des connexions (Ω);

C_0 est la capacité (F).

Lorsqu'un palier de tension de ΔU_0 est appliqué à l'enroulement, la valeur crête du courant capacitif est le quotient de ΔU_0 et de la résistance R_m . La constante de temps de la fonction exponentielle de décroissance du courant est le produit de la résistance R_m et de la capacité C_0 . Même pour les grands enroulements d'une capacité de l'ordre du microfarad, la constante de temps n'est pas susceptible de dépasser une seconde environ avec des instruments de mesure typiques dont la valeur de R_m est relativement faible. Par conséquent, le courant capacitif a une durée trop courte pour avoir une incidence sur la mesure de la résistance d'isolement et l'index de polarisation.

A.3 Courant de conduction I_G

Le courant de conduction est engendré par un mouvement dirigé des électrons et des ions dans le champ électrique. Pour de faibles amplitudes de champ, la conduction est principalement causée par les ions. Pour des amplitudes de champ élevées, lorsque l'on s'approche de la valeur de résistance au claquage, les électrons contribuent de plus en plus à la conduction.

Etant donné que $R_m \ll R_V$, le courant de conduction I_G d'un élément du volume d'isolation entre des électrodes parallèles est donné par la Formule A.2:

$$I_G = \frac{U_0}{R_V} \quad (\text{A.2})$$

où

U_0 est la tension (V);

R_V est la résistance volumique $R_V = \frac{d}{\kappa_V \cdot A}$ (Ω);

κ_V est la conductivité volumique spécifique (S/m);

d est la distance entre les électrodes (m);

A est la surface de l'électrode (m^2).

Le courant de conduction à travers la masse de l'isolant dépend du matériau diélectrique, de l'amplitude du champ électrique, de la température et de la teneur en humidité de l'isolation. La conductivité volumique spécifique n'est pas très dépendante de l'amplitude du champ électrique, tant que la contrainte durant la mesure se situe largement en dessous de la valeur de résistance au claquage. La température peut n'avoir aucune influence significative si l'énergie d'activation du matériau isolant est faible, auquel cas l'énergie d'activation dépend de la mobilité des ions et des électrons dans le matériau isolant en fonction de la température selon la formule:

$$\kappa_V = \kappa_0 \cdot e^{-\frac{W_a}{k \cdot T}} \quad (\text{A.3})$$

où

κ_V est la conductivité volumique spécifique (S/m);

κ_0 est le paramètre du matériau (S/m);

W_a est l'énergie d'activation (eV);

k est la constante de Boltzmann (eV/K);

T est la température absolue (K).

La conductivité volumique, et donc le courant de conduction, dépendent de façon exponentielle de l'énergie d'activation et de la température (voir Formules A.2 et A.3).

La présence d'humidité dans la structure d'isolation augmente le courant de conduction en raison de la conductivité de l'eau elle-même et d'un nombre croissant d'ions issus de la dissociation de contaminants internes et des produits de la décomposition hydraulique. Lorsque la teneur en humidité augmente, la conductivité volumique spécifique est susceptible de s'accroître de plusieurs ordres de grandeur.

A.4 Courant de polarisation I_p

La polarisation dans les diélectriques solides est un effet engendré par le champ électrique, qui aligne les dipôles induits par le champ ou qui existent de façon permanente. Le processus d'alignement des dipôles dans le champ, appelé relaxation, exige du temps, ce qui dépend de l'inertie inhérente au mécanisme. Dans le circuit équivalent, les différents mécanismes sont représentés par les combinaisons de séries R-C (Figure 1, indices 1,2...n). Les constantes de temps de relaxation $\tau_j = R_j \cdot C_j$ ($j = 1...n$) varient dans des proportions importantes, de processus extrêmement rapides tels que la polarisation électronique à des durées relativement longues pour des processus lents tels que la polarisation interfaciale, avec des constantes de temps allant de quelques millisecondes à plusieurs heures.

Etant donné que la résistance interne et les résistances des connexions exercent une influence négligeable ($R_m \ll R_j$), le courant de polarisation $I_p(t)$ peut être généralement exprimé comme une fonction du temps (t) par la Formule (A.4).

$$i_p(t) = \Delta U_0 \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_j}} \quad (\text{A.4})$$

où

U_0 est la tension (V);

τ_j est la constante de temps de relaxation d'un mécanisme de polarisation j , $\tau_j = R_j \cdot C_j$ (s);

R_j, C_j est la résistance et la capacité caractéristiques d'un mécanisme de polarisation j (Ω), (F).

Les courants des processus rapides décroissent jusqu'à zéro en moins d'une milliseconde; pour cette raison, seuls les processus de polarisation lents sont utilisables pour la mesure de la résistance d'isolation. De ce fait, seul l'effet de polarisation interfaciale persiste. Il est provoqué par la lente dérive des ions et d'une quantité mineure d'électrons libres, qui s'accumulent au niveau des interfaces internes et des électrodes. Etant donné que les isolants à diélectriques composites incluent différents types d'interfaces microscopiques et macroscopiques, le courant de polarisation est une superposition de composantes de courant de différentes amplitudes et constantes de temps. Une expression empirique pour la somme des courants de polarisation est donnée par la Formule (A.5). Certaines constantes de temps peuvent être égales à plusieurs minutes ou plusieurs heures.

$$i_p(t) = \beta \cdot \Delta U_0 \cdot C_0 \cdot t^{-n} \quad (\text{A.5})$$

où

β est un facteur représentant l'isolation et son état;

U_0 est la tension (V);

C_0 est la capacité géométrique (F);

n est l'exposant représentant l'isolation et son état.

