

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Rotating electrical machines –
Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding
insulation**

**Machines électriques tournantes –
Partie 27-2: Mesurages en fonctionnement des décharges partielles effectués
sur le système d'isolation**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2023 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 Secretariat
3, rue de Varembé
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 corrigendum or an amendment might have been published.

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 once a month by email.

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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

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.

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 une fois par mois par email.

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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Rotating electrical machines –
Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding
insulation**

**Machines électriques tournantes –
Partie 27-2: Mesurages en fonctionnement des décharges partielles effectués
sur le système d'isolation**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.160.01

ISBN 978-2-8322-7873-4

**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.....	6
INTRODUCTION.....	8
1 Scope.....	10
2 Normative references	10
3 Terms and definitions	11
4 Cause and effects of on-line PD	13
5 Noise and disturbances	14
5.1 General.....	14
5.2 Noise and disturbance sources	14
6 Measuring techniques and instruments.....	15
6.1 General.....	15
6.2 Pulse propagation in windings.....	16
6.3 Signal transfer characteristics	16
6.4 PD sensors	19
6.4.1 General	19
6.4.2 Design of PD sensors	19
6.4.3 Reliability of PD sensors.....	20
6.5 PD measuring device	20
6.6 PD measuring parameters.....	21
6.6.1 General	21
6.6.2 PD magnitude.....	21
6.6.3 Additional PD parameters	21
7 Installation of measuring systems	21
7.1 General.....	21
7.2 Installation of PD sensors	21
7.3 Outside access point and cabling.....	22
7.4 Installation of the PD measuring device	23
7.5 Installation of operational data acquisition systems	23
8 Normalization of measurements.....	24
8.1 General.....	24
8.2 Normalization for low frequency systems	24
8.2.1 General	24
8.2.2 Normalization procedure.....	24
8.3 Normalization / sensitivity check for high and very high frequency systems.....	25
8.3.1 Specification for the electronic pulse generation	25
8.3.2 Configuration of the machine	27
8.3.3 Sensitivity check.....	27
9 Measuring procedures	27
9.1 General.....	27
9.2 Machine operating parameters.....	28
9.3 Baseline measurement.....	28
9.3.1 General	28
9.3.2 Comprehensive test procedure	28
9.4 Periodic measurements.....	29
9.5 Continuous measurements.....	30
10 Visualization of measurements	30

10.1	General.....	30
10.2	Visualization of trending parameters	31
10.3	Visualization of PD patterns	31
11	Interpretation of on-line measurements.....	34
11.1	General.....	34
11.2	Evaluation of basic trend parameters	34
11.3	Evaluation of PD patterns	35
11.3.1	General	35
11.3.2	PD pattern interpretation.....	36
11.4	Effect of machine operating factors	36
11.4.1	General	36
11.4.2	Machine operating factors.....	36
11.4.3	Steady state load conditions	37
11.4.4	Transient load conditions.....	37
12	Test report.....	38
Annex A	(informative) Nature of PD in rotating electrical machines	41
A.1	Types of PD in rotating electrical machines.....	41
A.1.1	General	41
A.1.2	Internal discharges	41
A.1.3	Slot discharges.....	42
A.1.4	Discharges in the end-winding	42
A.1.5	Conductive particles	42
A.2	Arcing and sparking	42
A.2.1	General	42
A.2.2	Arcing at broken conductors.....	43
A.2.3	Vibration sparking.....	43
Annex B	(informative) Disturbance rejection and signal separation	44
B.1	General.....	44
B.2	Frequency domain separation	44
B.3	Time domain separation.....	44
B.4	Combination of frequency and time domain separation	45
B.5	Synchronous multi-channel measurement	46
B.6	Signal gating.....	47
B.7	Pattern recognition.....	48
Annex C	(informative) Examples of Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pattern.....	50
C.1	General.....	50
C.2	Principal appearance of phase resolved PD patterns	50
C.3	Example of typical PRPD patterns recorded in laboratory	53
C.3.1	General	53
C.3.2	Internal discharges	53
C.3.3	Slot partial discharges	55
C.3.4	Discharges in the end-winding	56
C.4	Example of typical PRPD patterns recorded on-line	59
C.4.1	General	59
C.4.2	Internal discharges	59
C.4.3	Slot partial discharges	61
C.4.4	Discharges in the end-winding	62
C.5	Other complex examples.....	65

Annex D (normative) Specifications for conventional PD coupling capacitors	67
D.1 General.....	67
D.2 Datasheet information	67
D.3 Type tests	67
D.3.1 General	67
D.3.2 Voltage endurance.....	67
D.3.3 Tracking resistance	68
D.3.4 Lightning impulse test.....	68
D.3.5 Dissipation factor.....	68
D.3.6 Capacitance stability in temperature	68
D.3.7 Thermal cycling	68
D.3.8 Frequency response	68
D.4 Mechanical vibration and shock capabilities	68
D.5 Routine tests.....	69
D.5.1 General	69
D.5.2 Dielectric withstand test at power frequency	69
D.5.3 Partial discharge extinction voltage test.....	69
D.5.4 Capacitance and dissipation factor	69
Figure 1 – Generic overview of PD measuring system and its subsystems	15
Figure 2 – Cascade of frequency response channels	16
Figure 3 – Idealized frequency response of a PD pulse at the PD source and at the machine terminals; frequency response of different PD measuring systems: a) low frequency range, b) high frequency range, c) very high frequency range.....	17
Figure 4 – Measuring object, during normalization, neutral point in same condition as during operation.....	25
Figure 5 – Arrangement for sensitivity check.....	26
Figure 6 – Recommended test procedure with consecutive load and temperature conditions	29
Figure 7 – Example of the trend in peak PD activity in three phases over an 18-year interval using periodic measurements	31
Figure 8 – Examples of a PRPD pattern.....	32
Figure 9 – Phase to phase PD PRPD plots where the PD is caused by insufficient spacing between the endwindings of phases B and C	33
Figure B.1 – Example for time domain separation by time of pulse arrival.....	45
Figure B.2 – Combined time and frequency domain disturbance separation (time frequency map).....	46
Figure B.3 – 3 phase star diagram of multi-channel measurement	47
Figure C.1 – Phase-earth driven PD – PD predominantly centered on 45° and 225° after zero crossing of phase-to-earth voltage	51
Figure C.2 – PD events and other sources, e.g. non-PD sources, that are not centered on 45° and 225° after zero crossing of phase-to-earth voltage	52
Figure C.3 – Example of internal void discharges PRPD pattern, recorded during laboratory simulation.....	54
Figure C.4 – Example of internal delamination PRPD pattern, recorded during laboratory simulation.....	54
Figure C.5 – Example of delamination between conductor and insulation PRPD pattern, recorded during laboratory simulation	55

Figure C.6 – Slot partial discharges activity and corresponding PRPD pattern, recorded during laboratory simulation	56
Figure C.7 – Corona activity at the S/C and stress grading coating, and corresponding PRPD pattern, recorded during laboratory simulation	56
Figure C.8 – Surface tracking activity along the end arm and corresponding PRPD pattern, recorded during laboratory simulation	57
Figure C.9 – Surface discharges at the junction between stress control and conductive slot coatings:a) Insulating tape simulating a bad electrical connection between conductive slot coating and stress control coating and the corresponding PRPD;b) and c) the connection is completely interrupted	58
Figure C.10 – Gap type discharge activities and corresponding PRPD patterns, recorded during laboratory simulations	59
Figure C.11 – Example of internal void discharges PRPD pattern, recorded on-line	60
Figure C.12 – Example of internal delamination PRPD pattern, recorded on-line	60
Figure C.13 – Example of delamination between conductor and insulation PRPD pattern, recorded on-line	61
Figure C.14 – PD pattern of phase 2 recorded on-line in April 2012 without any filtering indicating slot PD	62
Figure C.15 – Picture of a bar removed for expertise chosen to be the one with the highest level on phase 2 and close to line side when scanning slots using the TVA probe in January 2014	62
Figure C.16 – PD pattern recorded on-line on phase 2 in September 2016 (maximum scale is 1 V)	62
Figure C.17 – PRPD plot and photo of a stator bar in the same phase of a large air-cooled turbine generator showing signs of deterioration of the slot conductive coating, as well deterioration of the interface between the slot conductive coating and the stress control coating	63
Figure C.18 – Surface tracking activity along the end arm and corresponding PRPD pattern, recorded on-line	63
Figure C.19 – Degradation caused by gap type discharges and corresponding PRPD patterns, recorded on-line	64
Figure C.20 – PRPD pattern recorded on-line, illustrating multiple PD sources showing the complexity	65
Figure C.21 – Three phase PRPD showing phase to phase PD between A and B phases as well as B and C phases; photo showing the as-found PD in the endwinding area due to inadequate separation between the phases	66
Table 1 – Operating condition stability to obtain valid trends in PD	30

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 27-2: On-line partial discharge measurements
on the stator winding insulation**

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 60034-27-2 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery. It is an International Standard.

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

Draft	Report on voting
2/2153/FDIS	2/2166/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

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

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under 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 document 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 60034-27-2:2023

INTRODUCTION

Partial Discharge (PD) on-line measurement of rotating electrical machines has gained widespread acceptance as it could reveal the presence of localized weak points of the stator insulation system and also various arcing and sparking phenomena. Nevertheless, it has emerged from several studies that not only are there many different methods of measurement in existence, but also the criteria and methods of analysing and finally assessing the measured data are often very different and not really comparable. Consequently, there is a need to have an International Standard (IS) to give defined guidelines to the users of on-line PD measurements to assess the condition of their insulation systems.

On-line PD measurements are recorded with the rotating electrical machine experiencing all of the operating stresses; thermal, electrical, environmental and mechanical. Due to the realistic stress impact on the winding during measurement and due to the fact that the measurement is performed during all kinds of normal operation like base load and peak load, PD on-line testing could identify changes of the winding insulation system at a premature stage and enables real-time condition assessment as part of predictive maintenance strategies.

PD trend evaluation and comparisons with machines of similar design and similar insulation system measured under similar conditions, using the same measuring equipment, are recommended to ensure reliable assessment of the condition of the stator winding insulation. The trending information provides a good measure for early indication of a change in insulation condition. This gives time for planning further standstill examination in terms of visual inspection and off-line testing during next inspection outage.

This document does not deal with on-line PD measurements on converter driven electrical machines because different measuring techniques are needed to distinguish between noise from the converter and PD from the winding.

Limitations: PD on-line tests on stator windings produce comparative, rather than absolute measurements. This creates a fundamental limitation for the interpretation of PD data. Therefore, acceptance criteria with simple limits for new or rewound stator windings cannot be established as the following reasons demonstrate:

- There are many types of PD sensors as well as recording and analysing instruments. Generally, they are incompatible and will produce different results for the same PD activity.
- Even with the same measuring system, the high frequency partial discharge pulses will interact with the winding capacitance and inductance on their way from point of origin to the measuring point, e.g. at the winding terminals. Thus, PD measurements taken at machines with different winding design and rating produce different PD results, even though the actual type of PD source is the same.
- Different types of winding defects produce different PD magnitudes and have different impact on insulation destruction. There is no strong correlation between high PD and high risk of insulation failure.
- PD activity may occur close or far from the PD sensor. In general, if the PD source is inside the winding coils far away from the PD sensor, it will produce a smaller response at the PD sensor at the terminals compared to a PD source at the phase connections nearby due to pulse attenuation.

Users should also be aware that there is no evidence that the time to failure of the stator winding insulation can be estimated using any PD quantity, alone or even in combination. In order to more comprehensively describe the condition of the stator insulation, PD measurements are required to be supplemented by other electrical tests. Also, determining the root cause of an insulation deterioration process using PD pattern recognition, especially if more than one process is occurring, is still somewhat subjective, although the digital analysing technology is evolving rapidly.

Noise and disturbance from electrical environment have a great impact to on-line PD measurement. Cross-coupling of PD and noise between different phases can make objective interpretation of the test results difficult. Therefore, different analogue and digital noise suppression techniques are used to improve PD measuring sensitivity and PD analysing tools.

Users of PD measurement should be aware that, due to the principles of the method, not all insulation-related problems in stator windings can be detected by measuring on-line PD activity, e.g. insulation failures involving continuous leakage currents due to conductive paths between different electrical potential of the insulation system or fine main insulation cracks with too small PD activity compared to normal delamination PD or pulse-less discharge phenomena.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-2:2023

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation

1 Scope

This part of IEC 60034-27 deals with on-line PD measurements and provides a common basis with standardized procedures if possible for:

- measuring techniques and instruments;
- the arrangement of the installation;
- normalization and sensitivity assessment;
- measuring procedures;
- noise reduction;
- the documentation of results;
- the interpretation of results;

with respect to partial discharge on-line measurements on the stator winding insulation of non-converter driven rotating electrical machines with rated voltage of 3 kV and up. This document covers PD measuring systems and methods detecting electrical PD signals. The same measuring devices and procedures can also be used to detect electrical sparking and arcing phenomena.

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 60034-27-1:2017, *Rotating electrical machines – Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation*

IEC 60034-27-3, *Rotating electrical machines – Part 27-3: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines*

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

IEC 60068-2-6, *Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal)*

IEC 60068-2-27, *Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock*

IEC 60112, *Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials*

IEC 60270:2000, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 62271-1, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear*

IEC TS 62478, *High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods*

ISO 8528-9: *Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets – Part 9: Measurement and evaluation of mechanical vibrations*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document the terms and definitions given in IEC 60270 apply, together with the following.

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

partial discharge

PD

localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which can or cannot occur adjacent to a conductor

3.2

on-line measurement

measurement taken with the rotating electrical machine in operation

3.3

off-line measurement

measurement taken with the rotating electrical machine at standstill, the machine being disconnected from the power system

Note 1 to entry: The necessary test voltage is applied to the winding from a separate voltage source.

3.4

conductive slot coating

conductive paint or tape layer in intimate contact with the groundwall insulation in the slot portion of the coil side, often called 'semiconductive' coating

Note 1 to entry: This coating together with adequate slot design provides electrical contact to the stator core, without shorting the core laminations.

3.5

stress control coating

paint or tape on the surface of the groundwall insulation that extends beyond the conductive slot portion coating in high-voltage stator bars and coils

Note 1 to entry: The stress control coating reduces the electric field stress along the winding overhang to below a critical value that would initiate PD on the surface. The stress control coating overlaps the conductive slot portion coating to provide electrical contact between them.

3.6

corona discharge

visible partial discharge adjacent to the surface of a bare conductor or the surface of an insulation of a conductor

3.7

slot discharges

discharges that occur between the outer surface of the slot portion of a coil or bar and the earthed core laminations due to high electrical field strength

3.8

vibration sparking

interrupted surface currents between the outer surface of the slot portion of a bar and the earthed core laminations due to axially induced voltages on the conductive slot coating combined with bar vibrations

3.9

internal discharges

discharges that occur within the mainwall insulation

3.10

surface discharges

discharges that occur on the surface of the insulation or on the surface of winding components in the winding overhang or the active part of the machine winding

3.11

pulse magnitude distribution

number of pulses within a series of equally-spaced windows of pulse magnitude during a predefined measuring time

3.12

pulse phase distribution

number of pulses within a series of equally-spaced windows of phase during a predefined measuring time

3.13

phase resolved partial discharge pattern

PRPD

PD distribution map of PD magnitude and number of PD pulses versus AC cycle phase position, for visualization of the PD behaviour during a predefined measuring time

3.14

PD sensor

general type of transducer, which can be used to detect PD signals from the machine winding

Note 1 to entry: A PD sensor typically consists of a high voltage coupling capacitor of low inductance design and a low voltage coupling device in series.

3.15

coupling device

usually an active or passive four-terminal network that converts the input currents to output voltage signals

Note 1 to entry: These signals are transmitted to the measuring device by a transmission system. The frequency response of the coupling device is normally chosen at least so as to efficiently prevent the test voltage frequency and its harmonics from reaching the measuring device.

3.16

resistance temperature detector

RTD

temperature detector inserted into the stator winding, usually between the top and bottom bar or between embedded coil sides in a given slot

3.17**PD magnitude** **Q**

magnitude associated with a PD pulse recorded by a measuring system

Note 1 to entry: In this document, the symbol Q is used as a placeholder for both definitions of charge, Q_m and Q_{IEC} as given in IEC 60034-27-1. This magnitude is usually derived from a stream of individual PD pulses.

4 Cause and effects of on-line PD

Generally, partial discharges (PD) can develop at locations where the dielectric properties of insulating materials are inhomogeneous. At such locations, the local electrical field strength may be enhanced. Due to local electrical over-stressing this may lead to a local, partial breakdown. This breakdown only partially bridges the insulation material. PD in general requires a gas volume or void volume to develop, e.g. cavities embedded in the insulation adjacent to conductors or at insulation interfaces.

A partial discharge can occur when the local field strength exceeds the dielectric strength of the material. This process may result in numerous PD pulses during one cycle of the applied voltage.

The amount of charge transferred in the discharge is closely related to the specific properties of the inhomogeneity such as the dimensions, the actual breakdown voltage and the specific dielectric properties of the materials involved, e.g. surface properties, kind of gas, gas pressure, etc.

Stator winding insulation systems for high voltage machines will always have some PD activity but are inherently resistant to partial discharges due to their inorganic mica components. However, significant PD in these machines is usually more a symptom of insulation deficiencies, like manufacturing problems or in-service deterioration, rather than being a direct cause of failure. Nevertheless, depending on the individual processes, PD in machines may also directly attack the insulation and thus influence the ageing process. The time to failure or failure probability may not always correlate with PD levels, but depends significantly on other factors, for example operating temperature, wedging conditions, bar vibrations, degree of contamination, etc.

The measurement and the analysis of the specific PD behaviour can be efficiently used for quality control of new windings and winding components and for early detection of insulation deficiencies caused by thermal, electrical, ambient and mechanical ageing factors in service, which might result in an insulation fault.

The main differences between on-line measurements and off-line measurements are due to a different voltage distribution along the winding and various thermal and mechanical effects related to the operation, like vibration, contact arcing or temperature gradients between stator copper and stator iron core. Furthermore, especially for hydrogen-cooled machines the gas and the gas pressure may be different for off- and on-line PD measurements.

Further details on the nature of PD are given in Annex A.

5 Noise and disturbances

5.1 General

An important challenge with on-line PD measurement is separating stator-winding PD from electrical noise or disturbances as well as clustering the signal with respect to specific PD sources. In contrast to properly set-up off-line PD tests, in most on-line tests electrical disturbance pulses will often be present, and these disturbance pulses may be more frequent and of larger magnitude than the stator winding PD pulses, also the signals may be phase-locked to the AC power frequency voltage. If the disturbances are not adequately suppressed, or the test technician is not able to adequately identify what is a disturbance and what is PD from the stator, there is a great risk that the disturbance will be classified as stator PD. Consequently, the stator may be identified as having serious insulation problems, when in fact the insulation may be in good condition. If too many "false positive" indications occur, confidence is lost in the test, and future testing may not be routinely done, losing the benefit of on-line PD testing.

5.2 Noise and disturbance sources

Consistent with IEC 60034-27-1, noise is defined to be non-stator winding signals that clearly are not pulses. Noise may be due to electronic devices within the PD detection system itself, for example thermal noise from semiconductive devices. Noise can also be from radio stations, radio transmitters, mobile telephones, power line carrier signals, etc. This noise is easily separated from pulse-like signals either visually on an oscillographic display or with the use of filters. Thus, it is not considered further in this document.

Disturbances are electrical pulses of relatively short duration that may have many of the characteristics of stator winding PD pulses – but in fact are not stator winding PD. Disturbances can be differentiated into two groups: In lower frequency range they preferably spread as electrical signals via metal conductors and in the very high frequency range they mainly distribute wireless as electromagnetic waves. Some of these disturbances are synchronized to the AC cycle, and some are not. Sometimes synchronized disturbance pulses can be suppressed based on their position with respect to the AC phase angle.

Examples of synchronized disturbances are:

- a) Partial discharges caused by, e.g. electrostatic precipitators or bushing discharges.
- b) Power tool operation such as from arc welding and commutator sparking (may also be unsynchronized).
- c) Transients caused by power electronics, for example converter fed motors or excitation systems. This disturbance may also be unsynchronized to the AC cycle..
- d) Poor electrical connections (leading to contact sparking) on the bus or cable connecting the rotating electrical machine to the power system.
- e) Poor electrical connections elsewhere in the plant that lead to contact sparking.
- f) PD in other apparatus connected to the motor or generator terminals, for example output bus, power cable, switchgear and/or transformers.
- g) Arcing or sparking sources within the motor or generator, such as stator core lamination sparking.

Examples of non-synchronized disturbances are:

- h) Power tool operation (arc welding and commutator sparking).
- i) Transients caused by power electronics, for example converter fed motors or static excitation systems.
- j) Slip ring sparking on the machine rotor.
- k) Overhead crane power rail sparking.

All of these disturbances create electrical pulses that the unwary may confuse with stator winding PD. With disturbances d), e), f), and g), the operator normally wants to know if such activity is occurring, because it may indicate other problems (beyond stator insulation problems) that may lead to equipment failure. Thus, some users may not class these examples as a disturbance, but rather as signals to be identified.

To reduce the risk of false indications of the stator winding insulation condition, many methods have been developed to help users to manually and/or automatically separate stator winding PD from disturbances. Many of the commercially available methods use one or more of the methods identified in Annex B.

6 Measuring techniques and instruments

6.1 General

The mechanism of gas physics of a partial discharge generates a transient charge movement which can be measured as an electrical pulse flowing as a transient current inside a conductive discharge circuit (see Figure 1). In addition, as each partial discharge is associated with an energy conversion process the measurement of a PD could also be performed by receiving the emission of light, acoustic signals, electromagnetic waves, or formation of chemical reactions. However, this clause deals solely with electrical methods of measuring partial discharges because the electrical measurement of partial discharges is the most commonly used method of assessing the condition of the winding insulation of rotating electrical machines. The electrical measurement can be carried out by using PD sensors detecting the conducted pulse signal components, or by using antennae detecting the electromagnetically radiated components of the pulse signals.

Partial discharge measuring systems can be divided into subsystems: PD sensor including the signal transmission system and PD measuring device, both of which significantly influence the PD measuring results. Selection of sensors, instrumentation and measuring technique is determined by the expected measurement parameters, which will be used for further analysis and interpretation of measurements.

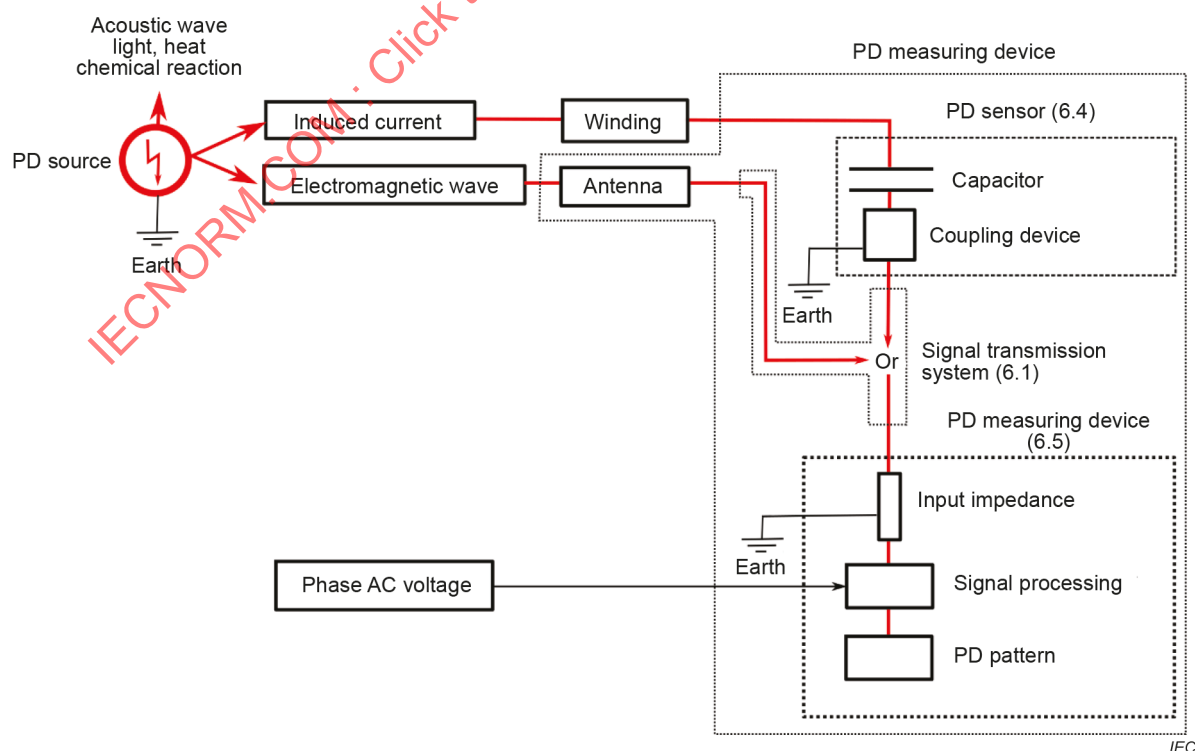


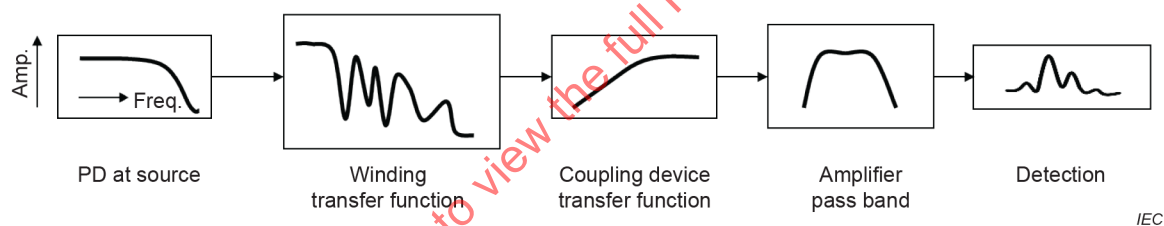
Figure 1 – Generic overview of PD measuring system and its subsystems

6.2 Pulse propagation in windings

At its origin a partial discharge current can be characterized as a transient pulse with a rise time of up to a few nanoseconds. For these short PD pulses with a high frequency spectrum, the stator windings represent objects with distributed elements in which travelling wave, complex capacitive and inductive coupling, and resonance phenomena occur (Figure 2). Therefore, PD pulse propagation phenomena need to be considered. Due to the attenuation, distortion, reflection and cross-coupling of travelling wave signals, the form and magnitude of the PD signal recorded at the location of the installed PD sensor differ from those at the point where it originates. With that in mind, the following points are very important for the measurement and subsequent interpretation of PD measurements taken on rotating electrical machines:

- the transmission function from the PD source to the PD sensor is unknown and depends on the specific design of the machine and the location of the PD source which determines the frequency response of the stator winding. Therefore, the energy at the source of the PD cannot be measured directly;
- the very high frequency components of the PD signals are subject to attenuation when travelling through the winding and, depending on the origin of the PD, might not be detectable at the location of the PD sensor.

As a consequence of the above mentioned phenomena, not only the particular stator winding design but also the specific frequency response of the PD detection system, including PD sensor, measuring device and filter settings, will significantly influence the characteristics of the PD signal detected from the winding. Different measurements have to be performed in the same frequency range to be comparable to each other.



Idealized curves of each step are shown to illustrate the general behaviour.

Figure 2 – Cascade of frequency response channels

6.3 Signal transfer characteristics

Figure 3 shows schematically the frequency response of an idealized PD pulse at the origin of the PD within the winding (upper cut-off frequency f_{uPD0}) and the idealized frequency response at the terminals of the machine (upper cut-off frequency f_{uPDt}) after travelling from the PD source through the winding to the terminals. Due to possible attenuation of very high frequency components, the upper cut-off frequency of the PD signal arriving at the terminals (f_{uPDt}) will be significantly lower than that (f_{uPD0}) of the original PD pulse. The upper cut-off frequency f_{uPD0} depends on the type of gas, the gas density and the defect type.

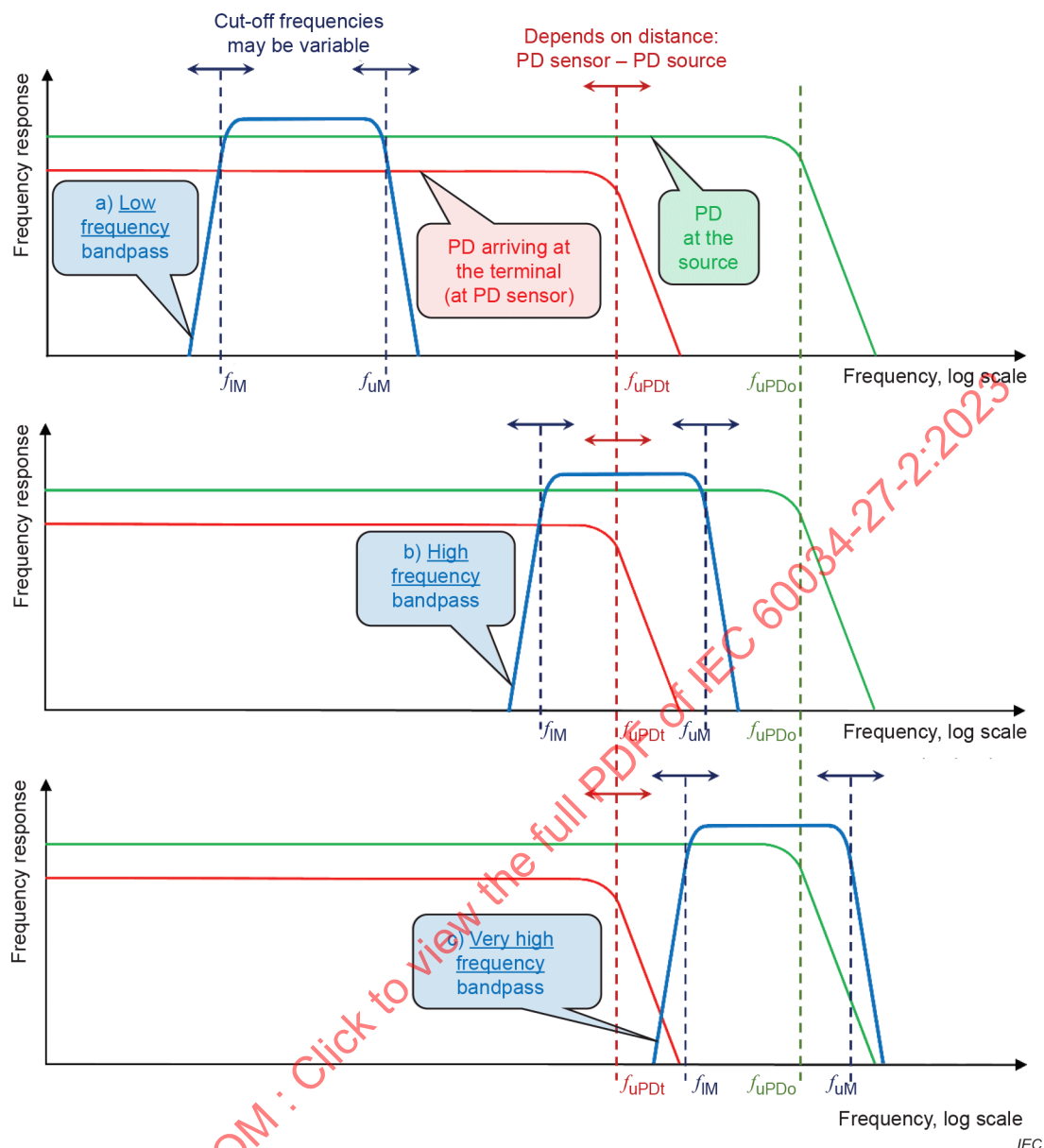


Figure 3 – Idealized frequency response of a PD pulse at the PD source and at the machine terminals; frequency response of different PD measuring systems: a) low frequency range, b) high frequency range, c) very high frequency range

The PD measuring system, including PD sensor, measuring leads and measuring instrument, shows band pass filter characteristics having specific lower and upper cut-off frequencies, mainly depending on the specific design of the PD sensor and the input impedance of the measuring device. In Figure 3 three examples a), b) and c) are shown for different frequency responses of PD measuring systems. For commercially available systems the cut-off frequencies, and thus the measuring bandwidth of the system, may vary over a wide range of frequencies. The characteristic frequency response of the complete measuring system has a considerable impact on the overall sensitivity of detection and the properties of the signal used for further analysis and interpretation.

It should be noted that Figure 3 only describes the fundamental relationships by showing idealized curves. Depending on the winding design and the measuring arrangement used, in practical cases there may be several effects that will influence the exact shape of the frequency response curves and therefore may also influence PD results, e.g. resonance phenomena in the frequency range of the PD measuring system, see Figure 2.

As discussed in IEC TS 62478, on-line PD measurements on rotating electrical machines use the following typical frequency ranges for the complete PD measuring system:

- a) In the low frequency (LF) range a typical bandwidth of about 1 MHz, or a few hundred kHz, is used, with lower cut-off frequencies of usually above 100 kHz and upper cut-off frequencies usually below 3 MHz. Measurement in that frequency range ensures good sensitivity not only for partial discharges in bars/coils close to the PD sensor but also for those that originate from further away in the winding. As the low frequency range is more subjected to noise and disturbance, which is especially present during on-line measurements (see Clause B.2), special procedures for noise and disturbance separation are needed.

A broad band measuring system using the full low frequency band width up to the MHz range can summarize most of the available PD energy content for further signal analysis and noise discrimination procedures independent of unavoidable local resonances of the pulse transfer spectrum. Since the upper cut-off frequency of the detection bandpass is significantly lower than the upper cut-off frequency of the pulse frequency response, the detected PD pulses are directly proportional to the low frequency components of the PD pulse. However, the pulse shape of the bandpass output signal is determined by the low frequency bandpass characteristics. Since the original shape of the PD pulse arriving at the sensor location is lost when using low frequency bandpass systems, a separation of disturbance signals by pulse shape analysis or time domain separation is limited.

- b) In the high frequency (HF) range a typical bandwidth of 3 MHz to 30 MHz is used. The lower cut-off frequencies may also be tuned well below 1 MHz to ensure good sensitivity for PD throughout the winding. However, often lower cut-off frequencies above 1 MHz are used to efficiently suppress typical disturbance signals that are present in the low frequency range.

PD detection in the high frequency range is less susceptible to noise and disturbance and can be efficiently used to characterize the PD pulses arriving at the PD sensor by their individual pulse shape and thus being able to discriminate between different PD sources according to their signal shape. In the case where the upper cut-off frequency of the detection system is well above the upper cut-off frequency of the PD signal arriving at the location of the PD sensor, the bandpass output signal will display the PD pulse shape but will no longer be directly proportional to the apparent charge of the PD pulse. Thus, PD results in the high frequency range are usually expressed in terms of voltage [mV]. Efficient methods of frequency and time domain disturbance separation can be applied according to Clause B.5. Time-of-flight measurements taken with individual pulses can be used to localize the PD or disturbance source within or outside of the machine, as long as the two sensors are more than 10 m apart assuming full 30 MHz bandwidth.

NOTE 1 One of the sensors for time-of-flight measurements can be located on the output bus.

- c) In the very high frequency (VHF) range a typical bandwidth of a few hundred MHz is used with lower cut-off frequencies of typically 30 MHz and upper cut-off frequencies up to the 300 MHz range. As shown in Figure 3 c) the frequency response of such systems shows a pronounced overlap with the frequency response of the original PD pulse and therefore measurements in the very high frequency range ensure a good sensitivity to signals originating closer to the PD sensor. The PD sensor should be installed at the high voltage terminals and thus close to the coils/bars experiencing the highest electrical stress within the winding. The very high frequency range also provides a good signal to noise ratio and is therefore less susceptible to noise and disturbance. Because the upper cut-off frequency of the detection system is well above the upper cut-off frequency of the PD signal arriving at the location of the PD sensor, the measured signal will display the PD pulse shape but will no longer be directly proportional to the apparent charge of the PD pulse. Thus, PD results in the very high frequency range are usually expressed in terms of voltage (mV). As indicated in Figure 3 c), the capability to detect PD in this frequency range will be reduced due to the upper cut-off frequency of the PD impulses arriving at the PD sensor position (f_{uPDt}).

PD detection in the VHF range ensures a very short pulse resolution time since the shape of the original very short PD current pulse can be detected. Therefore, efficient methods of time and frequency domain disturbance separation such as time-of-pulse arrival, pulse shape analysis and TF maps can be applied according to Annex B. Pulse shape and time-of-flight analysis of individual pulses can be used to localize the PD source within or outside of the machine, as long as the two sensors are more than 2 m apart assuming full 300 MHz bandwidth.

- d) In the ultra high frequency (UHF) range lower cut-off frequencies of typically 300 MHz and upper cut-off frequencies of up to 3 GHz are used. PD sensors working in that frequency range are antennae, which detect electromagnetically radiated pulse signals. The signal energy detected by these sensors and thus the sensitivity of PD detection mainly depends on the specific location of the antenna, the distance between the antenna and the PD source and the bandwidth of the detection system. In general, the closer the antenna is located to the specific PD sources the better will be the sensitivity of PD detection. There is a high attenuation for pulse signals from PD sources within the slot and therefore shielded by the iron core.

NOTE 2 The upper cut-off frequency of the PD arriving at the PD sensor position (sensor) f_{UPDt} may significantly vary, depending on the distance between the PD sensor and the PD source. A small distance may result in a higher cut-off frequency, a large distance may result in a lower cut-off frequency due to attenuation phenomena.

Therefore, in case b) and especially in case c) the measuring system shows good sensitivity to PD sources closer to the sensor, depending on the lower cut-off frequency of the bandpass filter and the overlap of the frequency responses of the bandpass filter and the PD signal at the sensor location.

6.4 PD sensors

6.4.1 General

In principle PD can be detected by conducted or electromagnetically radiated pulse signals. In the case of conducted PD signals a separate capacitance is used to detect the PD signal arriving at the location of the installed PD sensor. The electromagnetically radiated pulse signal is attenuated, due to various screening effects by machine components as iron core with slots, conductive coatings, etc. Thus, the location of the antenna, the distance to the PD source and the specific bandwidth of the detection system significantly influence the detection sensitivity.

6.4.2 Design of PD sensors

PD sensors, which detect conducted pulse signals typically consist of a high voltage capacitance, often called coupling capacitor, and a low voltage coupling device in series.

As capacitance the following arrangements can be used:

- dedicated PD coupling capacitor;
- existing surge capacitor;
- capacitance of power cables leading to the machine.

In order to form a PD sensor these capacitances can be used together with the following coupling devices, designed for an appropriate frequency response:

- RLC networks;
- High frequency current transformers including isolation transformers and Rogowski coils.

PD sensors, which detect electromagnetically radiated pulse signals are typically antennae, which provide a characteristic sensitivity significantly depending on their place of installation and their specific frequency response function.

As PD sensors the following devices can be used:

- antennae specifically designed for PD measurements, such as stator slot couplers;
- slot RTD leads already installed in the stator winding;
- patch or microstrip antennae installed at specific locations within the machine housing.

PD sensors that act as antennae are usually designed to work in the very high and ultra high frequency ranges. These sensors need to be installed as close as possible to that part of the winding, which may be most exposed to critical PD activity.

NOTE There are cases in which high frequency current transformers are used directly at the earthing cables of generator neutral connections. However, these coupling devices deliver only very limited information of PD like signals in that part of the winding which is closest to the neutral end. In addition, the design has to provide proper high voltage insulation to withstand an earth fault.

When using existing surge capacitors or a cable capacitance one shall be aware that the transfer behaviour of such is unknown, and that these components may not have an appropriate transfer behaviour in the frequency range that is favourable for measuring PD.

6.4.3 Reliability of PD sensors

PD sensors used for on-line PD monitoring are usually permanently installed on the machine. It is essential that the PD sensors themselves do not cause the failure of the stator winding. However, special purpose PD capacitors connected to the high voltage leads in a stator winding may pose a risk for a phase to earth fault. Thus, such capacitive PD sensors should:

- have a PD extinction voltage (PDEV for a specified PD level of 10 pC) greater than two times the phase to earth operating voltage, verified by appropriate routine testing;
- be AC over-voltage routine tested to at least the same voltage as the stator winding;
- have undergone voltage endurance type test at 2,17 times rated line to line voltage of the machine and not failed within 400 h;
- have a low dissipation factor that is stable with temperature up to the maximum expected operating temperature at the sensor's installation location, verified by appropriate type testing.

Further details for the reliability testing of PD sensors are described in Annex D.

6.5 PD measuring device

The electrical signals from the various types of sensors described in 6.4 can be measured and recorded using various measuring devices. The type of measuring device used may depend on the intended kind of further signal processing, analysis and interpretation, see Figure 1 for schematic of measuring system. However, a device shall be used which can, directly or by subsequent processing of the measured PD signals, provide at least a pulse magnitude distribution, and a phase resolved partial discharge pattern according to Annex C.

The PD measuring device typically consists of

- input amplifier and frequency filter;
- signal processing unit, e.g. pulse shaping, sample and hold, digitizer, phase-to-earth voltage waveform;
- noise and disturbance suppression;
- visualization and phase synchronization.

In order to fully exploit the characteristics of the installed PD sensor, the frequency limits of the measuring device should cover the known frequency response of the installed sensor designed for a given PD measuring device input impedance

6.6 PD measuring parameters

6.6.1 General

Various PD measuring parameters can be used for the visualization, analysis and interpretation of on-line measurements. In order to be able to assess the actual condition of the stator winding insulation, the used parameters should provide a sensitive means to characterize the nature of the PD from the machine under test as well as the development of PD processes over time when trending the machine condition by regular measurements.

6.6.2 PD magnitude

To evaluate the PD behaviour at least the PD magnitude q of each PD pulse should be measured and processed appropriately. The PD magnitude q of an individual pulse can be expressed in terms of voltage (mV) or in terms of apparent charge (nC), depending on the principle approach of the manufacturer of the PD measuring system (see Figure 1) and the impedance and frequency characteristics of the test object. A basic conversion of PD magnitudes measured in terms of voltage (mV) into charge (nC) and vice versa is not possible, for complete stator windings.

The measured magnitude of the PD may depend on the specifications and the settings of the recording instrument. A detailed discussion is given in IEC 60034-27-1:2017, Annex B.

6.6.3 Additional PD parameters

When using digital PD measuring devices, the PD magnitude q_i is acquired for the train of PD pulses for each individual PD event that occurs during the measuring time and the associated instantaneous voltage u_i at time t_i or the phase angle ϕ_i within the corresponding period of the line voltage. In each case, the measured values of PD are recorded with a suitable type of measuring device and stored so that they can be analysed later by appropriate methods. This ensures that any additional derived PD parameters can be calculated afterwards on the basis of the originally measured data. Depending on the system and the filter settings, pulse polarity may be lost from the PD signal.

When using measuring systems working in the HF or VHF range, additional time domain parameters, like rise time, fall time or even the complete shape of each PD pulse can be measured, in order to subsequently apply special time and frequency domain analysis methods, e.g. for separating different PD sources.

7 Installation of measuring systems

7.1 General

The components for on-line PD measuring can be installed in different extent. Depending on this extent of installation periodic or continuous on-line PD measurements can be performed (see 9.4 and 9.5).

7.2 Installation of PD sensors

Performing on-line PD measurements requires at least the installation of PD sensors in an appropriate location. This can be inside the machine terminal box, machine housing, the neutral point cubicle or close to the bus duct. The PD sensor type determines sensor location and installation procedure.

For installation, commissioning, operation and maintenance of the PD sensors and its connection leads the supplier should provide adequate documentation. Installation and commissioning should be performed by skilled persons only.

If an additional component is connected between high voltage and earth (e.g., a high voltage capacitor) it should meet the insulation performance requirements at the place of installation, so that the insulation coordination of the system is not affected.

Furthermore, the component should not introduce an unacceptable electrical fault risk to the system. On request, the supplier of the component should deliver information for a risk assessment, e.g., data from voltage endurance testing and failure statistics (6.4.3).

The PD sensors should withstand the normal operating conditions at its place of installation.

Metallic parts should be of non-magnetic material to avoid heating by the effects of the magnetic field.

For each machine phase at least one PD sensor is recommended, that should be positioned as close to the winding as possible. Optionally a PD sensor can be connected to the neutral point of the machine. At each phase a second PD sensor may be installed in some distance away from the terminals to gather directional information of pulses (see Clause B.3).

For the position, the mounting and the connection of the PD sensors the following considerations are important:

- The PD sensor and its connection leads including low voltage measuring cable routing shall not compromise the stator and phase bus insulation performance and the required clearances.
- When installing the PD sensors, ensure to comply with clearances as stated within the relevant national and international standards.
- The sensor mounting shall withstand all operating conditions like temperature, vibrations and short circuit transients, as loosening or deformation may initiate an electrical fault.
- PD sensors that are directly connected to high voltage potential should not be placed in an environment with excessive contamination and humidity. Surface contamination may cause leakage currents, eventually resulting in a surface tracking degradation or a pollution flashover.
- The PD sensor and its connection leads should not introduce partial discharge activity.
- The PD sensor, its connection leads and signal transmission system shall not introduce induction loops.
- The connections to the high voltage potential and to earth potential should be as short as possible and of low inductance. Special attention is required to the mechanical quality of these connections as they may become loose due to vibrations.

7.3 Outside access point and cabling

As the PD sensor locations due to health and safety restrictions are normally not accessible during machine operation, an outside, unrestricted access point is recommended. The access point should allow the connection and disconnection of the PD measuring device to the PD sensor cables during machine operation without any risk for personnel and equipment. If not included in the PD sensor, the access point should include over-voltage protection means in order to reduce the maximum voltage at its output to a safe level according to common technical rules and regulations, in case of a failure in the measurement circuit.

As the cable may introduce an entry point for electromagnetic noise by coupling processes, an appropriate degree of shielding and high quality connectors should be used. Due to continuous vibrations close to the machine all connections need to be of a mechanically robust type.

When the shield of a cable is earthed on both ends the shield establishes an earth loop, which may result in high currents, damaging the shield. There are different methods known to reduce such earth currents without compromising the shielding. The earthing design of the cable shall consider the earthing design of the PD sensor output and of the PD measuring device input. The overall earthing concept of generator, phase bus leads and HV transformer has to be followed.