Etant donné qu'une augmentation de la température accroît la mobilité ionique et la disponibilité en électrons, le courant de polarisation augmente en cas de hausse de la température.

La présence d'humidité et de contamination provoquera également une augmentation de la disponibilité des porteurs de charge pour la polarisation interfaciale.

Pour une isolation sèche et propre, le courant de polarisation est dominant. Le courant de polarisation étant représenté par une ligne droite dans un diagramme bi-logarithmique, il est recommandé de représenter graphiquement le courant sous forme de diagramme $\log(i)/\log(t)$.

A.5 Courant de fuite de surface I_L

Le courant de fuite de surface est engendré par la conduction dans les couches étrangères au substrat, en cas de dépôts solides conducteurs intrinsèques dus principalement aux électrons ou, dans les films huileux et les couches mouillées par l'eau, dus essentiellement aux ions. Des couches à surface mouillée peuvent être formées soit par mouillage direct soit par accumulation de molécules d'eau provenant de l'air, due à l'adsorption, l'hygroscopicité des couches étrangères et la condensation.

Le courant de fuite de surface dépend de la résistance de surface selon la Formule (A.6):

$$I_L = \frac{U_0}{R_L} \quad (\text{A.6})$$

où

U_0 est la tension (V);

R_L est la résistance de fuite de surface, $R_L = \frac{l}{\kappa_L \cdot b}$ (Ω);

κ_L la conductivité de couche spécifique (S·m/m);

l est la longueur de couche entre les électrodes (m);

b largeur de couche (m).

La résistance de fuite de surface peut chuter quand l'humidité relative de l'air augmente dans un intervalle de 30 % à 90 % de plusieurs ordres de grandeur et elle suit les changements d'humidité relative presque instantanément.

Lorsqu'un état de condensation survient (température de surface < température du point de rosée), la résistance de surface diminue à mesure que la quantité d'eau augmente sur la surface.

La résistance de fuite de surface de couches mouillées dépend de la température selon une relation exponentielle empirique.

Un dépôt sec de couches de matériaux intrinsèquement conducteurs, tels que le cuivre ou la poussière de carbone, peut réduire de façon significative la résistance de fuite de surface. Les propriétés et les dépendances sont dominées par des mécanismes de conduction électronique. Etant donné que la poussière métallique s'oxyde dans l'air pour former des oxydes métalliques, sa résistance de fuite de surface est supérieure à celle des couches de poussière de carbone.

La contribution du courant de fuite de surface dépend de l'état de l'isolation de la développante; si une mesure est réalisée sur chaque enroulement de phase tandis que les autres sont reliés à la terre, cette contribution est principalement due à la portion de séparation de phase de la développante.

A.6 Courant de revêtement anti-effluves I_s

Si un revêtement anti-effluves continu recouvre la développante complète d'un stator, et que le revêtement est en contact galvanique avec les connexions de l'enroulement par conception, un courant de revêtement anti-effluves apparaît. Cette conception anti-effluves spécifique étant unique, le contexte technique ainsi que les conséquences pour la mesure et l'interprétation de la résistance d'isolement et de l'index de polarisation sont décrits dans l'Article C.3.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-4:2018

Annexe B (informative)

Estimation graphique du paramètre de pente X pour la correction de température à partir des données de mesure

L'exemple suivant fournit une estimation de X à partir d'une mesure de la résistance d'isolement d'un enroulement complet. Les valeurs du Tableau B.1 sont obtenues à différentes températures.

Tableau B.1 – Exemple de données obtenues à partir de mesures de la résistance d'isolement pour différentes températures de l'enroulement

Température de l'enroulement T °C	Résistance d'isolement R_{i1} M Ω
26	625
33	433
45	308
58	165
64	103

Pour l'estimation du paramètre de pente X de la Formule 2, les points de données individuels sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique. Ces points de données peuvent être présentés sur une ou deux lignes droites. Pour une représentation en deux lignes, il convient que la procédure d'ajustement soit séparée en deux zones de températures: au-dessus de 40 °C et en dessous de 40 °C. L'ajustement de la courbe peut être obtenu mathématiquement par régression avec une fonction exponentielle de base quelconque. Avec la ligne d'approximation fonctionnelle du diagramme, le paramètre X peut être directement obtenu en choisissant une valeur de résistance d'isolement R' et une seconde valeur R'' , avec $R'' = 2 \times R'$, et en lisant les valeurs de température correspondantes sur la ligne d'ajustement. La différence entre les valeurs de température est égale au paramètre de pente X (voir Figure B.1). Pour les exemples de données du Tableau B.1, le paramètre de pente X est 16 K.