Alternatively, the PD information can be transferred via optical cable to the outside access point.

With an outside access point a portable PD measuring device can be safely connected at any time during machine operation and on-line PD signals can be acquired. Such a temporary connection of a PD measuring device is sufficient for snapshot measurements at specific intervals and requires only one measuring device for multiple machine units per site. This is usually called "periodic PD measurements" (see 9.4).

7.4 Installation of the PD measuring device

In order to perform a continuous PD measurement on a machine stator a PD measuring device needs to be permanently installed in addition to the PD sensors. To allow maintenance on or exchange of the device during machine operation, the installation of an access point according to 7.3 is recommended too. Regarding the cable connections the same considerations shall be taken into account as for the cables between the PD sensors and the access point.

Furthermore, a communication connection may be required between the PD measuring device and a computer that transfers control and status information as well as PD data. Depending on the distances, the site layout and the disturbance situation a connection method should be used, which operates reliable in the specific environment.

The PD data are continuously stored in the PD instrument or on the computer or any network drive if the computer is embedded in a distributed network.

Several PD measuring devices in a power plant, one for each machine, could be connected via a data network to a central computer station that allows the observation and analysis of PD activity in all machines from one place, for example the control room. Remote access options via communication links like secure internet connection to a diagnostic center shall be possible.

7.5 Installation of operational data acquisition systems

In addition to the PD data, operational data from the machine should be automatically acquired and stored together with PD data, if available. Operational data, such as active power, reactive power, stator winding and core temperatures, cooling air / gas temperature, stator voltage and humidity of the cooling gas are of significance for the assessment of the stator winding system based on PD data interpretation. The operational data shall be linked to the PD data in the database or the PD data is transmitted to the plant computer or all these data sets shall be transferred via secure internet connection to a remote diagnostic center.

Such machine operational data can be accessed by installing appropriate interfaces to the plant control system. Typical examples of possible interface installations are:

- The installation of a multi-channel analogue digital converter (ADC) module, which is capable to acquire process signals and transmits the digitized data via the communication network to the computer.
- The installation of a software interface on the computer, which interfaces the plant control system and provides the required operational data on the computer.

On-line PD measuring systems with permanently installed devices for PD acquisition and operational data acquisition systems are mandatory for performing continuous on-line PD monitoring (see 9.5).

8 Normalization of measurements

8.1 General

Due to pulse propagation, resonance and mutual cross-coupling in machine windings, mentioned in 6.2, magnitude calibration is not possible. Due to the wide variety of frequency ranges used by PD measuring systems, two normalization procedures are needed for different systems.

8.2 Normalization for low frequency systems

8.2.1 General

Normalization of the test circuit may facilitate comparisons between measurements on machines having similar design and rating (voltage, power, type of cooling), taken with the same PD system. Normalization of the test circuit should be performed by injecting short-duration current pulses of known charge magnitude by means of a reference pulse generator (calibrator) conforming to the specifications given in IEC 60270. The normalization procedure can only be performed off-line.

The following points are important to emphasize:

- normalization does not define the unknown, machine-dependent signal transfer function between the actual PD source in the winding insulation and the location of the installed sensors, which is in general a function of the location of the PD source and the individual winding design;
- normalization at the machine terminals does not adequately represent the PD pulses that actually occur at an unknown location within the stator winding. Consequently, the process of normalizing a measurement on complete windings does not provide a measure for quality of the insulation system in terms of absolute quantities;
- normalization increases comparability of PD results between machines of same design and rating and therefore it will allow at least an order of magnitude comparison between different machines;
- for normalization of PD measuring systems in the low frequency range, reference pulse generators should be used that provide a constant pulse frequency spectrum in the used frequency range;
- for a check of the function of the measuring system, the normalization procedure can be repeated;
- the normalization typically is only valid for one parameter setting of the measurement instrument. If the frequency of the detection system is variable, each variation of lower limit frequency, upper limit frequency and bandwidths require a separate normalisation. It is not possible to convert from a normalisation factor that has been obtained at a certain frequency setting to normalisation factors for other settings. Same is required if the filter characteristics are changed, e.g. from Bessel to Chebyshev or others;
- due to the limited gain-bandwidth product of many instruments, the same applies if measurements are to be made at gain settings other than normalized. Here too, normalization might be necessary prior to the measurements;
- any changes in the measurement circuit, e.g. change of PD sensors, cabling and routing of such, installation of equipment in parallel to the winding (surge arresters or surge capacitors, etc.) require re-normalization.

8.2.2 Normalization procedure

Normalization of the test circuit is performed by injecting current pulses of a specified charge magnitude at the machine terminals or as close as possible to them, by means of a reference pulse generator. This is to simulate PD pulses as they appear at the machine terminals during the measurement.

Preferably the reference pulse generator shall operate somehow synchronous to the grid. This will help to identify the normalization pulses especially in noisy environment (see Figure 4).

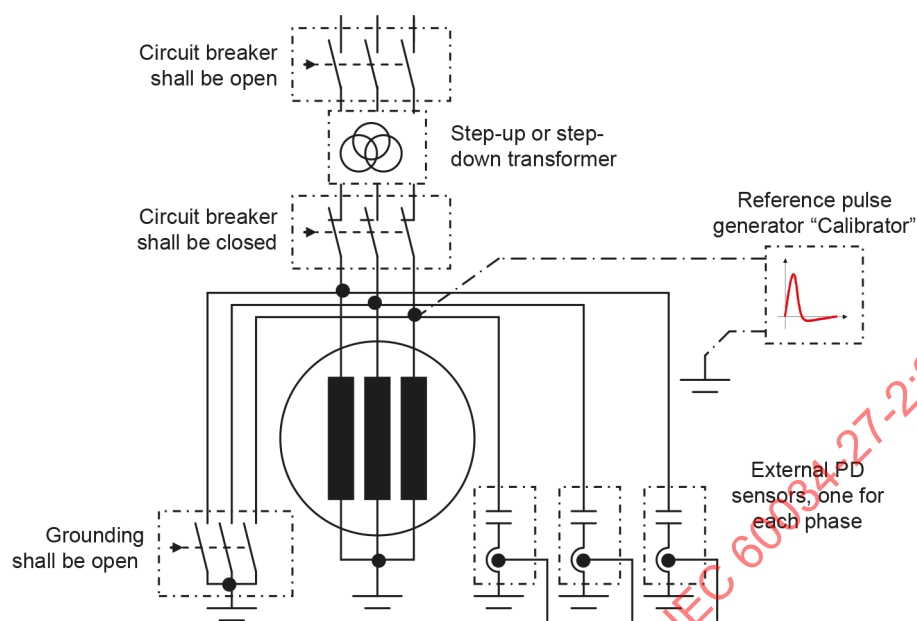


Figure 4 – Measuring object, during normalization, neutral point in same condition as during operation

The procedure of normalization should be performed as follows:

- All connections between machine and main transformer shall be closed. If this is not possible due to safety restrictions it has to be noted in the normalisation protocol.
- Machine terminals shall not be earthed.
- Neutral point connection shall be kept in same condition as during operation.
- If surge capacitors are installed on the machine these shall remain connected to the winding.
- The reference pulse generator shall be connected as close as possible to the terminal and frame with the shortest possible test leads. In case of installed PD sensor at the neutral point, the normalization measurement will only be indicative due to the usually short distance to the earth.
- Perform normalization measurement.
- It is recommended to perform at least one measurement with disconnected pulse generator to verify the normalization and to verify the base noise that may superimpose the reference pulses.
- To verify symmetry of all installed phases and PD sensors it is recommended to perform a normalization on all phases separately. Especially on large machines the lengths of the phase rings may differ significantly from phase to phase.

8.3 Normalization / sensitivity check for high and very high frequency systems

8.3.1 Specification for the electronic pulse generation

The sensitivity check is performed by injecting voltage pulses on the conductor at the closest point to the insulation. This point is usually the terminal of the winding and referenced as the terminal in the rest of this subclause.

The general setup for this sensitivity check is shown in Figure 5.

The pulse generator consists of a rectangular voltage pulse having a peak voltage of U_g and an internal resistance of R_g in series. For VHF PD measurement it is preferable to have a pulse generator with a source impedance of $1\ \Omega$ or less, since this will produce less pulse shape distortion. The rise time t_R of the pulse generator should be less than $1/f$, where f is the upper frequency limit of the detection system. For example, if the upper cut-off frequency of the PD measuring system is 100 MHz, the electronic generator pulse rise time should be less than 10 ns.

The pulse duration recorded at the terminals shall be longer than the time response of the detection system. This time response is the time needed for the system to recover its initial condition after having been excited by an impulse. The fall time of the impulse has no importance.

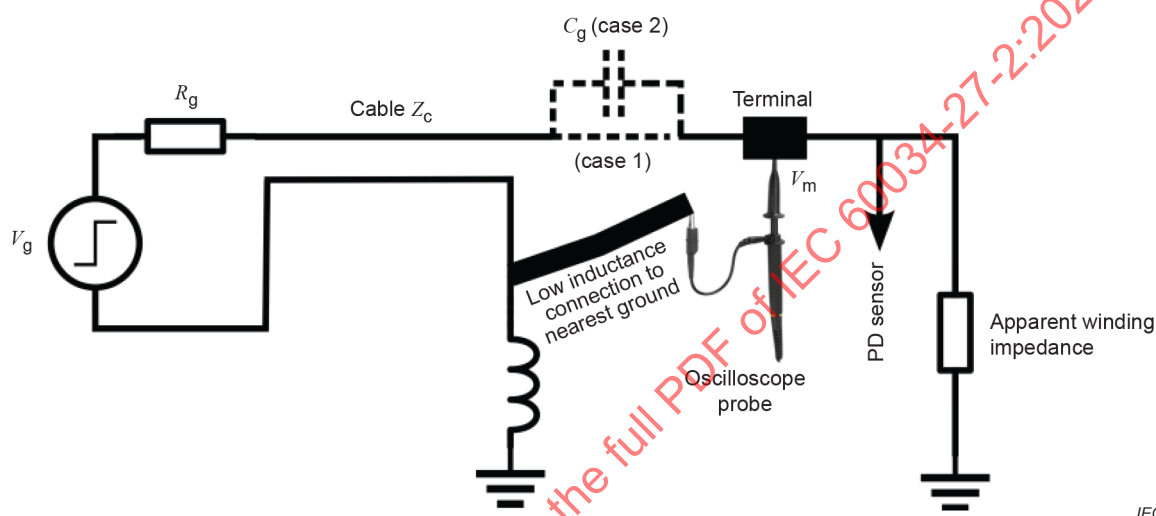


Figure 5 – Arrangement for sensitivity check

Figure 5 shows the setup to be used for the sensitivity check and simplified model of the rotating electrical machine. At high frequency, the apparent winding impedance is completely unknown and the usual representation by a capacitance may even be completely wrong. In the VHF range, the winding behaves more like a surge impedance. The earth connection impedance from the pulse generator and the oscilloscope is also unknown and represented by an inductance. Due to these unknown parameters, the voltage step injected at the terminal cannot be determined by the set voltage of the pulse generator. Hence, the voltage at the terminal V_m have to be measured, preferably with FET input (ultra low capacitance) oscilloscope probes.

There are two test conditions:

- Case 1) The output of the pulse generator is directly connected to the terminal.
- Case 2) The output of the pulse generator is directly connected in series to a capacitor C_g connected directly at the terminal. This capacitor shall be chosen to obtain a charge $V_g C_g$ of few nC and being smaller than 1 nF.

If the pulse generator is to be located far from the test object, the coaxial cable should be terminated in $50\ \Omega$. When the distance from the terminal up to the earth of the test object is more than $1/10$ of the upper frequency limit wavelength of the detection system, the inductance connection to the earth is not negligible anymore (earth inductance in Figure 5). A low inductance earth plane should be installed to extend the earth of the generator for the pulse injection. The use of a wide copper foil or braided wire is recommended. This earth point may be different from the coupling device earth point.

8.3.2 Configuration of the machine

For the sensitivity demonstration, the machine should be in the configuration indicated in Figure 4.

8.3.3 Sensitivity check

The sensitivity check procedure can only be performed off-line, unless a special high voltage injection capacitor C_g is used. But on-line pulse injection is a dangerous operation not covered in this document.

The voltage pulse V_m has to be measured directly at the terminal using an oscilloscope probe and a fast oscilloscope. This is, in mV, the sensitivity of the PD detection system. If the electronic generator can be located very close to the terminal, at less than 1/10 of the upper frequency limit wavelength of the detection system, including the earth connection, the set pulse voltage U_g can be used directly.

The front of the voltage impulse is expected to oscillate. The voltage to consider for the sensitivity check is the peak value of the voltage recorded at the terminal. If very high frequency oscillations compared to the upper limit frequency of the detection system are measured, a filtering of this very high frequency component is to be performed.

In service, the background noise may increase significantly. As this check is performed off-line, it is recommended to record the PD output at various step voltage levels in order to estimate the minimum sensitivity level while operating. The minimum sensitivity level is the peak voltage of the step generator that is detectable above the noise floor limit. The real noise limit may be difficult to determine as the rotating electrical machine is normally producing PD while operating.

To verify symmetry of all installed phases and coupling devices, it is recommended to perform a sensitivity check on all phases separately. Especially on large machines, the lengths of the phase rings may differ significantly from phase to phase.

This standard does not recommend any minimum PD sensitivity. This sensitivity check is only valid for an impulse at the terminal, and due to pulse attenuation, the sensitivity may drop for PD sources located in the winding coils far from the terminal.

9 Measuring procedures

9.1 General

On-line PD measurements on rotating machines can be done on a periodic basis during normal operation of the machine, with a PD measuring device temporarily connected to the installed PD sensors via an appropriate access point, as described in Clause 7. As an alternative continuous on-line PD monitoring can also be performed, with a permanently installed PD measuring device and appropriate communication connections according to Clause 7. For both of these approaches it is recommended to perform an initial baseline measurement which can be used as a reference for future measurements and for trend analysis.

9.2 Machine operating parameters

One of the most important aspects of all on-line measuring procedures is the recording of machine operating conditions while PD data are being detected. The influence of machine operating conditions on the measurement results is often critical in subsequent data analysis and determination of PD sources. If provided, the following set of operating parameters shall be recorded during each on-line PD measurement:

- stator current and voltage;
- active and reactive power;
- winding temperature measured by slot RTD;
- cooling gas temperature at cold gas and warm gas side of stator winding and pressure;
- cooling water temperature for direct water cooled stator windings;
- relative humidity of circulating cooling gas.

The operating parameters should be recorded simultaneously to the PD data and be stored with the same time stamp on the same recording device to ensure the correct correlation of the data and thus a meaningful interpretation of the PD behaviour.

If other machines are running in parallel on the same high voltage bus, their influence with regard to external disturbances needs to be considered (see Annex B).

In order to identify the specific discharge sources, the factors that influence the discharge activity should be varied systematically by an appropriate measurement program. Since the measurement program may have an influence on the load regime of the operating unit, this program should be communicated in advance to the machine user.

9.3 Baseline measurement

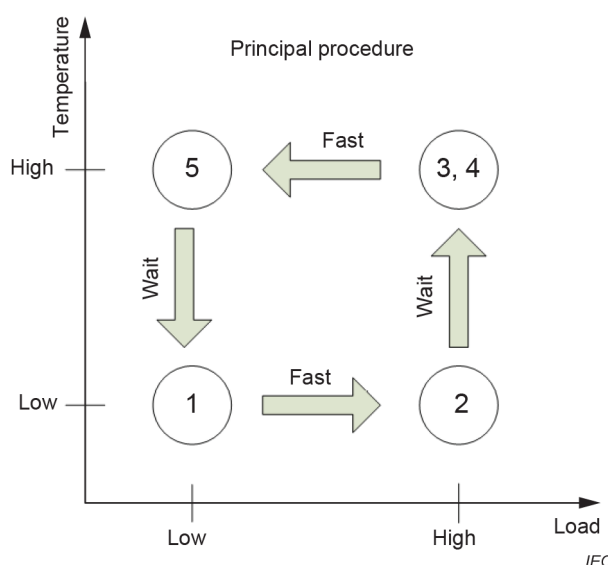
9.3.1 General

The initial on-line PD measurement performed on a machine gives an indication with regard to the condition of the insulation system at the time of the measurement. This is essentially a fingerprint of the PD activity within the insulation system, which is used as a basis for further trend analysis that will be established by future measurements. The initial fingerprint measurement is best after the first thousands of operating hours as the new windings may show higher and differing PD than subsequent measurements after some time of operation due to a conditioning effect.

9.3.2 Comprehensive test procedure

For a comprehensive baseline measurement, PD measurements at varied operating conditions shall be performed. The following procedure according to Figure 6 can be viewed as example for a baseline PD on-line testing. The load schedule provides data for a meaningful subsequent PD analysis, mainly considering load and temperature effects.

The load and temperature conditions should be varied according to the measurement sequence shown in Figure 6. Depending on the plant conditions the measuring sequence can be started with increasing load at point (1), or with decreasing load at point (3). Note that fast changes in load are not always possible in steam turbine generators. In some machines it may not be possible to follow the full procedure for practical considerations.

**Key**

- (1) Measurement at low load and thermally stable winding conditions
- (2) Measurement at high load directly after relatively fast load increase
- (3) Measurement at high load and thermally stable winding conditions
- (4) Measurement at high load with significant change of reactive power and thermally stable winding conditions
- (5) Measurement at low load directly after fast load decrease

Figure 6 – Recommended test procedure with consecutive load and temperature conditions

The measurements after load change (2) and (5) should be taken immediately. The stabilization of the temperature needs some time. Therefore, between each load point the stator winding temperature needs to be monitored such that the PD measurements (1), (3) and (4) are each performed when the temperature has stabilized. If change of active load is not possible, also a change in reactive load will at least provide a minimum stator current variation.

In order to get a sufficiently pronounced influence of the load conditions on the PD behaviour, the difference between low and high load should be at minimum 50 % of the nominal power.

If possible, a measurement should also be carried out at nominal voltage and speed before synchronizing the machine to the grid. This allows a more reliable detection of defects, which depend on the electric field distribution only. A minimum test duration shall be 10 s (see IEC 60034-27-1:2017, Annex A).

9.4 Periodic measurements

Periodic on-line PD measurements are made at specific time intervals, which depend on the individual condition of the machine. If the measurements indicate a stable PD activity condition of the machine winding and no unusual operation condition has been experienced, then periodic measurements are typically made once or twice a year. In case of particular findings that may be related to insulation deficiencies, the time intervals can be shortened to minimize the risk that significant insulation deterioration may remain undetected between tests. It is further recommended to perform an on-line measurement before a maintenance outage, to indicate possible weak points that need further consideration during maintenance work.

The full measurement program with load and temperature variation according to Figure 6 is recommended only in case there is a clearly noticeable PD activity that needs further detailed evaluation. At least a measurement at one load point and stable thermal conditions (high load (3), (4) according to Figure 6) should be performed on a regular basis. To ensure comparability and thus to ensure that a reliable trend analysis for subsequent measurements can be established, the following values (Table 1) are typically observed as best practice.

Table 1 – Operating condition stability to obtain valid trends in PD

	Generators	Motors
Voltage	$\pm 1,5 \%$	$\pm 3 \%$
Winding temperature	$\pm 5 \text{ K}$	$\pm 5 \text{ K}$
load	$\pm 10 \%$	$\pm 10 \%$
Gas pressure (hydrogen or pressurized air)	$\pm 30 \text{ kPa}$	$\pm 3 \%$

9.5 Continuous measurements

An alternative to periodic measurements is to install an acquisition system, which is capable of performing continuous PD measurements. The basic installation of a continuous PD monitoring module is the same as for the periodic system but, in addition, the PD measuring device and the controlling computer are installed on a permanent basis.

When PD data are continuously acquired the PD pattern and a set of calculated trending parameters according to Clause 10 can be derived directly from the originally measured data. A large amount of data is created, which cannot be stored indefinitely. Therefore, intelligent data reduction algorithms are needed, which automatically select the important trending parameters and patterns from the repetitive measurements for example per day and store them in a long-term database for later analysis purposes. Such automatic pattern selection can be carried out either simply time based with regular pre-defined time intervals, or more appropriately based on the development of the derived trending parameters, which are used for comparison with reference conditions of the insulation system.

The continuous PD monitoring system can be integrated into a supervisory diagnostic system that combines various diagnostic modules for the assessment of the machine condition. In that case it is essential to ensure appropriate communication links, which allow for connecting the system to a remote diagnostic centre, where a detailed analysis of the measured data can be performed.

The advantage of continuous on-line PD monitoring is that the PD data can be continuously trended together with the selected operation parameter (see 10.2) in real-time and thus rapid changes of the PD behaviour can be detected immediately. The risk of losing important information on change of PD activity in correlation to machine condition is minimized. Timely data analysis via a remote diagnostic center is possible. This allows a detailed PD analysis to be implemented on an event basis, rather than a traditional fixed time interval basis.

10 Visualization of measurements

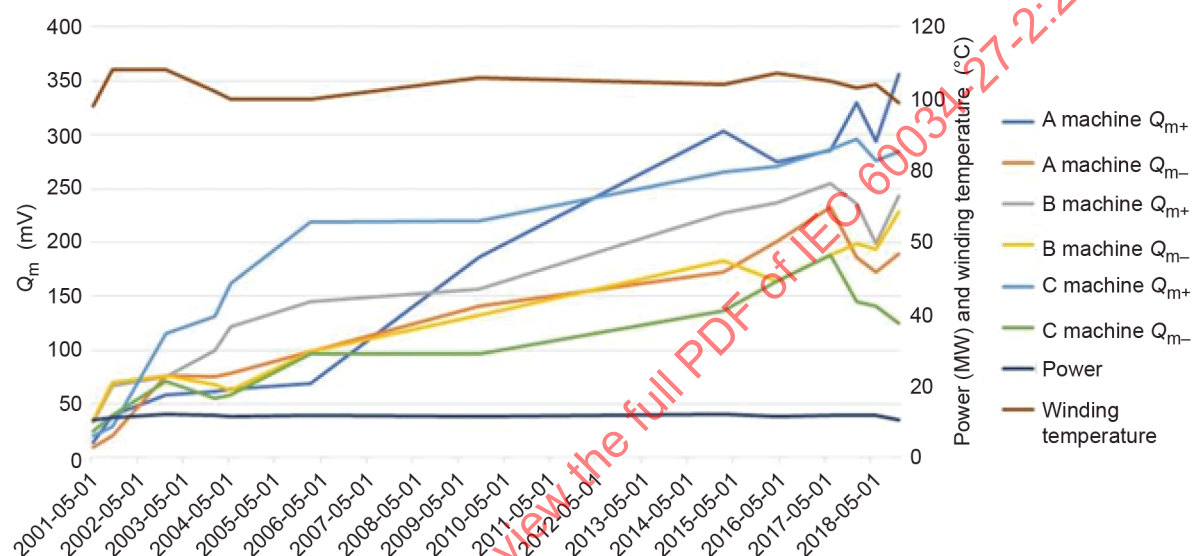
10.1 General

In view of the fact that it is the condition of the insulation system that is being assessed, the PD data recorded with one of the measuring systems described in Clause 6 should be processed appropriately. Since the nature of damage to the insulation system, and therefore the risk of failure, is directly related to the particular type of the partial discharge source, it is necessary to obtain reliable information on the kind of partial discharge sources that are measured. Various types of visual data processing can be employed for this purpose.

10.2 Visualization of trending parameters

Visualization of trending behaviour of PD activity provides important information for identification of PD sources and risk evaluation. An example of the trend of PD magnitude together with operating data like active power and winding temperature over a period of time is given in Figure 7. Correlation of variation in PD activity with changing load condition allows better identification of PD source, see 11.4.

By using suitable diagrams during the subsequent analysis, it is possible to visualize the PD measurements so that the condition of the insulation system can be assessed. Either statistical distributions of PD parameters, phase-resolved or time resolved presentation of individual measured PD parameters, or so-called scatter diagrams of specific parameters can be employed for this purpose (e.g. pulse height distribution, pulse phase distribution, phase resolved pulse height distribution, oscillograms of pulse trains, PD distribution maps, etc.).



IEC

The data has been filtered to only show the PD occurring when the generator is operating between 35 MW to 40,9 MW and from 98 °C to 108 °C.

Figure 7 – Example of the trend in peak PD activity in three phases over an 18-year interval using periodic measurements

When trending the PD magnitude or other PD parameters over time, it is important to simultaneously acquire information regarding temperature of the winding, ambient humidity, coolant temperature and pressure, excitation current, stator current, power factor and terminal voltage.

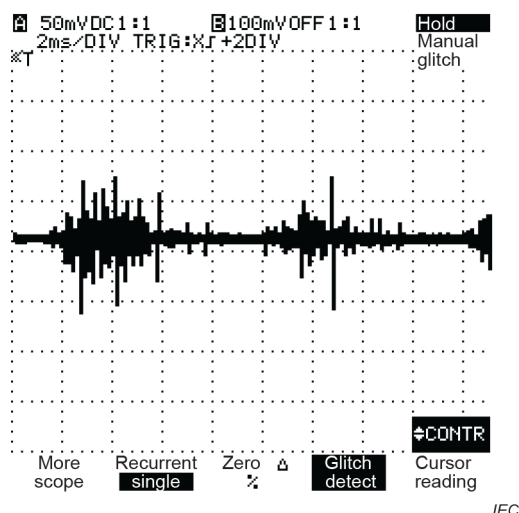
Besides basic time-related trending also the visualization of the relation of the PD magnitude with the other parameters can give information regarding development of specific failure mechanisms, see 11.4.

10.3 Visualization of PD patterns

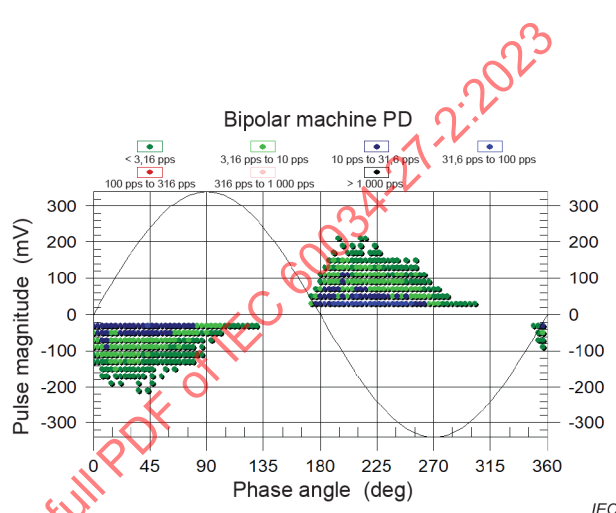
The easiest way of PD visualization is given by line frequency correlated time-based pulse oscillograms for one AC cycle only, as shown in Figure 8. A partial discharge pattern can be viewed as a PD distribution map, in which specific PD quantities are correlated in a scatter plot, to obtain information on the sources of PD activity. Usually, a 2-dimensional PD distribution map is employed for visualization.

A PD pattern, which is recommended for identifying the causes of PD in stator winding insulation systems, is the PRPD pattern in which the PD magnitude q is on the ordinate normally in linear scale and the phase of occurrence Φ is on the abscissa for each individual PD pulse. Figure 8 shows an example of that pattern type. In the scatter plot, the frequency of PD occurrence (n) within each phase/magnitude window should be visualized by employing a suitable colour code whose scale may be visualized by the side of the plot.

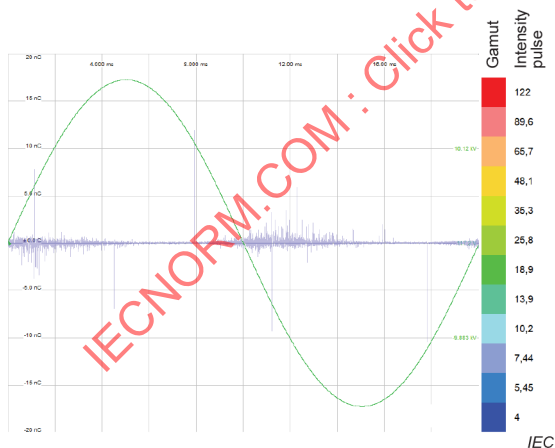
The PRPD patterns obtained from on-line measurements can also be displayed as a three phase, phase shifted plot as shown in Figure 9, that can be efficiently used to identify phase to phase PD in the end-winding, and the effect of signal cross-coupling between different phases.



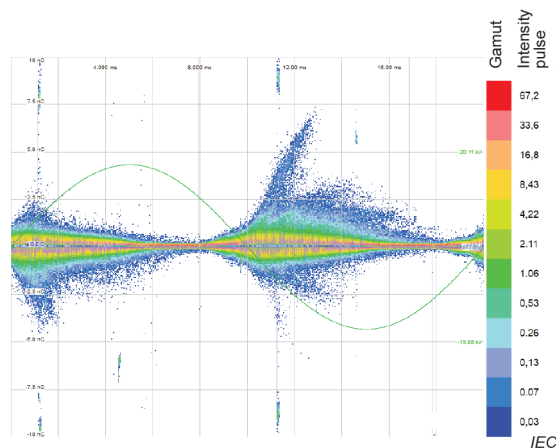
a) PD pulse activity captured by a 100 MHz digital oscilloscope during one AC cycle



b) PRPD pattern acquired on the same test object in a) over 80 s (4 800 AC cycles) using a commercial PD detector in the 40 MHz – 350 MHz range. The detector automatically suppresses oscillations from each PD pulse



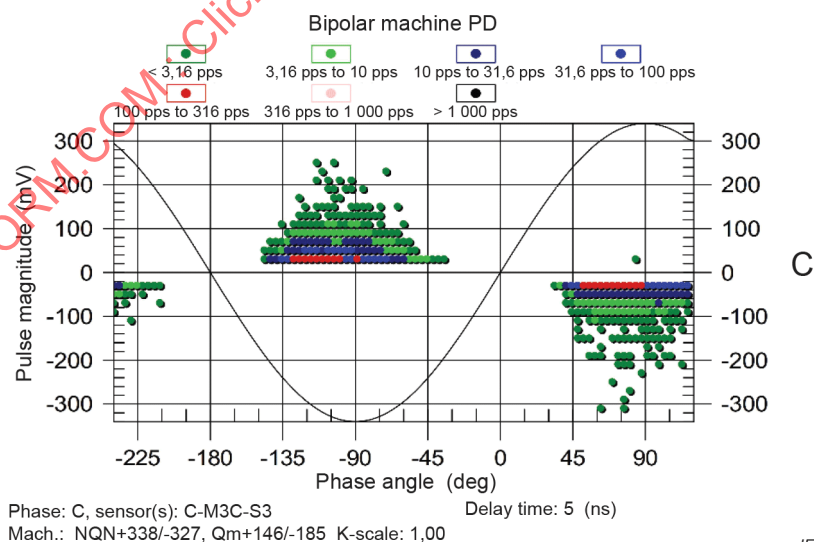
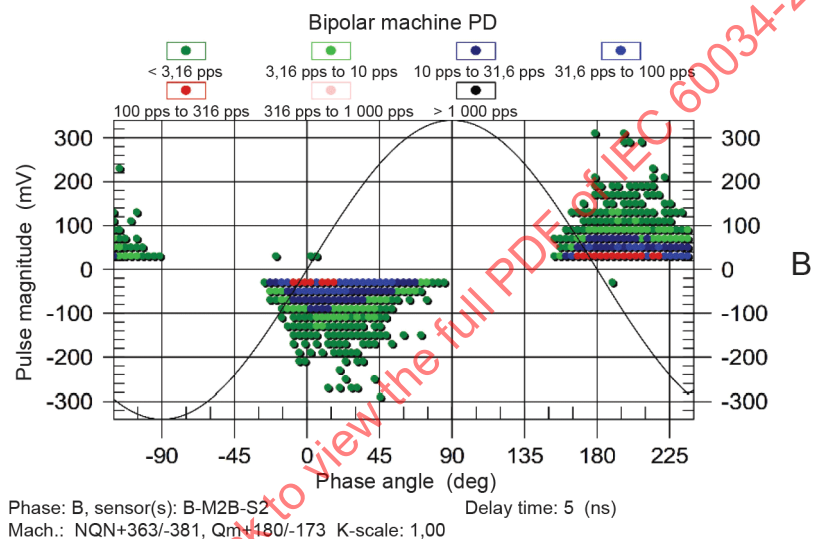
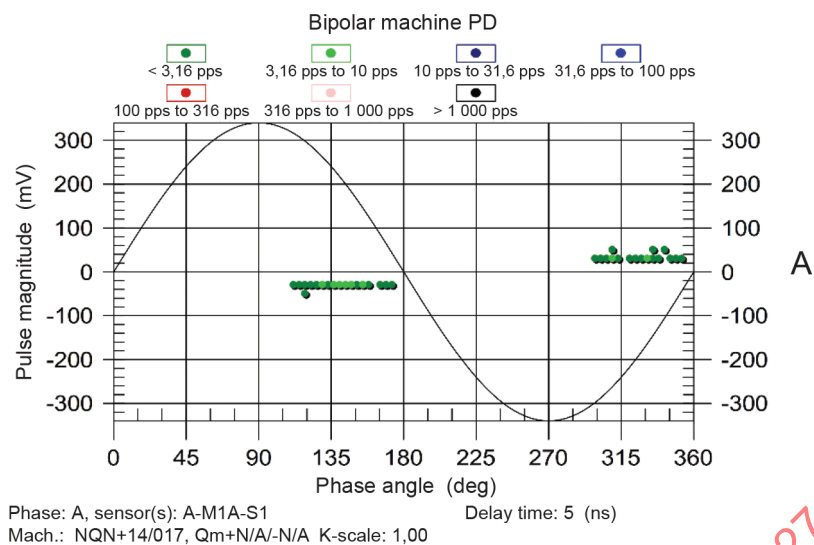
c) PD pulse activity captured by a commercial PD detector during one AC cycle in the below 1MHz range



d) PRPD pattern captured over 20 s (1 000 AC cycles) in the below 1MHz range with colour code for the pulse number $H(n)/s$

NOTE PD pulse magnitude q_i in nC, phase of discharge occurrence Φ_i .

Figure 8 – Examples of a PRPD pattern



IEC

The activity in A phase is not PD in A phase, but rather it is capacitively coupled from B and C phases.

Figure 9 – Phase to phase PD PRPD plots where the PD is caused by insufficient spacing between the endwindings of phases B and C

11 Interpretation of on-line measurements

11.1 General

It is not generally possible to specify a level of a PD quantity where there is a risk of accelerated aging which may lead to a reduction of life expectancy of the insulation. However, meaningful interpretation of on-line results is possible by using various sources of information, which may include not only the PD on-line results but also machine design knowledge, maintenance history, visual inspections, various off-line tests, operating conditions and appropriate expert knowledge.

In general, interpretation of on-line PD results should be performed in two steps. First it is fundamental for any maintenance planning to know if there are insulation problems, indicated by significant PD activity. Second, if there is significant activity, then the specific source of PD activity needs to be determined by a more detailed evaluation, e.g. by off-line PD measurement in accordance with IEC 60034-27-1 and visual inspection. Since the degree of deterioration, and hence the risk of insulation failure, depends considerably on the specific type of partial discharges, it is crucial to have sound information on the source of any significant PD activity, i.e. on the type and possible location within the stator winding of the machine. To receive detailed information about the status of the machine by making use of all the information included in the measured PD signals, a detailed analysis of the PD patterns is recommended to be performed at least once a year. If maintenance activities are planned, the analysis shall be performed before the maintenance activities. It is recommended to perform analysis of PD also after performed maintenance or repair activities. Detailed analysis may be done by automated pattern analysis (see Annex B) or expert analysis or both.

11.2 Evaluation of basic trend parameters

A powerful means of interpreting on-line PD data is to evaluate the trend of specific PD parameters over time. New windings may require some thousands of operating hours before stable PD benchmark readings are possible because of the continued post-curing of the resin system used, because of thermal and mechanical settlement process of compound insulation and support system in slot and endwinding area and because of interface contact effects between conductive slot coating of winding coils and core slot surface. The parameters that can be used for that trend evaluation are described in 9.2. For new machines it is essential for reliable trend evaluation to get an initial fingerprint of the PD activity by performing a baseline measurement according to 9.3. This initial fingerprint can then be used for comparison with subsequent periodic or continuous PD measurements.

If for example the PD pulse magnitude Q is used as the trending parameter, meaningful interpretation can occur by:

- trending Q on the same machine over time, using the same PD measuring system;
- comparing the Q trend from different phases of one machine, using the same PD measuring system;
- comparing the Q trend from several machines with the same design, using the same PD measuring system.

However, other trend parameters (e.g. according to Clause 9), which provide significant information on the development of winding deterioration, may be used for trend analysis. In general it is meaningful to use not only one but various PD parameters for simultaneous trending, which provide additional information on the characteristic PD behaviour. If the winding condition is stable over time without significant deterioration, then the observed trend parameters will behave stable as well. However, if the winding deteriorates due to operation in service, then for example Q will usually increase over time. Approximately doubling of Q over one year may be an indication that significant deterioration has occurred. In case of low PD levels this general concept has only limited applicability. Additional off-line tests or a visual inspection of the winding may then be performed.

Some cautions with regards to PD trending over time are:

- a new stator may have relatively high PD that decreases after the first thousands of operating hours;
- in the case that the baseline measurement on a new winding shows relatively high PD compared to other similar machines, the user of the machine may seek from manufacturers assurance (e.g. QC acceptance tests by PD off-line testing) that the new winding was made with the normal quality level that the manufacturer has achieved in the past and that the initial fingerprint shows a PD behaviour, which is normal for that kind of machine and a new stator winding;
- the PD behaviour may be affected by machine operating conditions, e.g. winding and core temperature, load, cooling gas temperature or ambient conditions. Variations in PD as a result of operating conditions shall be understood and distinguished from those caused by progressive ageing of the insulation system, to establish accurate assessment of the PD trend;
- variations of Q of a certain percentage, for example $\pm 25\%$, may be normal, due to more or less statistical behaviour of PD processes – even if comparable operating points as stated in 9.4 are given;
- for determining the specific type of PD process it is not sufficient only to detect and trend individual PD parameter values, but it is necessary also to assess the phase resolved PD pattern according to 10.3;
- a reliable assessment of the PD behaviour requires that each detected PD phenomenon is trended individually, which is only possible by analysing the phase resolved PD pattern according to 10.3;
- in older machines with high PD activity it is not uncommon for the PD trend to stabilize even though the deterioration is progressing;
- when trending the PD behaviour over time the PD magnitudes may also decrease even though significant deterioration of the insulation is present. As in most cases PD activity is only a symptom of some kind of thermal, mechanical or contamination-induced deterioration process it can change its intensity due to deterioration progress. Decreasing trends are thus not indicative of any insulation recovery;
- noise and disturbances can also change over time as equipment is added or removed from the plant, so effective noise and disturbance separation methods (see Annex B) are essential for effective trending.

When performing only trending of parameters over time and the trend is high, or the individual reading is high, then the PD data should be further analysed to determine the probable cause for the high PD activity. In this case, the analysis of phase resolved PD patterns (Figure 8 and Figure 9) in accordance with 11.3 and trends in accordance with 11.4 is useful for identifying the PD sources.

11.3 Evaluation of PD patterns

11.3.1 General

In order to assess the stator winding condition, the PRPD pattern (Figure 8), recorded during periodic measurements or during continuous monitoring, should be used to determine the specific type of any PD activity within the stator winding of the machine.

When using the PRPD-patterns, it may be possible to separate various PD sources from each other and to trend their PD behaviour separately. The techniques described in Annex B for separation of noise and disturbances from PD sources can be used as well to separate different PD sources. When knowing the specific type and location of any PD activity within the winding it is also possible to assess the risk associated with individual PD sources. Since each PD process may have its own critical level of PD magnitude it is not recommended to use PD magnitude alone as an indicator of risk of premature failure.

11.3.2 PD pattern interpretation

The aim of PD pattern interpretation is to identify the dominating PD source and to separate PD resulting from various PD sources within the stator winding. With this information, it is possible to:

- observe the trend behaviour of each PD source;
- provide rough information on possible locations of the various PD phenomena;
- assess the insulation condition, depending on PD source and type of PD and gain experience on the affected type of stator winding. For details on risk assessment refer to IEC 60034-27-1.

When analysing phase resolved PD patterns, the most meaningful interpretation can be obtained by:

- trending the PD pattern on the same machine over time, using the same PD measuring system;
- comparing the PD patterns from different phases of one machine, detected at the same time, using the same PD measuring system;
- comparing PD patterns from several machines with the same design, using the same PD measuring system.

To facilitate comparison between measurements a suitable database of PD measurements should be utilized. This database should ideally include a complete history of the PD behaviour and the operational and maintenance data of each machine under test. With some restrictions such a database can also be utilized for the direct comparison of PD measurements with those of machines of similar design and insulation system, which provides further useful information.

The specific relationship between the source of the PD, its typical behaviour and also its implications for the risk of stator winding insulation failure, is usually based on past experience verified in practice.

Annex C shows some examples of the principal appearance of phase resolved PD patterns and gives some general interpretation rules that can often be applied for stator winding PD.

11.4 Effect of machine operating factors

11.4.1 General

Further information on the likely deterioration mechanism can be obtained by analyzing the effect of various machine operating factors. Particularly the influence of load and temperature on the specific PD behaviour can be efficiently used to identify typical deterioration mechanisms resulting in stator winding PD.

11.4.2 Machine operating factors

The main machine operating factors that influence the PD behaviour are:

a) Load conditions:

The load conditions of the machine given as active and reactive load are characterized by the actual stator current, the stator voltage and the power factor. These parameters directly determine the winding and core temperature of the machine as well as the electrical and mechanical stresses on the stator winding insulation system.

b) Machine operation mode:

The operation mode of a machine that may be operated in peak or base load, may have an influence on the ageing behaviour of the stator winding insulation system due to thermal and mechanical stresses.

c) Cooling system:

Depending on the rated machine power different cooling systems are used. The stator winding may be direct or indirect air- or hydrogen-cooled or even direct water-cooled. The different cooling methods and type dependent designs significantly influence the thermo-mechanical stress of the stator winding components. In addition, for gas cooled machines, the cooling gas pressure influences the PD activity.

d) Ambient conditions:

The main ambient influence factors on the PD behaviour of the machine are humidity and particularly contamination, like partly conductive grease, dust, oil, etc., which may for example occur in open-circuit air-cooled machines.

Due to these influencing factors, for the analysis of the PD behaviour in correlation to the machine operating conditions, it is recommended to record the operating parameters according to 9.2. Transient load conditions like fast ramp-up or sudden load reduction provide important additional information about load dependent PD source behaviour, if continuous PD on-line monitoring together with operating parameter trending is used, see 11.4.4.

11.4.3 Steady state load conditions

When performing periodic on-line measurements load conditions for each measurement need to be the same in order to be able to compare subsequent measurements and to reliably assess the trend behaviour, see 9.4. In addition, it is necessary to determine if the noise conditions for the measurement have changed.

To ensure comparable machine conditions, the operating factors mentioned in 11.4.2 need to be recorded. If the machine conditions are the same for subsequent measurements and the trend parameters or the phase resolved PD patterns show significant deviations between measurements, then this may indicate changes of the winding insulation condition. In that case possibly changed disturbance conditions need to be identified and the type of PD source should be determined according to the characteristic shape of the PD patterns.

To further verify the type and/or location of PD sources a systematic variation of the operating machine parameters, as described in the next subclause, is very helpful.

11.4.4 Transient load conditions

Variations of the PD trend parameters and/or the PD patterns with respect to operating parameters can assist in identifying the source of PD and its relative severity.

- a) Change with load: When temperature and voltage are held constant, a change of the PD magnitudes within the negative voltage half-wave between low load and high load is indicative of a loose coils / bars within the stator slots. This effect is due to stronger electromagnetic forces acting on the winding at higher load. Such signs merit early investigation because erosion of thermosetting groundwall insulation caused by the combination of slot discharge and electromechanically induced vibration can be rapid.
- b) Change with power factor: When temperature and voltage are held constant, a change of the power factor allows to distinguish between PD caused by high electric fields and arcing effects due to electromagnetic current forces. This can be identified with the PRPD pattern since in contrast to PD resulting from high electric fields, arcing effects driven by electromagnetic forces lead to typical phase shifts of PD pulses within the discharge pattern.
- c) Change with temperature: When load and voltage are held constant, a change of the PD magnitudes as the temperature increases or decreases, is usually indicative of discharges mainly resulting from the slot portion of the winding. This may be a sign of delamination between inner conductor and insulation (where increasing temperature decreases the PD) or between layers of the main insulation (where the PD increases with increasing temperature if the semiconductive coating is deteriorated) or even a sign of slot discharges. The influence of temperature changes on the behaviour of PD from the end-winding region cannot be assessed.

- d) Change with gas pressure: If gas pressure can be changed, it may be possible to take PD measurements at different gas pressures. These results can be useful in confirming the sources of PD. If there is an increase in PD with decreasing pressure, the PD is occurring within the rotating electrical machine enclosure and not external to the rotating electrical machine.
- e) Change with humidity: The humidity of the surrounding cooling gas will have an effect on the behaviour of surface discharges. Lower PD has been attributed to the surfaces of the end arms at times when the humidity is high because of a homogeneous field grading effect on the winding surface. However, in the presence of severe contamination higher humidity may result in local conductive paths that lead to additional surface discharges. PD within the mainwall insulation does not change with humidity.

12 Test report

The test report should contain all data necessary for future trend analysis, as well as a clear recommendation to the operator on the condition of the machine. For a thorough analysis of the data, the following information shall be included in the test report – mandatory data is marked with (*). Best efforts are to be made to receive the requested data.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-2:2023

ON-LINE PARTIAL DISCHARGE TEST REPORT

Date (*):

Customer (*):

Plant (*):

Unit (*):

Safety responsible:

Operator(s)

Name	Function

(add more lines if needed)

Detector Manufacturer (*): Type (*): Serial (*): Bandwidth: Output unit (mV/pC):	PD Sensor Manufacturer: Year manufactured: Type: Capacitive HFCT Stator slot coupler Capacitance (if applicable): Distance between sensor and connection point:
Sensitivity check: Indicate if any off-line test has been performed earlier to check the sensitivity of or calibrate the measurement chain. Make reference to any previous report if available.	

Operating point(s) during PD tests

Ambient temperature (*):

Ambient relative humidity (*):

Voltage	Active power	Reactive power	Average winding temperature	Cooling medium pressure	Time
kV (*)	MW (*)	Mvar (*)	°C (*)	MPa (*)	(*)

(add more lines if needed)

MACHINE DATA

The following data were provided on (date) _____ by Mr/Ms:

- Nameplate data:
 - Manufacturer (*):
 - Type and serial number (*):
 - Year manufactured (*):
 - Rated voltage (kV) (*):
 - Rated power (MVA) (*):
 - Rated power factor (*):
 - Frequency (Hz) (*):
 - Speed (RPM) (*):
 - Number of parallel circuits:
 - Stator cooling system (*):
 - Indirect: air/hydrogen/carbon dioxide
 - Direct: air/hydrogen/water
 - Rated pressure of cooling medium (if applicable):
 - Insulation system data:
 - Insulation class (*):
 - Manufacturer (if rewound):
 - Manufacturing technology (resin rich / Single VPI / Global VPI):
 - Grading system type (paint/tapes):
 - Year last rewinding (if applicable):
 - Year last rewedging (if applicable):
 - External environment:
 - Capacitance and distance of surge capacitors, if applicable:
 - Distance between machine and transformer:
 - Operational data:
 - Power plant type (coal/oil/gas/hydro/nuclear):
 - Operation mode (continuous/intermittent):
 - Standby mode (hot/cold, applicable only to intermittent units):
- The following data should be reported starting from manufacturing or last rewinding (if any) to date:
- - Number of starts:
 - Number of hours (*):
 - Average load:
 - Peak load:
 - Average winding temperature:
 - Maximum winding temperature:
 - Other notes

Annex A (informative)

Nature of PD in rotating electrical machines

A.1 Types of PD in rotating electrical machines

A.1.1 General

Partial discharges are always present at a certain level (in general relatively low), even on new windings and may develop throughout the stator winding insulation system due to specific manufacturing technologies, manufacturing deficiencies, normal in-service ageing, or abnormal ageing. Machine design, the nature of the materials used, manufacturing methods, operating conditions, etc. can profoundly affect the quantity, location, characteristics, evolution and the significance of PD. For a given machine, the existing PD sources may be identified and distinguished in many cases by their characteristic PD behaviour.

A.1.2 Internal discharges

A.1.2.1 Internal voids

Although manufacturing processes are designed to minimize internal voids, inevitably there is some void content. For example, in a resin impregnated mica tape insulation system, that is commonly used in high voltage rotating electrical machines, the mica in the insulation system prevents the partial discharges from developing into a complete breakdown. As long as internal voids are small and do not significantly enlarge, operational reliability is not reduced.

A.1.2.2 Internal delamination

Internal delamination within the main insulation can be caused by imperfect curing of the insulation system during manufacturing or by mechanical or thermal over-stressing during operation. Large voids may develop over a large surface resulting in discharges of relatively high energy, which may significantly attack the insulation. In particular, delamination will reduce the thermal conductivity of the insulation, which might lead to accelerated ageing. Thus, delamination needs careful consideration when PD activity is being assessed.

A.1.2.3 Debonding between conductors and insulation

Thermal cycling may cause debonding at the interface of the conductor and the main insulation. This debonding can result in partial discharges (excluding bars equipped with Inner Corona Protection) which can relatively rapidly result in failure especially in multi-turn coils.

A.1.2.4 Electrical treeing

Electrical treeing in machine insulation is an ageing process in which fine erosion channels propagate through the epoxy around the mica barriers and may finally lead to electrical breakdown of the main insulation. Electrical treeing can start at any point of locally enhanced electric field within the insulation, e.g. rough structures of the inner conductor, insulation impurities, gas filled voids or delaminations in the insulation. This process is associated with internal partial discharge activity.

A.1.3 Slot discharges

Slot discharges in high voltage machines will develop when the conductive slot portion coating is damaged or insufficient. Higher discharges will develop when serious mechanical damage is already present, which may result in additional damage to the main insulation and eventually in an insulation fault. Slot discharges are generally caused by locally enhanced electric fields, and thus these processes occur only at the higher voltage end of each phase. The absolute time between detection of this phenomenon and final insulation failure is generally unknown. However, compared to other typical deterioration effects this time could be relatively short, especially in the presence of bar/coil vibrations. Thus, reliable detection at an early stage is necessary to decide if appropriate remedial actions are required.

A.1.4 Discharges in the end-winding

A.1.4.1 General

Partial discharges in the end-winding area may occur at several locations with high local electric field strengths. Such discharges usually occur at interfaces between different elements of the stator winding overhang.

A.1.4.2 Surface discharges

Surface discharges generally occur whenever the electrical field along a surface exceeds the breakdown field of the surrounding gas. This may occur if no stress control coating is applied or the stress control coating of the end-winding becomes ineffective because of poorly designed interfaces, contamination, porosity, thermal effects, etc. When reliable field grading is no longer assured surface discharges will develop, which may gradually erode the materials. This is normally a very slow failure mechanism, even though the PD behaviour might be subjected to relatively fast changes due to surface effects.

A.1.4.3 Phase to phase discharges

PD may occur between phases, for example due to inadequate phase to phase clearances or at elements of the overhang support system like spacers or cords. Depending on specific design details these discharges may have large magnitudes and may either occur as surface discharges or internal discharges and thus the time between detection of this phenomenon and final insulation failure is uncertain. Phase to phase discharges may result in a phase to phase breakdown.

A.1.5 Conductive particles

Conductive particles, especially small particles, for example due to contamination of the winding, may result in a strong local concentration of partial discharges.

A.2 Arcing and sparking

A.2.1 General

In contrast to the types of PD described in Clause A.1, which are caused by locally enhanced electric fields, arcing and sparking phenomena occur due to interruption of currents resulting from the magnetic flux within the stator core. These processes involve higher energy and temperatures, which leads to a faster degradation of the insulation materials. Arcing and sparking lead to transient pulses, which can also be detected by PD measuring systems.

A.2.2 Arcing at broken conductors

Broken conductors, resulting from mechanical vibrations, may lead to intermittent contacts and consequently to arc formation.

A.2.3 Vibration sparking

Due to the magnetic field in the stator core parasitic surface currents will flow axially along the conductive slot coating of a bar. In case the bar vibrates, these currents may be interrupted at a contact point to the core iron, and the interruption of this current will form an arc to the core. If the resistance of the conductive coating is too low, the current will be of significant magnitude and the resulting arc can damage the groundwall insulation by an erosion process. This so called vibration sparking, which is a relatively fast deterioration mechanism, may occur at any point of the winding and thus also at low potential sites, for example close to the neutral of the winding.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-2:2023

Annex B (informative)

Disturbance rejection and signal separation

B.1 General

Methods for signal clustering and pattern recognition can be used to identify sources of PD as well as to separate PD from noise and disturbances. Some commonly used techniques are described in this Annex.

B.2 Frequency domain separation

The Fourier transform of an individual PD pulse will contain frequencies from DC up to several hundred megahertz, if the PD sensor is in close proximity to the PD source. Many types of disturbances produce pulses, but the frequency content of the pulses at the PD sensor may be lower than stator winding PD. For example, sparking caused by poor electrical contacts or PD in other apparatus that is remote from the machine under test, often produce frequencies up to just a few megahertz. Thus, one method of separating PD from disturbances is to use analogue or digital filters that preferentially respond to pulses in specific frequency ranges. The PD measuring system (sensor and detection electronics) will be described as having a lower cut-off frequency and an upper cut-off frequency. Typical frequency ranges for on-line PD measuring systems according to Clause 6 are in the high frequency range (HF: 3 MHz to 30 MHz), in the very high frequency range (VHF: 30 MHz to 300 MHz), or in the ultra high frequency range (UHF: 300 MHz to 3 GHz). When using measuring systems in the low frequency range (LF: below 3 MHz), the lower frequencies will be subject to the significant influence of power line carrier, converter fed motor switching and excitation system disturbances, which need to be suppressed.

Generally, the higher the upper cut-off frequency of the PD detection system, the greater will be the signal to noise ratio, and thus the lower will be the risk of false indications. However, the higher the lower cut-off frequency, then the lower is the likelihood of PD being detected that is remote from the sensor. The PD sources that produce more signal magnitude usually needs a higher electrical field to trigger in case of internal PD sources. This is why more PD activity is commonly observed close to the high voltage terminal. However, other sparking and arcing phenomena, which may significantly damage the insulation, can also be detected by PD measuring devices and can occur throughout the winding even at low potential sites close to the neutral.

B.3 Time domain separation

In some on-line PD monitoring systems, different sources of PD as well as noise and PD are separated from disturbances on the basis of time domain characteristics. Two types of time domain separation systems have been employed:

- Pulse shape analysis.
- Time of pulse arrival.

Both types can only be used with a high bandwidth detection system.

Pulse shape analysis is the time domain analogy of filtering. It is based on specific time domain pulse characteristics such as rise-time and decay-time. For example, a PD sensor located close to the source of the stator PD may result in a detected rise-time that is shorter than a specific time, certain kinds of disturbances (types a) to k) in 5.2) may be characterized by a longer rise-time, assuming they pass through a long enough power cable or inductance before reaching the PD sensor. Digital circuits can separate different sources of PD and disturbance sources by measuring the rise-time. Generally, the further the PD or disturbance source is from the PD sensor, the longer will be the rise-time of the detected pulse, since series inductance and/or the travelling wave phenomena called dispersion (frequency dependent velocity) tends to suppress the higher frequency components of a pulse.

Disturbance suppression using the time of pulse arrival method requires at least two PD sensors per phase to be installed on bus or cable connecting the motor or generator to the power system. This method depends on the time it takes an individual disturbance or PD pulse to travel along the power cable or bus.

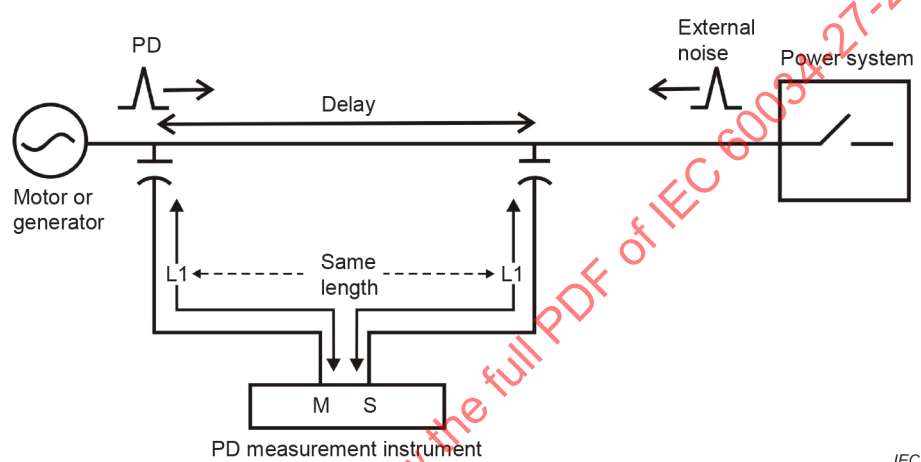


Figure B.1 – Example for time domain separation by time of pulse arrival

As shown in Figure B.1, pulses from the power system will arrive at "System" sensor (S) before it will arrive at the "Machine" PD sensor (M). The difference in the arrival time at each sensor depends on the distance between the two sensors, and the propagation velocity of the pulse along the bus or cable. Digital logic notes the relative time of arrival and categorizes the pulse as being from the power system, and thus assumed to be a disturbance. Similarly, a pulse from the stator winding is assumed to be PD if the machine sensor detects the pulse before being detected by the system sensor. Note this separation method is only effective if the pulse arriving first at the machine sensor is stator PD, and not disturbances such as from slip ring sparking (type j) or other sparking within the machine (type g), see 5.2. Simultaneous measurements at the two sensors are needed.

B.4 Combination of frequency and time domain separation

Time and frequency domain characteristics can also be combined to cluster disturbance pulses and different sources of stator winding PD. Time and frequency domain separation can be developed through a pulse shape analysis to produce a so-called time frequency map that plots the equivalent time length of the pulses versus their equivalent frequency content. The frequency content is normally calculated by a fast Fourier transform.

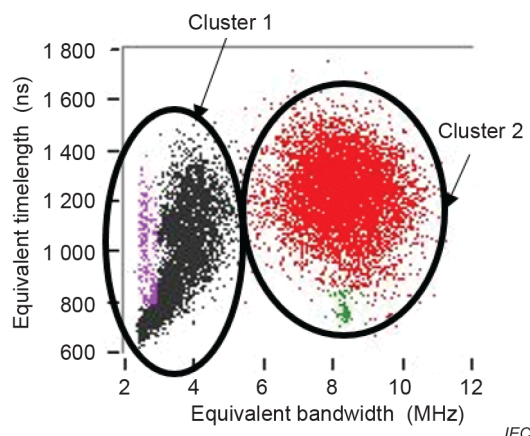


Figure B.2 – Combined time and frequency domain disturbance separation (time frequency map)

In a plot of the time domain versus frequency domain characteristics according to Figure B.2 disturbances will often appear as a cluster of pulses that is in a position which is distinctly different from stator winding PD. After clustering, PRPD sub-patterns due to noise or different sources of PD, can be thus identified and noise rejected from both the PD pattern and forbidden voltage-phase for the respective PD source (see Annex C for examples of PD patterns due to noise).

B.5 Synchronous multi-channel measurement

PD pulses and disturbances are subjected to a characteristic influence on their path from their point of origin to the measuring point, which depends on the transfer function of the respective propagation path.

In a synchronous multi-channel measurement, this characteristic is used to separate different PD sources and disturbances from each other.

This is made possible by measuring broadband and synchronously at several measuring points and correlating the impulses occurring almost at the same time (synchronous multi-channel measurement).

A synchronous, narrow-band measurement at one measuring point with several different frequency ranges (synchronous multi-frequency measurement) is also possible.

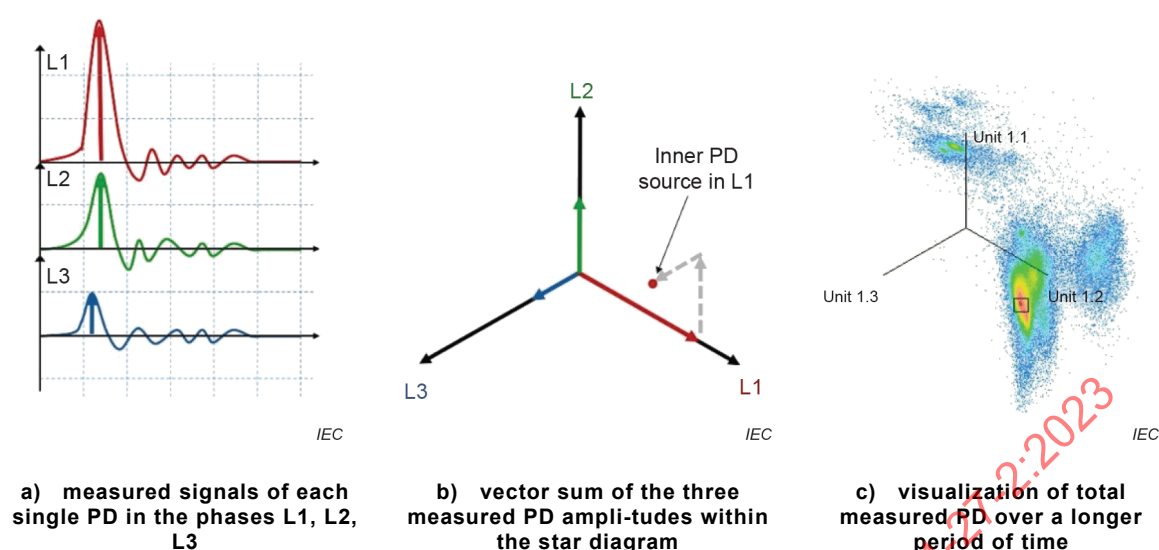


Figure B.3 – 3 phase star diagram of multi-channel measurement

In the example, a PD pulse is measured synchronously at three measuring points. The magnitude measured differs due to the different signal propagation paths (Figure B.3a). Correlation takes place by vectorial addition of the individual magnitudes. The end point calculated in this way indicates the position of the individual discharge in the star diagram (Figure B.3b).

If this correlation runs continuously over a longer measurement period, characteristic patterns for different PD sources and interference sources are generated in the star diagram (Figure B.3c), whose position in the diagram differs depending on the actual position of the PD source in the machine and phase assignment.

Disturbances coupling in from outside may generate a separate cluster in the diagram.

If individual PD patterns in the 3 phase star diagram are transformed back into a PD pattern, patterns from individual PD sources can be displayed. In addition, noise or disturbances can be filtered out.

The method is often used with three measuring points or frequency ranges but is not limited to this number.

B.6 Signal gating

Certain types of disturbances such as those from a static excitation systems (type c) in 5.2) produce disturbance pulses that are either phase-locked to the power frequency, or the timing of the disturbances can be obtained from an external source (such as a converter fed drive). In such cases, trigger circuits can be incorporated that predict when the disturbance will occur which then will open a gate to prevent the signal from the PD sensor at the time of the disturbance from being counted as stator PD.

For example, thyristor-based static excitation systems produce a disturbance from the commutation pulses, with a strong frequency component around 10 kHz. A filter which is sensitive to this 10 kHz component can be used to trigger a digital circuit that produces a gate signal whenever a thyristor pulse is detected. This gate signal can be used to prevent counting of any pulses that occur for the duration of the thyristor pulse. Some user knowledge is needed to set the trigger threshold and how long the gate is open. When the gate is open, legitimate PD pulses will also not be registered.

Gating can also be used to prevent radiated disturbances from being registered as PD. An antenna can be used to detect severe radiated disturbances. The antenna signal can be processed by filters and threshold detectors to produce a gate signal whenever a disturbance in certain frequency ranges above a set threshold occurs. Since this same radiated disturbance may also be detected by the PD sensor, the signal from the PD sensor can be interrupted whenever the gate is triggered. Some expertise is usually required to set the thresholds and since the disturbances transmission may change over time it is more appropriate for periodic measurements.

Another gating method is implemented by software. A simple gating method is using a rectangular window in the PRPD, which is also referred to as phase amplitude gating. According IEC 60270 this type of gating is limited in percentage of total period. A further method is the use of an additional sensor (e.g. for excitation pulses) or with software intelligence to identify non- phase related pulses as external disturbance. In these cases, a pre- and post-trigger time can be defined. During this period all pulses will be suppressed from displaying and not considered for calculation of PD magnitude. If a measurement is recorded, gating can be switched on and off after the measurement as well.

B.7 Pattern recognition

Pattern recognition is a means of differentiating different sources of PD and disturbance pulses. There are two basic approaches to pattern recognition: manual and automatic.

In the manual method, the output of the PD sensor is displayed for example on an oscilloscope or a purpose-built PD instrument. The display may show the positive and negative pulses, the position of the pulses on the AC cycle, as well as the magnitude of the pulses (see Figure 8). As described in Annex C, PD pulses occur in specific parts of the AC cycle, with particular polarity relationships relative to the AC cycle. Some types of PD and disturbances will produce pulses that occur in different parts of the AC cycle or will appear across the entire AC cycle. In addition, they may have pulse polarity relationships that may be different from other stator winding PD. An experienced observer can often recognize different types of stator PD as a distinct pattern from various types of disturbances. Examples include static excitation interference (type c) that occur every 60 degrees across the AC cycle and can easily be ignored by an observer of the display. Similarly, poor electrical contacts tend to produce pulses within a few degrees each side of the voltage zero crossings. Clearly, the more experience the observer has, the more likely that the different PD sources and disturbances will correctly be identified. This manual approach to pattern recognition is somewhat subjective, and different observers may come to different conclusions.

Automated (or computer-aided) pattern recognition is a rapidly evolving field of investigation. A number of pattern recognition methods have been applied to separate different sources of PD and disturbances and indeed separate various aging processes from one another. Some of the methods include:

- Statistical analysis of the distribution of pulses with respect to AC phase position, e.g. the mean, standard deviation, skew and kurtosis of the phase angle for positive and negative pulses. Different sources of PD and disturbances will likely have different statistical moments.
- Artificial intelligence driven pattern recognition analysis to replicate the thought processes of an expert who manually distinguishes different sources of PD and disturbances.
- Time-frequency transforms combined with cluster recognition methods and fuzzy logic to separate and identify pulses associated with different failure processes and types of disturbances.

These and other computer-aided pattern recognition methods have found application to cluster different sources of PD and disturbances in a more objective manner than can be obtained by manual methods. However, the effectiveness of any particular method depends on the specifics of their implementation. PD instrument settings such as gain and trigger may change significantly the PD pattern and confuse an automatic system that does not take these parameters and others in its intelligence.

To further develop the capabilities of automated pattern recognition techniques and to improve the reliability of their results, the requirements to store measured data are as follows:

- Time synchronous measurement of all signals from different PD measuring points.
- Raw data stream of the recorded single pulses: Magnitude, phase position of the pulse, time stamp identifier. Data streams need to be recorded long enough to collect a representative amount of PD pulses for a PRPD pattern (see IEC 60034-27-1:2017, Annex A).
- A time stamp identifier for clear correlation of PD activity with operating parameters.
- Operating parameters as given in 9.2.
- Further information about the monitored machine as given in Clause 12.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-27-2:2023

Annex C (informative)

Examples of Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pattern

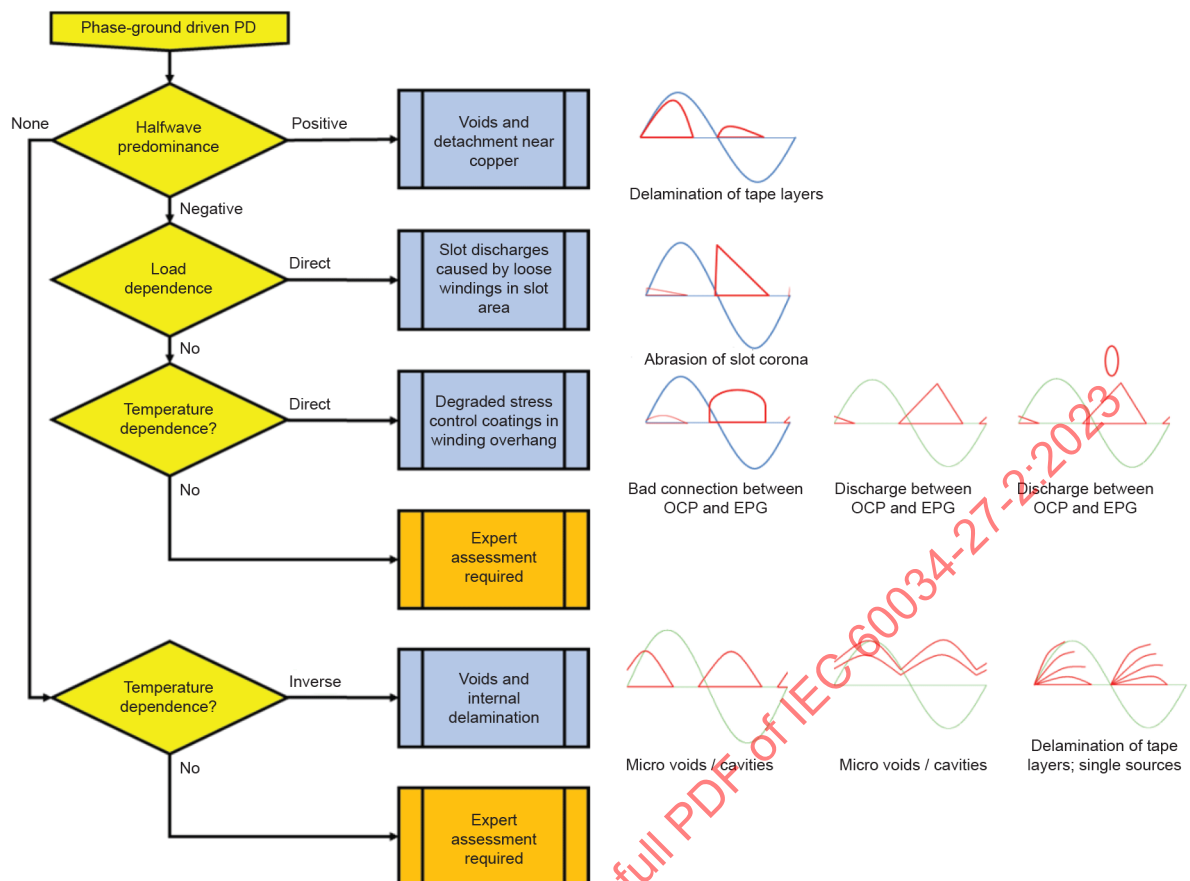
C.1 General

The examples of patterns as given in this Annex illustrate typical patterns for the respective PD activity. These activities are of general nature and may be present even in acceptable quality high voltage insulations. The patterns are given solely to help classify patterns towards specific types of PD activity and enable comparable analyses.

C.2 Principal appearance of phase resolved PD patterns

The following figures show some examples of phase resolved PD patterns in a stylized form, which can typically be found for defects in stator winding insulation systems. It should be noted that different patterns than shown here may also occur for different PD sources. Users should be aware that various additional effects, not shown here, can occur during on-line PD measurements that may also produce other characteristic PD patterns. Especially strong superposition of patterns is possible in practical cases and also variations in pattern shape, PD frequency or other characteristics.

In consistency with the PD patterns presented in Figure 8, positive discharges do predominantly appear at negative zero crossing, and negative discharges appear at positive zero crossing. Consequently, positive predominance is, when the PD at negative zero crossing are higher, and vice versa.



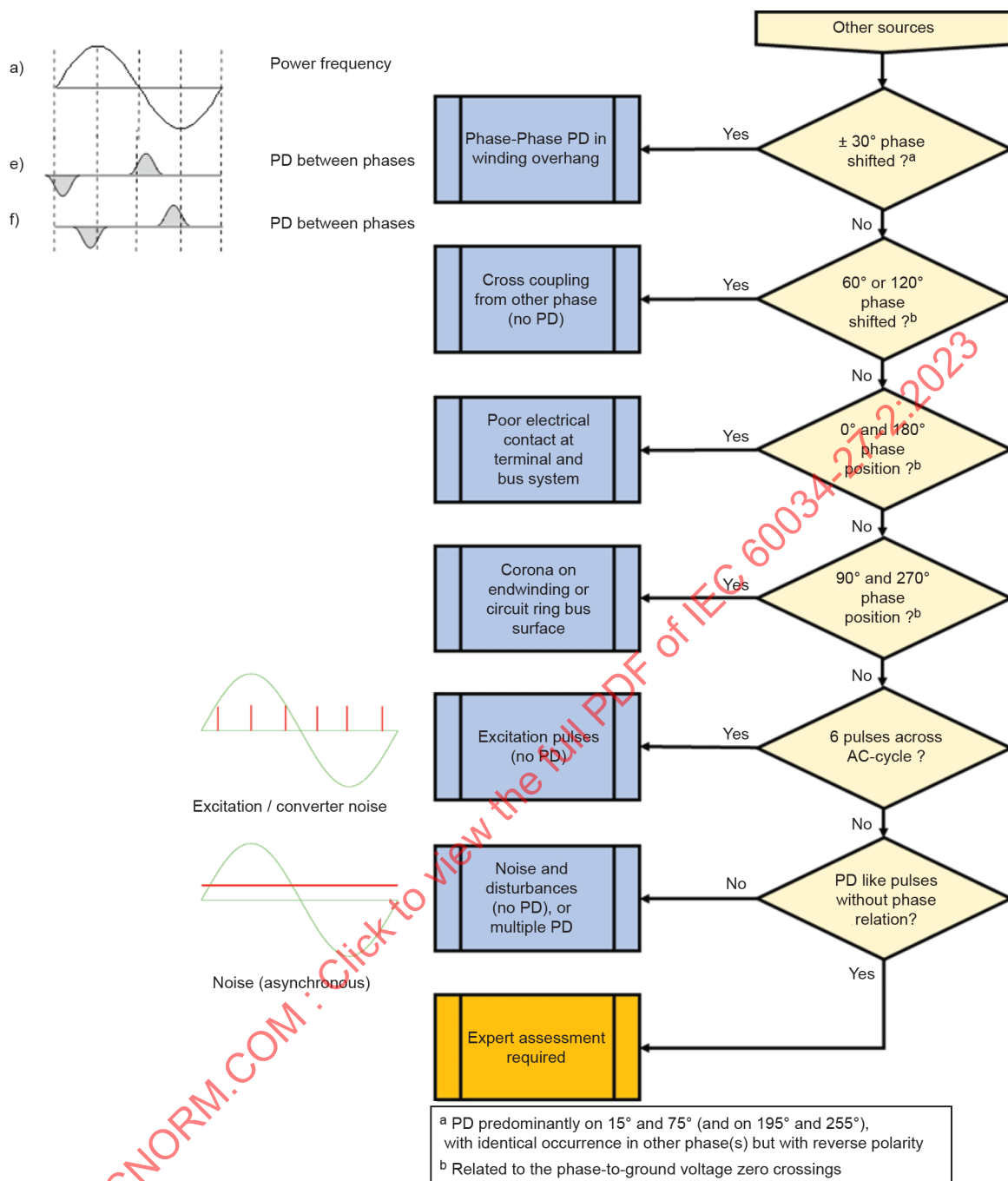
IEC

Key

OCP conductive slot coating

EPG stress control coating

Figure C.1 – Phase-earth driven PD – PD predominantly centered on 45° and 225° after zero crossing of phase-to-earth voltage



IEC

Figure C.2 – PD events and other sources, e.g. non-PD sources, that are not centered on 45° and 225° after zero crossing of phase-to-earth voltage

The stylized PD patterns next to the flowcharts are drawn unipolar, although the PD activity itself produces positive and negative pulses. This was done here because there are instruments that providing only one polarity. In addition, the pulse polarity is often lost when the PD pulses propagating through the winding. The polarity would thus be measured unreliably. This primarily affects instruments that measure in the low frequency range.

In almost any case, the polarity of the individual PD depends on the phase position at which the pulse occurs. The phase position is therefore a reliable indicator of the correct pulse polarity, rather than the polarity measured by the instrument.

Even if the specific patterns detected during on-line measurements may deviate from the patterns shown in Figure C.1 and Figure C.2, it is possible to make the following general remarks:

- When the PD pulses, which mainly occur during the negative half-cycle of the voltage waveform, predominate in magnitude (Figure C.1), the source of the PD likely involves a damaged conductive slot coating due to loose vibrating stator bars or coils. This process is usually more pronounced during on-line measurements at higher load.
- When the PD pulses, which mainly occur during the positive half-cycle of the voltage waveform, predominate in magnitude, the source of the PD can be expected to be at or near the copper strands and may indicate an incomplete bond between the insulation and the copper conductor (Figure C.1). In the case of multitrans coils there may be an inadequate bond between the turn insulation and the groundwall insulation.
- When the PD pulses in the positive and negative half-cycle are in the same range of magnitude (Figure C.1), the source of PD can be expected to be surface discharges at the end-winding or internal discharges due to voids or delamination of the main insulation.
- Note that examples e) and f) in Figure C.2 should be taken together as a pair. If the PD is occurring between two phases, the PD detected in one phase will tend to be shifted right (closer the zero crossing of the AC cycle), whereas the same PD detected in the other phase will be shifted left (closer to the peaks of the AC cycle).
- During on-line measurements cross-coupling effects between different phases may occur, which can significantly influence the PD patterns. Such effects usually complicate the identification of individual PD sources.

C.3 Example of typical PRPD patterns recorded in laboratory

C.3.1 General

The following measurements were taken under well controlled laboratory conditions, so that the PD processes are well known while the noise level is kept very low. For every type of defect simulated in laboratory, the phase resolved PRPD patterns were recorded many times over a long period of time, in order to validate the repeatability of the PRPD patterns.

C.3.2 Internal discharges

C.3.2.1 Internal voids

Internal PDs are generated in an air or gas-filled pockets embedded in the main insulation. They result from the manufacturing process and do not indicate ageing factors. Under normal circumstances, internal discharges do not lead to marked ageing.

Figure C.3 illustrates a PRPD pattern recorded in laboratory, when only internal PD activity was present on the bar. The main characteristic of the resulting PRPD pattern is the symmetry between the positive and negative PDs, combined with a rounded shape. Typically, negative PDs occur between 0° and 90° and positive PDs occur between 180° and 270°.

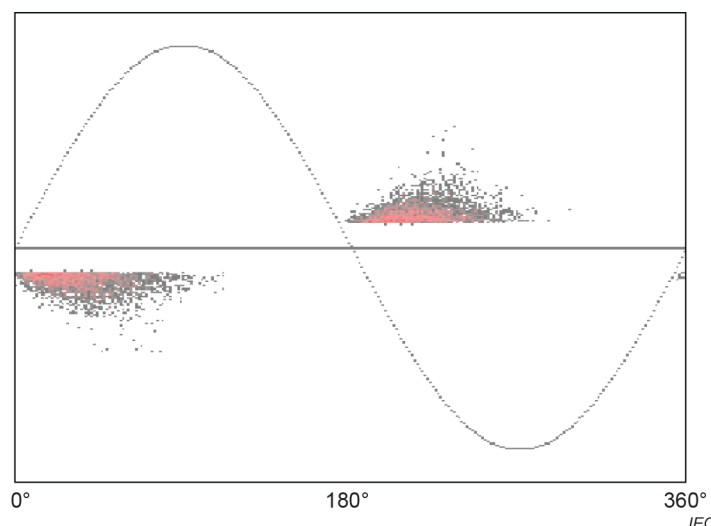


Figure C.3 – Example of internal void discharges PRPD pattern, recorded during laboratory simulation

C.3.2.2 Internal delamination

Internal delamination PDs are generated in an air or gas-filled longitudinally elongated pocket embedded in the main insulation. They often result from overheating or from extreme mechanical forces which both lead to separation of large areas between insulation layers.

A typical PRPD pattern resulting from internal delamination is illustrated in Figure C.4. Like internal discharges, the PRPD pattern will be symmetric in amplitude and PD count, again reflecting the symmetry of the defect. Even if this type of defect is similar to internal void discharges, the PD count will be much higher, mostly because of larger PD sites. Also, the resulting PRPD pattern will show a less rounded shape than internal void PRPD pattern, sometimes almost triangular shape. Older insulation systems are more subjected to internal delamination than mica-epoxy insulation.

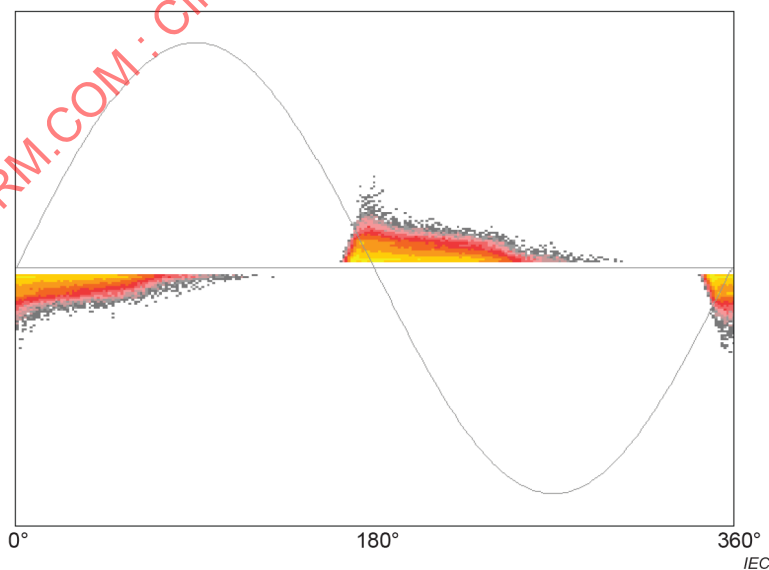


Figure C.4 – Example of internal delamination PRPD pattern, recorded during laboratory simulation

C.3.2.3 Delamination between conductor and insulation

Delamination PDs between conductors and the main insulation are generated in an air or gas-filled longitudinally elongated pockets embedded between the main insulation and the high-voltage copper conductor. They often result from overheating or from extreme mechanical forces which both lead to separation of large areas between the layers.

A typical PRPD pattern resulting from delamination between conductor and insulation is shown in Figure C.5. Since this type of defect is asymmetric (copper on one side and insulation on the other side), the corresponding PRPD pattern will also be asymmetric. Negative PDs, occurring during the positive voltage half-cycle, will be higher in number and amplitude than positive PDs occurring during the negative voltage half-cycle.

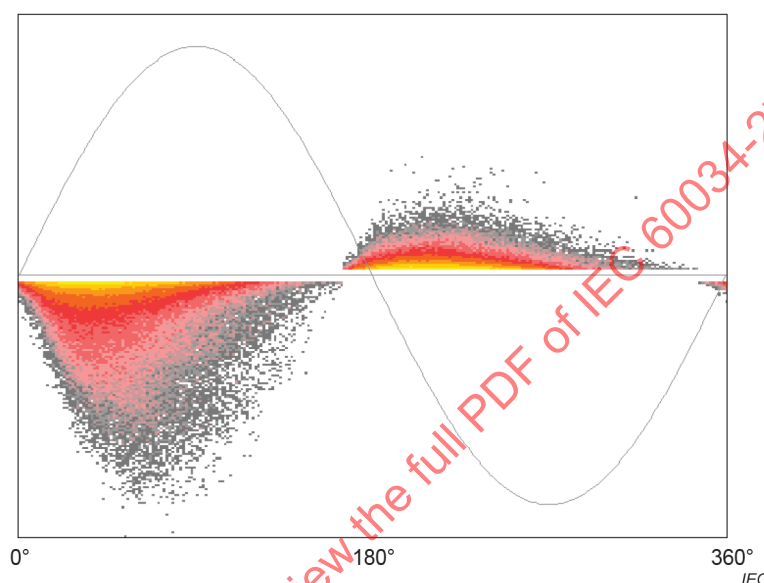


Figure C.5 – Example of delamination between conductor and insulation PRPD pattern, recorded during laboratory simulation

C.3.3 Slot partial discharges

Slot PDs are generated in an air or gas-filled pocket, inside the stator core, between the surface of a bar and the stator core. This activity will occur when the electrical contact between the conductive slot coating of the bar or coil and the slot is lost or its surface resistance is too high.

This type of activity, simulated in laboratory, is illustrated in Figure C.6, left. A typical PRPD pattern corresponding to this type of activity is shown in Figure C.6, right. Since a slot PD defect represents an asymmetric defect (bar insulation on one side, stator core on the other), the PRPD pattern will also be asymmetric. The slot PRPD pattern is characterized by an asymmetry in favour of positive discharges, occurring during the negative voltage half-cycle, eventually combined with a triangular shape and a sharp slope at the onset of the positive PD pattern.

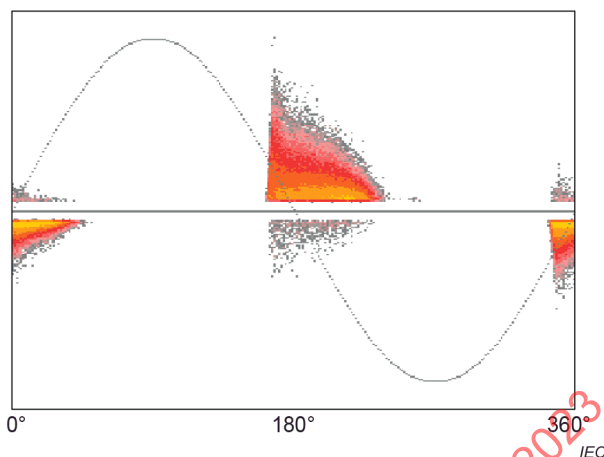
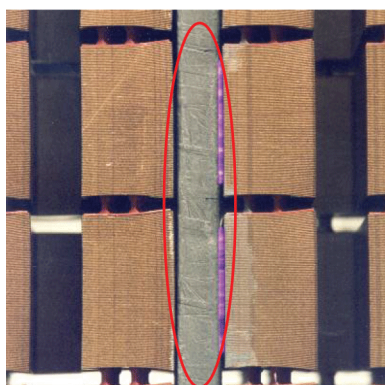


Figure C.6 – Slot partial discharges activity and corresponding PRPD pattern, recorded during laboratory simulation

C.3.4 Discharges in the end-winding

C.3.4.1 Corona activity at the conductive slot coating and stress grading coating

This activity will occur directly at the junction of the conductive slot and the stress grading coating when the field grading system is not adequate, resulting in a high local electrical stress.

This type of activity, simulated in laboratory, is illustrated in Figure C.7, left. In this figure, the conductive slot coating (S/C) is on the left side, while the grading coating is on the right. A typical PRPD pattern corresponding to this type of activity is shown in Figure C.7, right. It is characterized by an asymmetry in favor of positive discharges, occurring during the negative voltage half-cycle, combined with a rounded shape. In some cases, the asymmetry in maximal amplitude may tend to disappear, but the asymmetry in the number of PDs will still be present.

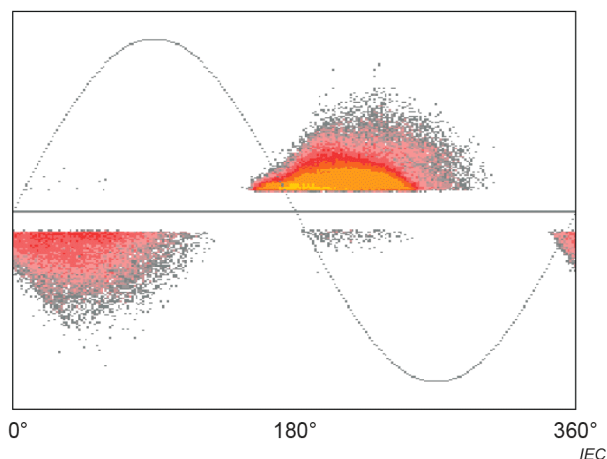
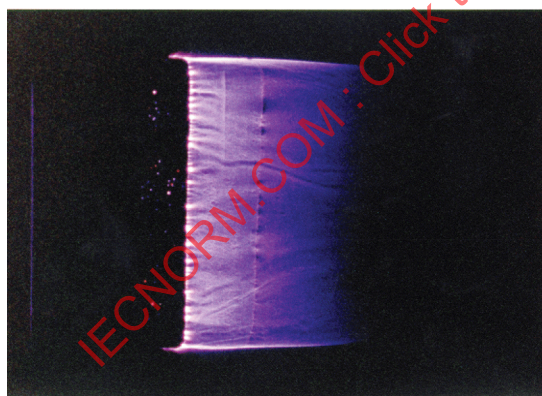


Figure C.7 – Corona activity at the S/C and stress grading coating, and corresponding PRPD pattern, recorded during laboratory simulation

C.3.4.2 Surface discharges tracking

This type of activity will occur along the winding overhang due to contamination at the air/insulation interface. This activity, simulated in laboratory, is illustrated in Figure C.8, left. In this figure, the conductive slot coating is on the left side, while the grading coating is on the right. A typical PRPD pattern corresponding to this type of activity is shown in Figure C.8, right. Surface tracking PDs are encircled in the red ellipse. The main characteristic of surface tracking is a vertical cloud of PDs, combined with a low PD count. In some cases, PDs can occur in both polarities.

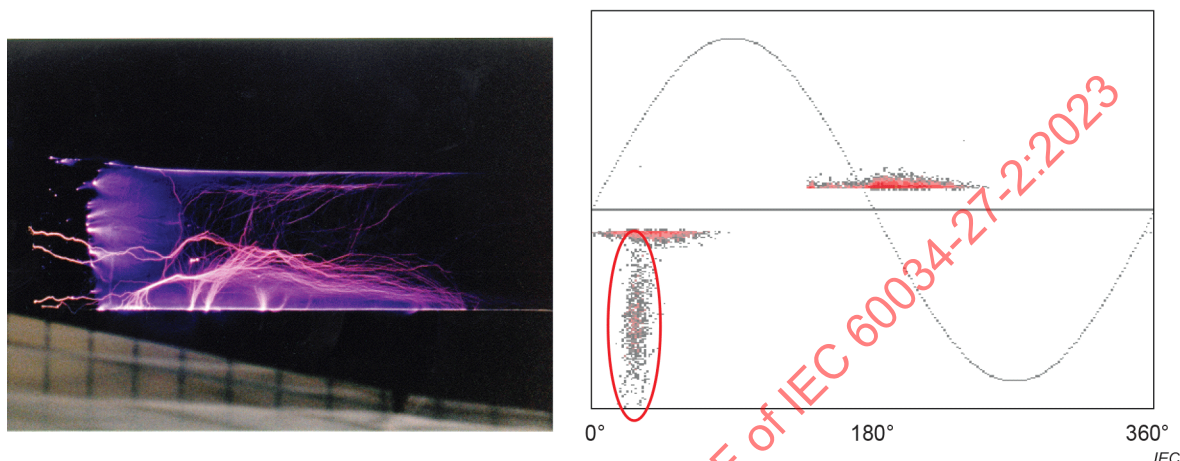


Figure C.8 – Surface tracking activity along the end arm and corresponding PRPD pattern, recorded during laboratory simulation

C.3.4.3 Surface discharges at end corona protection

This type of activity will occur at the overlapping point of conductive slot coating and stress control coating due to connection problems between these two layers. This type of activity will change with time and developing connection problems. In different stages of degradation, the pattern can look different. Figure C.9 shows different stages of degradation in laboratory conditions and corresponding PD patterns.

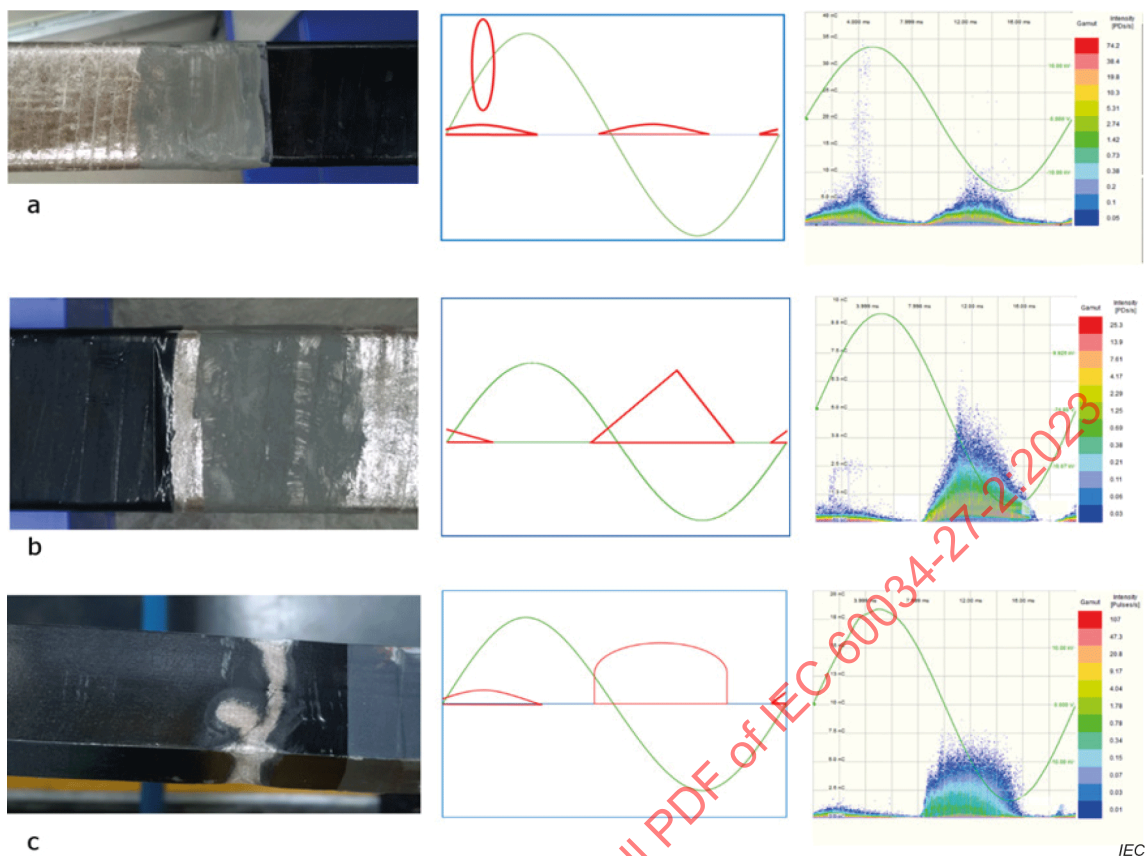


Figure C.9 – Surface discharges at the junction between stress control and conductive slot coatings:a) Insulating tape simulating a bad electrical connection between conductive slot coating and stress control coating and the corresponding PRPD;b) and c) the connection is completely interrupted

C.3.4.4 Gap type discharges

This type of activity will occur between two bars in the winding overhang, or between a bar and the press finger of the stator core. The two activities, simulated in laboratory, are illustrated in Figure C.10, left. The top one represents a PD activity between two bars, while the lower one illustrates a PD activity between a bar and the press finger of the stator core. Typical PRPD patterns corresponding to these activities are shown on the right. The top figure shows two sine waves – one of which is representing the laboratory conditions showing the actual phase-to-earth voltage. The other sine wave represents the voltage as it would appear during actual on-line measurement due to the fact that this type of PD is driven by phase-to-phase-voltage. The main characteristic of a gap type discharge activity is a horizontal cloud of PDs of relatively constant amplitude, present in both polarities of the voltage. Since both defects are very similar, the PRPD patterns will also look similar. The phase location of the patterns may help to identify the correct PD location, because in Figure C.10, top the driving field is resulting from the phase-to-phase voltage, whereas the driving field in Figure C.10, bottom is phase-to-earth related.

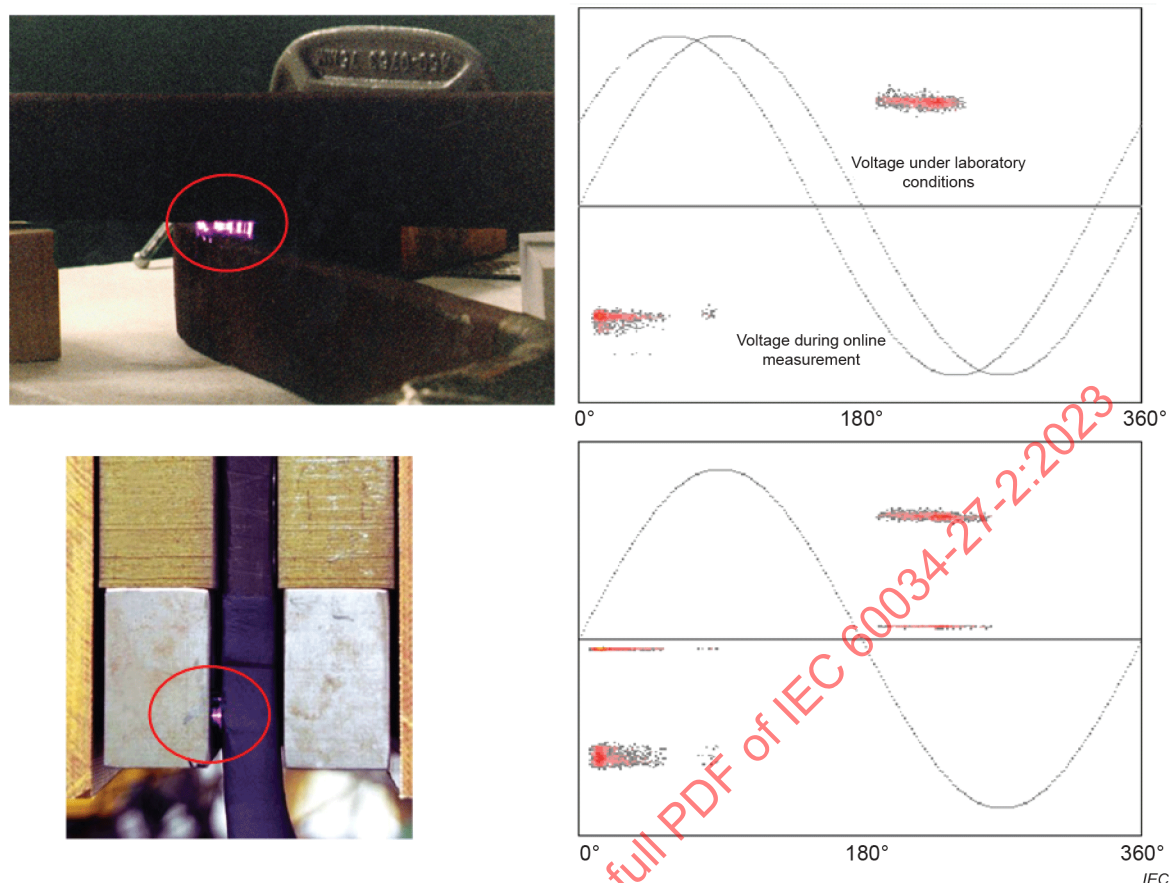


Figure C.10 – Gap type discharge activities and corresponding PRPD patterns, recorded during laboratory simulations

C.4 Example of typical PRPD patterns recorded on-line

C.4.1 General

The following measurements were taken on-line, under stable temperature conditions. All the PRPD patterns shown here were recorded in a higher frequency range (2 MHz to 20 MHz), in an attempt to eliminate noise. In some cases, visual inspections were performed after the PD measurements. Illustrations of the degradation of the insulation are given.

C.4.2 Internal discharges

C.4.2.1 Internal voids

Internal PDs are generated in an air or gas-filled pockets embedded in the main insulation. They result from the manufacturing process and do not indicate ageing factors. Under normal circumstances, internal discharges do not lead to marked ageing.

Figure C.11 illustrates a PRPD pattern recorded on-line, showing an internal void discharge activity. The main characteristic of the resulting PRPD pattern is the symmetry between the positive and negative PDs, combined with a rounded shape.

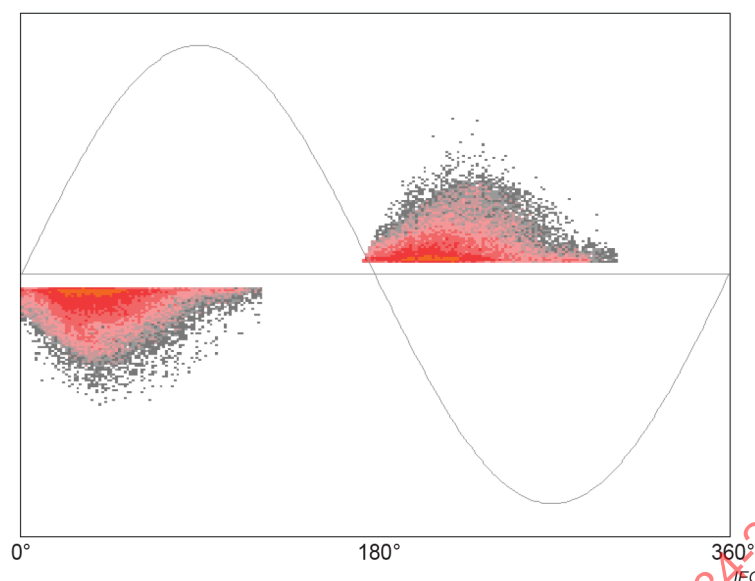


Figure C.11 – Example of internal void discharges PRPD pattern, recorded on-line

C.4.2.2 Internal delamination

Internal delamination PDs are generated in an air or gas-filled longitudinally elongated pocket embedded within the main insulation. They often result from overheating or from extreme mechanical forces which both lead to the separation of large areas between insulation layers.

Figure C.12 illustrates a typical PRPD pattern recorded on-line, showing an internal delamination partial discharge activity. The main characteristic of the resulting PRPD pattern is the symmetry between the positive and negative PDs, combined with a triangular shape.

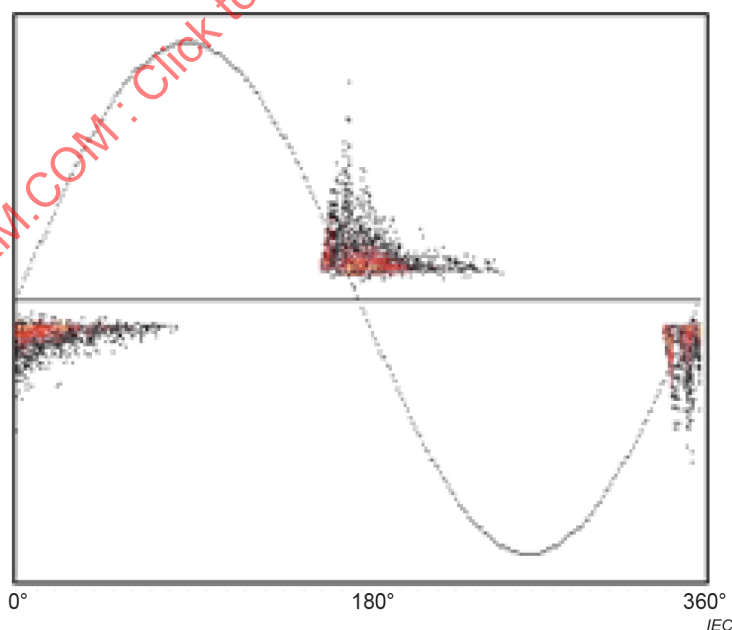


Figure C.12 – Example of internal delamination PRPD pattern, recorded on-line

C.4.2.3 Delamination between conductor and insulation

Delamination PDs between conductors and the main insulation are generated in an air or gas-filled longitudinally elongated pockets embedded between the main insulation and the high voltage copper conductor. They often result from overheating or from extreme mechanical forces which both lead to the separation of large areas between these layers.

A typical PRPD pattern, recorded on-line, resulting from delamination between the conductor and the insulation is illustrated in Figure C.13. Since this type of defect is asymmetric, the corresponding PRPD pattern will also be asymmetric. Negative PDs, occurring during positive voltage half-cycle, will be higher in number and amplitude, than positive PDs occurring during the negative voltage half-cycle.

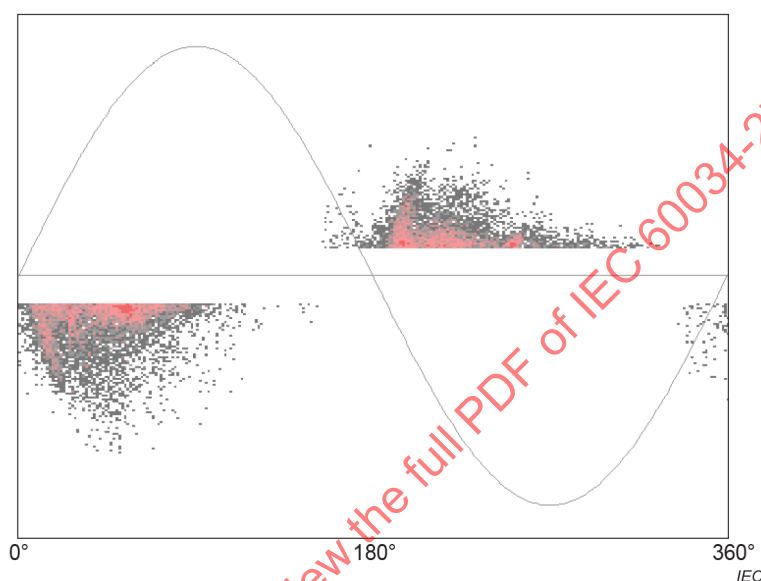


Figure C.13 – Example of delamination between conductor and insulation PRPD pattern, recorded on-line

C.4.3 Slot partial discharges

Slot PDs are generated in an air or gas-filled pocket, inside the stator core, between the surface of a bar and the stator core. This activity will occur when the electrical contact between the S/C coating of the bar or coil and the slot is lost or its surface resistance is too high.

Figure C.14 shows the PD pattern of one phase recorded on-line. The machine 15,5 kV – 128 MVA is in a cave connected to its own transformer itself connected with a cable to the HV network. The on-line pattern matched the off-line pattern. Ozone odor can easily be detected close to the machine door. Figure C.15 shows the picture of a bar removed for expertise chosen to be the one with the highest level on that phase and close to line side when scanning slots using the TVA probe two years later. Figure C.16 shows the PD pattern of the same phase another two years later.

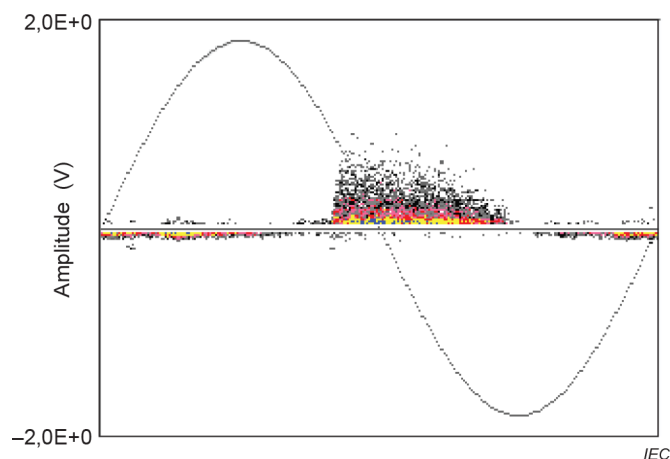


Figure C.14 – PD pattern of phase 2 recorded on-line in April 2012 without any filtering indicating slot PD



Figure C.15 – Picture of a bar removed for expertise chosen to be the one with the highest level on phase 2 and close to line side when scanning slots using the TVA probe in January 2014

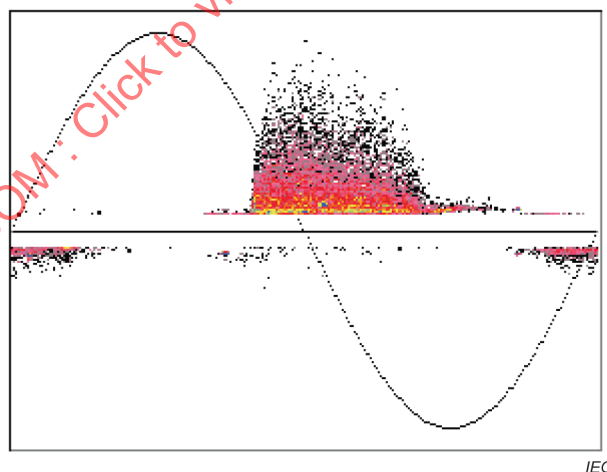


Figure C.16 – PD pattern recorded on-line on phase 2 in September 2016 (maximum scale is 1 V)

NOTE In the presence of large amounts of rust deposit on both sides of the defect, resulting from long time exposure to slot PD, the asymmetry in the PRPD pattern may be less pronounced, because the insulated surface will become more conductive, while the conductive surface will become more resistive.

C.4.4 Discharges in the end-winding

C.4.4.1 Corona activity at the junction of the slot coating and stress control coating

This activity will occur directly at the junction of the slot coating and the stress grading coating, when the field grading system is not adequate, resulting in a high local electrical stress.

Figure C.17, left, illustrates the degradation resulting from the long-term attack by corona activity at the S/C and stress grading coating. A PRPD pattern recorded on-line is shown on the right of the picture. The main characteristic of corona activity at the junction, namely an asymmetry in favor of positive discharges, occurs during the negative voltage half-cycle, combined with a rounded shape.

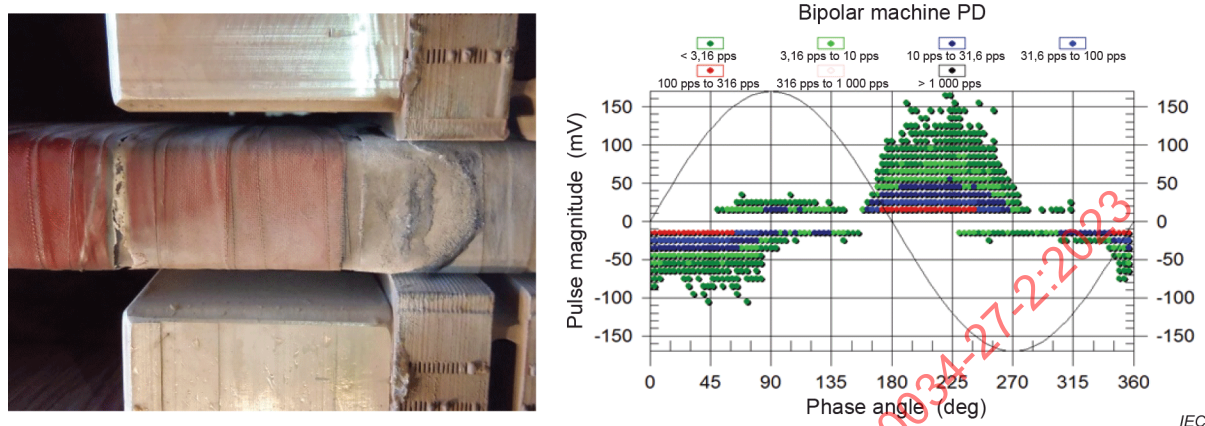


Figure C.17 – PRPD plot and photo of a stator bar in the same phase of a large air-cooled turbine generator showing signs of deterioration of the slot conductive coating, as well deterioration of the interface between the slot conductive coating and the stress control coating

C.4.4.2 Surface tracking discharges

This activity will occur along the winding overhang due to contamination at the air/insulation interface. This type of activity can be very sporadic, and highly depends on temperature and humidity conditions. In the PRPD illustrated in Figure C.18, surface tracking PDs are encircled in the red ellipse. Other PDs are of internal nature and cross-coupling between phases.

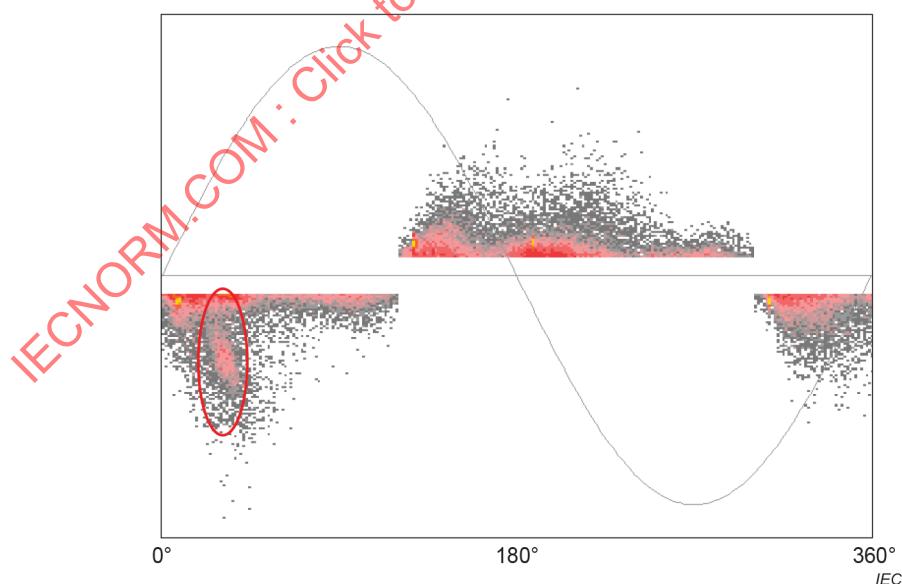


Figure C.18 – Surface tracking activity along the end arm and corresponding PRPD pattern, recorded on-line

C.4.4.3 Gap type discharges

This activity will occur between bars in the winding overhang or between a bar and the press finger of the stator core. Figure C.19, left, illustrates the degradation resulting from the long-term attack by bar-to-bar PD activity. The corresponding PRPD pattern is shown in Figure C.19, right. The main characteristic of gap type discharge activity is a horizontal cloud of PDs of relatively constant amplitude, present in both polarities of the voltage. Here, at least two distinct PD sites are active, represented by two PD levels.

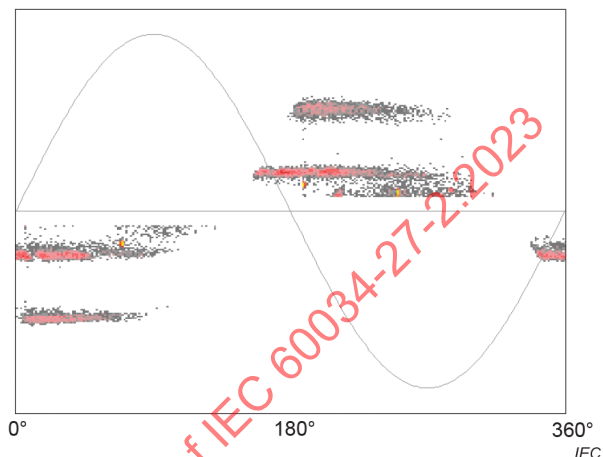
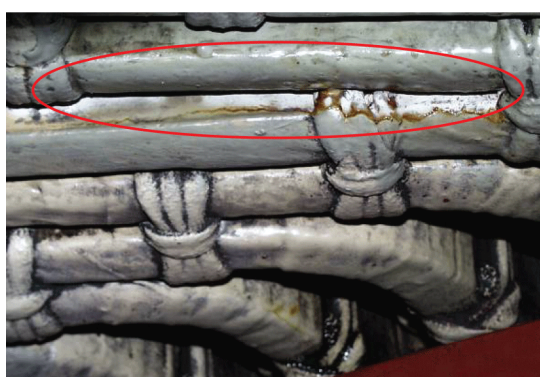
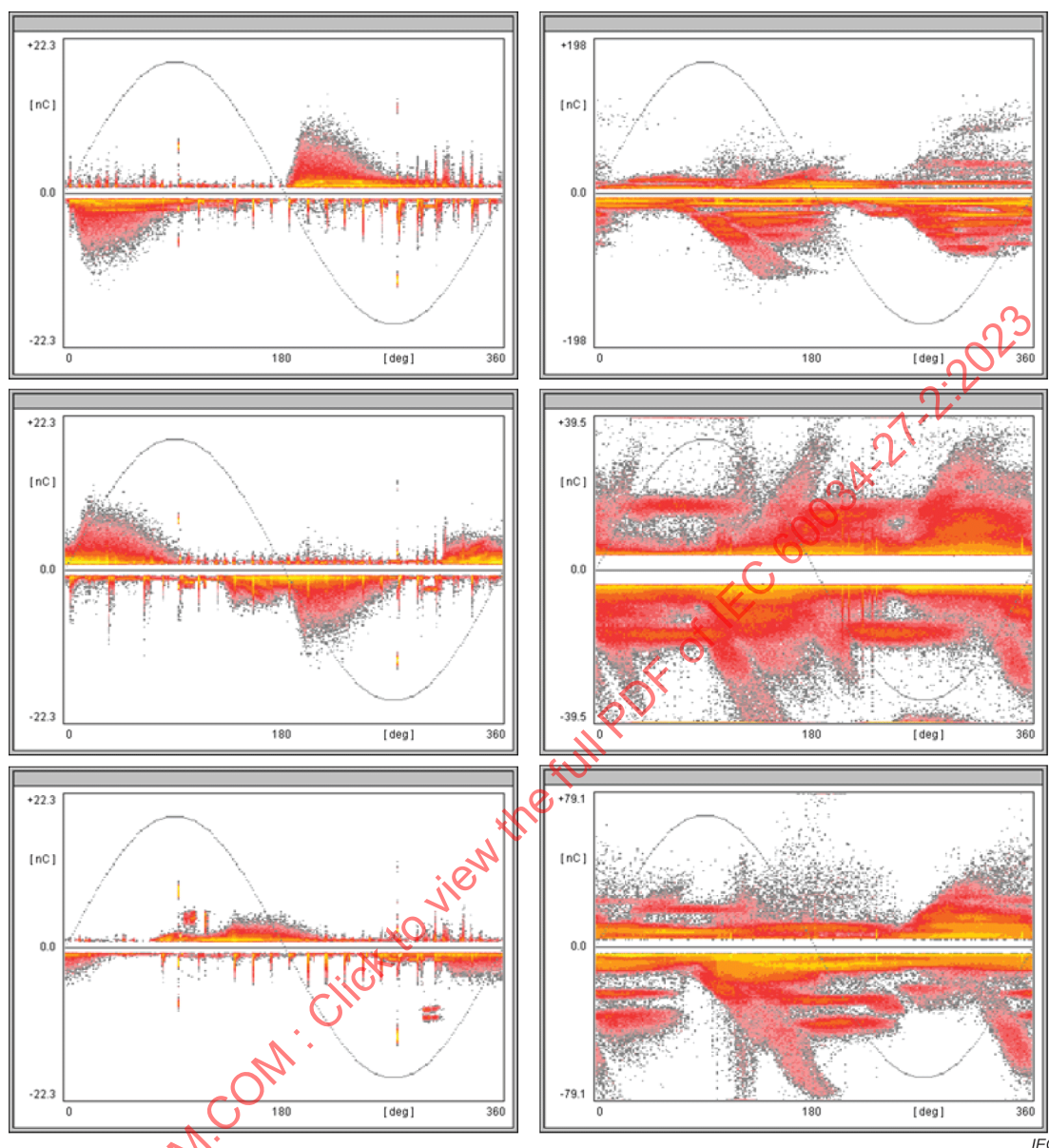


Figure C.19 – Degradation caused by gap type discharges and corresponding PRPD patterns, recorded on-line

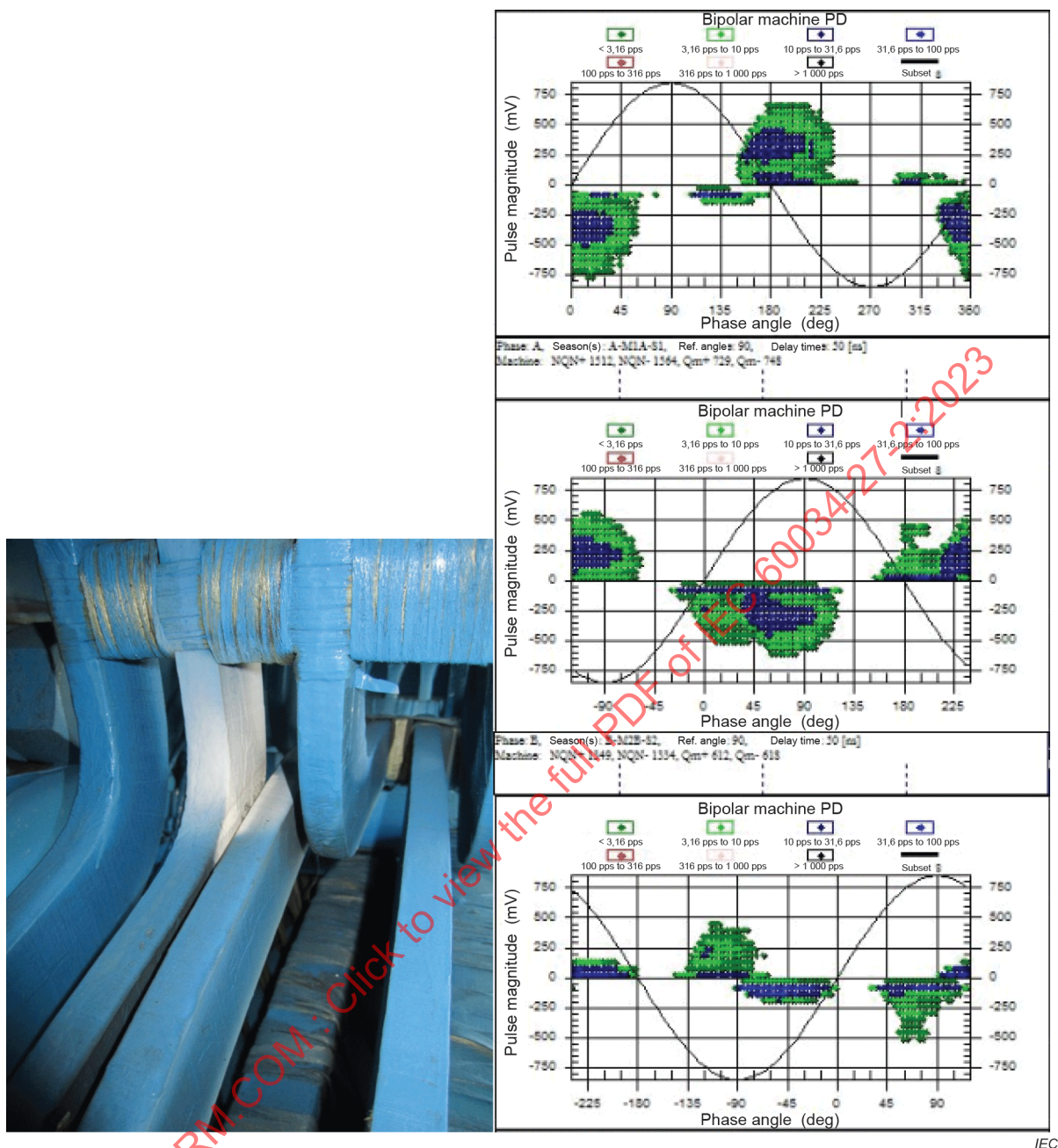
C.5 Other complex examples



IEC

Figure C.20 – PRPD pattern recorded on-line, illustrating multiple PD sources showing the complexity

When possible, visual inspection should be performed to validate PRPD recognition, in order to ensure that the identification resulting from the PRPD pattern is the good one. PRPD recognition can be a useful tool, but the user shall keep in mind that external factors can affect a PRPD pattern. In some cases, superposition of multiple patterns, cross-coupling between phases and noise can be significant, so that identification becomes very difficult. Also, variations in pattern shape, resulting from many external factors, can occur, and the PRPD pattern may vary over the years. See Figure C.20 and Figure C.21.



IEC

Figure C.21 – Three phase PRPD showing phase to phase PD between A and B phases as well as B and C phases; photo showing the as-found PD in the endwinding area due to inadequate separation between the phases

Annex D (normative)

Specifications for conventional PD coupling capacitors

D.1 General

PD sensors used for on-line PD monitoring are usually permanently installed on the machine. It is essential that the PD sensors themselves do not cause the failure of the stator winding.

This annex is relevant to PD sensors composed of a high voltage capacitance directly connected to the terminals in a stator winding that may pose a risk for a phase to earth fault. Capacitive PD sensors may qualify to this standard if they fulfill the requirement of this annex.

D.2 Datasheet information

The supplier shall provide the following information about the PD coupling capacitors:

- Capacitance of high voltage capacitor *.
- Maximum permanent operating voltage at power frequency *.
- Dimensions (height and diameter) *.
- Mass.
- Mounting restrictions (if any) *.
- Operating temperature *.
- Type of connector output *.
- Frequency range. The output impedance used to determine the frequency range shall be indicated in the datasheet, for example up to 20 MHz at 50 Ω input impedance of the acquisition unit. Both low frequency and high frequency range shall be indicated.

*: Mandatory.

D.3 Type tests

D.3.1 General

Type tests are performed on one or more typical examples of coupling capacitors after they are first manufactured, or after any significant change (such as change in dielectric materials or dimensions).

D.3.2 Voltage endurance

A voltage endurance test will be performed on at least one design of coupling capacitor to ensure that it will not degrade due to PD activity. The voltage endurance test will be performed at 2,17 times the rated phase to phase voltage of the coupler, and the coupler shall not fail in less than 400 h. The temperature of the voltage endurance test shall be included in the type test report.

D.3.3 Tracking resistance

Since capacitive PD sensors are connected to the machine high voltage terminals, and may be subject to partly conductive contamination during operation, the insulating materials between the high voltage and low voltage terminals shall be tested for their ability to resist electrical tracking. Material samples of the surface insulation shall have a minimum CTI of 600, as determined by the test procedure in IEC 60112.

D.3.4 Lightning impulse test

A $1,2 \times 50$ ms lightning impulse voltage will be applied to a typical coupling capacitor according to the method in IEC 60060-1. The applied voltage will be the minimum acceptable lightning impulse withstand voltage for switchgear of equivalent phase to phase voltage rating (E) according to IEC 62271-1.

D.3.5 Dissipation factor

The dissipation factor, measured according to IEC 60034-27-3, is performed as a function of coupling capacitor temperature. The test will be performed while the coupling capacitor is in an oven that is gradually raised from room temperature in 10 K steps until the stated maximum operating temperature of the coupling capacitor. The duration at each temperature step is 30 minutes to allow temperature stabilization. The dissipation factor at any temperature will be stable and less than 5×10^{-3} .

D.3.6 Capacitance stability in temperature

The temperature change of the capacitance of the PD coupling capacitor in the range of $+20$ °C to the stated maximum operating temperature shall be less than $+20\%$ / -30% of the capacitance at room temperature.

D.3.7 Thermal cycling

To ensure that different components within the coupling capacitor do not crack due to extremes of temperature, one coupling capacitor shall be subjected to five thermal cycles between the specified minimum and the specified maximum operating temperature of the coupling capacitor. The capacitor will be held at the low and high temperatures for 30 min each cycle. There will be no change in the PDEV and dissipation factor between before and after the five thermal cycles. The thermal cycling test can also be used as a quality control test on a sampling basis, to ensure that all the materials are as specified. The temperature range for the thermal cycling test shall be at least 110 K.

D.3.8 Frequency response

The frequency response of the PD coupling capacitor loaded by its designed quadrupole connected the specified resistive impedance of the PD instrument shall be measured to cover at least the complete frequency range given in the datasheet. Due to the usually high frequency range, the report shall describe the test setup or relevant standard if any.

D.4 Mechanical vibration and shock capabilities

Coupling capacitors shall be tested to withstand peak amplitudes, velocities and acceleration as given in ISO 8528-9 and IEC 60068-2-6. Coupling capacitors shall be tested to ensure shock resistance capabilities as given in IEC 60068-2-27.

D.5 Routine tests

D.5.1 General

Each PD coupling capacitor shall be controlled by the following tests. The first test to start shall be the dielectric withstand test.

D.5.2 Dielectric withstand test at power frequency

Each coupling capacitor shall be tested with 50 Hz or 60 Hz alternating voltage to of twice the rated phase to phase voltage plus 1 kV [i.e., $(2U_N + 1)$ kV] for 1 min. For example, a capacitor rated 15 kV, would receive an alternating voltage hipot test of 31 kV.

D.5.3 Partial discharge extinction voltage test

Each capacitor shall be subjected to a partial discharge extinction voltage test at 20 °C to 30 °C, using the method in IEC 60270. At twice the rated phase to earth RMS voltage, the PD level of the coupling capacitor shall not exceed 5 pC.

D.5.4 Capacitance and dissipation factor

The dissipation factor will be measured at room temperature according to IEC 60034-27-3. The dissipation factor will be stable and less than 5×10^{-3} .

The capacitance at room temperature shall be measured. The tolerance shall be between ± 15 % of the nominal value.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	74
INTRODUCTION.....	76
1 Domaine d'application	78
2 Références normatives	78
3 Termes et définitions	79
4 Cause et effets d'une DP en fonctionnement	81
5 Bruit et perturbations	82
5.1 Généralités	82
5.2 Sources de bruit et de perturbations	82
6 Techniques et appareils de mesure	83
6.1 Généralités	83
6.2 Propagation des impulsions dans les enroulements	84
6.3 Caractéristiques de transfert des signaux	85
6.4 Détecteurs de DP.....	88
6.4.1 Généralités	88
6.4.2 Conception des détecteurs de DP	89
6.4.3 Fiabilité des détecteurs de DP	89
6.5 Appareil de mesure des DP.....	90
6.6 Paramètres de mesure des DP	90
6.6.1 Généralités	90
6.6.2 Amplitude de DP.....	90
6.6.3 Paramètres de DP supplémentaires	91
7 Installation des systèmes de mesure	91
7.1 Généralités	91
7.2 Installation des détecteurs de DP	91
7.3 Point d'accès extérieur et câblage	92
7.4 Installation de l'appareil de mesure des DP	93
7.5 Installation de systèmes d'acquisition des données de fonctionnement	93
8 Normalisation des mesurages	94
8.1 Généralités	94
8.2 Normalisation pour les systèmes basse fréquence	94
8.2.1 Généralités	94
8.2.2 Procédure de normalisation	95
8.3 Normalisation/contrôle de sensibilité pour les systèmes hautes et très hautes fréquences	96
8.3.1 Spécification pour la génération d'impulsions électroniques	96
8.3.2 Configuration de la machine	97
8.3.3 Contrôle de sensibilité	97
9 Procédures de mesure.....	98
9.1 Généralités	98
9.2 Paramètres de fonctionnement de la machine	98
9.3 Mesurage de référence	98
9.3.1 Généralités	98
9.3.2 Procédure d'essai complète	99
9.4 Mesurages périodiques	100
9.5 Mesurages continus	100

10	Visualisation des mesurages	101
10.1	Généralités	101
10.2	Visualisation des paramètres de suivi d'évolution	101
10.3	Visualisation des patrons de DP	102
11	Interprétation des mesurages en fonctionnement	105
11.1	Généralités	105
11.2	Évaluation des paramètres d'évolution de base	105
11.3	Évaluation des patrons de DP	107
11.3.1	Généralités	107
11.3.2	Interprétation des patrons de DP	107
11.4	Effet des facteurs de fonctionnement des machines	108
11.4.1	Généralités	108
11.4.2	Facteurs de fonctionnement de la machine	108
11.4.3	Conditions de charge en régime permanent	108
11.4.4	Conditions de charge transitoires	109
12	Rapport d'essai	110
Annexe A (informative)	Nature des DP dans les machines électriques tournantes	112
A.1	Types de DP dans les machines électriques tournantes	112
A.1.1	Généralités	112
A.1.2	Décharges internes	112
A.1.3	Décharges d'encoche	113
A.1.4	Décharges dans la développante	113
A.1.5	Particules conductrices	113
A.2	Formation d'arcs et étincelles	114
A.2.1	Généralités	114
A.2.2	Formation d'arcs au niveau des conducteurs rompus	114
A.2.3	Étincelles dues aux vibrations (électroérosion)	114
Annexe B (informative)	Élimination des perturbations et séparation des signaux	115
B.1	Généralités	115
B.2	Séparation dans le domaine fréquentiel	115
B.3	Séparation dans le domaine temporel	115
B.4	Combinaison des séparations dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel	117
B.5	Mesurage synchrone multicanal	117
B.6	Blocage des signaux	118
B.7	Identification des patrons	119
Annexe C (informative)	Exemples de patrons de DP	121
C.1	Généralités	121
C.2	Aspect principal des patrons de DP	121
C.3	Exemples de patrons de DP types enregistrés en laboratoire	124
C.3.1	Généralités	124
C.3.2	Décharges internes	124
C.3.3	Décharges partielles d'encoche	126
C.3.4	Décharges dans la développante	127
C.4	Exemples de patrons de DP types enregistrés en fonctionnement	130
C.4.1	Généralités	130
C.4.2	Décharges internes	130
C.4.3	Décharges partielles d'encoche	132

C.4.4	Décharges dans la développante	134
C.5	Autres exemples complexes	136
Annexe D (normative)	Spécifications pour des condensateurs de couplage classiques de DP	138
D.1	Généralités	138
D.2	Informations de fiche technique	138
D.3	Essais de type	138
D.3.1	Généralités	138
D.3.2	Endurance à la tension	138
D.3.3	Résistance au cheminement	139
D.3.4	Essai de choc de foudre	139
D.3.5	Facteur de dissipation	139
D.3.6	Stabilité de la capacité en température	139
D.3.7	Cyclage thermique	139
D.3.8	Réponse en fréquence	139
D.4	Capacités de résistance aux vibrations mécaniques et aux chocs	139
D.5	Essais individuels de série	140
D.5.1	Généralités	140
D.5.2	Essai de tenue diélectrique à la fréquence de tension	140
D.5.3	Essai de tension d'extinction des décharges partielles	140
D.5.4	Capacité et facteur de dissipation	140
Figure 1	– Aperçu générique du système de mesure des DP et de ses sous-systèmes	84
Figure 2	– Cascade de canaux de réponse en fréquence	85
Figure 3	– Réponse en fréquence théorique d'une impulsion de DP au niveau de la source de DP et aux bornes de la machine; réponse en fréquence de différents systèmes de mesure de DP: a) plage de basses fréquences, b) plage de hautes fréquences, c) plage de très hautes fréquences	86
Figure 4	– Objet de mesure dans un processus de normalisation, état du point neutre identique à un point neutre en fonctionnement	95
Figure 5	– Dispositif pour le contrôle de sensibilité	96
Figure 6	– Procédure d'essai recommandée dans des conditions de charge et de température consécutives	99
Figure 7	– Exemple d'évolution de l'activité de DP de crête en trois phases sur un intervalle de 18 ans par des mesurages périodiques	102
Figure 8	– Exemples de patrons de DP	103
Figure 9	– Diagrammes de patrons de DP entre phases dans lesquels la DP est due à un espacement insuffisant entre les développantes des phases B et C	104
Figure B.1	– Exemple de séparation dans le domaine temporel par le temps d'arrivée des impulsions	116
Figure B.2	– Séparation combinée des perturbations dans le domaine temporel et fréquentiel (représentation de la fréquence temporelle)	117
Figure B.3	– Diagramme en étoile triphasé d'un mesurage multicanal	118
Figure C.1	– DP pilotées par la phase et la terre - DP principalement centrées sur 45° et 225° après le passage par zéro de la tension phase-terre	122
Figure C.2	– Événements de DP et autres sources, par exemple, sources autres que sources de DP, non centrées sur 45° et 225° après le passage par zéro de la tension phase-terre	123
Figure C.3	– Exemple de patron de DP de décharges de vacuoles, enregistré lors d'une simulation en laboratoire	125

Figure C.4 – Exemple de patron de DP de délamination, enregistré lors d'une simulation en laboratoire	125
Figure C.5 – Exemple de patron de DP de délamination entre conducteur et isolation, enregistré lors d'une simulation en laboratoire	126
Figure C.6 – Activité de décharges partielles d'encoche et patron de DP correspondant, enregistré lors d'une simulation en laboratoire	127
Figure C.7 – Activité de décharge par effet couronne au niveau du revêtement de protection anti-effluves et du revêtement de répartition de contrainte, et patron de DP correspondant, enregistré lors d'une simulation en laboratoire	127
Figure C.8 – Activité de cheminement de surface le long de l'extrémité de bobine et de patron de DP correspondant, enregistré lors d'une simulation en laboratoire	128
Figure C.9 – Décharges superficielles à la jonction entre le revêtement de protection anti-effluves et le revêtement d'encoches conducteur. a) Bande d'isolation simulant une mauvaise connexion électrique entre le revêtement d'encoches conducteur et le revêtement de protection anti-effluves, et patron de DP correspondant: b) et c) interruption complète de la connexion	129
Figure C.10 – Activités de décharges de type amorçage et patrons de DP correspondants, enregistrés lors de simulations en laboratoire	130
Figure C.11 – Exemple de patron de DP de décharges de vacuoles, enregistré en fonctionnement	131
Figure C.12 – Exemple de patron de DP de délamination interne, enregistré en fonctionnement	131
Figure C.13 – Exemple de patron de DP de délamination entre conducteur et isolation, enregistré en fonctionnement	132
Figure C.14 - Patron de DP de phase 2 enregistré en fonctionnement en avril 2012 sans aucun filtrage indiquant la DP d'encoche	133
Figure C.15 – Image d'une barre retirée pour expertise, choisie comme étant celle dont le niveau est le plus élevé sur la phase 2 et proche du côté réseau lors du balayage des encoches à l'aide de la sonde TVA en janvier 2014	133
Figure C.16 – Patron de DP enregistré en fonctionnement sur la phase 2 en septembre 2016 (l'échelle maximale est de 1 V)	133
Figure C.17 – Diagramme de patron de DP et photographie d'une barre de stator dans la même phase d'un grand turbogénérateur refroidi par air, qui présentent des signes de détérioration du revêtement d'encoches conducteur, ainsi que la détérioration de l'interface entre le revêtement d'encoches conducteur et le revêtement de protection anti-effluves	134
Figure C.18 – Activité de cheminement de surface le long de l'extrémité de bobine et patron de DP correspondant, enregistré en fonctionnement	135
Figure C.19 – Dégradation provoquée par des décharges de type amorçage et patrons de DP correspondants, enregistrés en fonctionnement	135
Figure C.20 – Patron de DP enregistré en fonctionnement, qui représente plusieurs sources de DP représentatives de la complexité	136
Figure C.21 – Patron de DP triphasée qui représente une DP entre phases (phases A et B, ainsi que phases B et C); photographie de représentation de la DP en l'état dans la zone de la développante, en raison d'une séparation inappropriée entre les phases	137
Tableau 1 – Stabilité des conditions de fonctionnement afin d'obtenir des évolutions valables des DP	100

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27-2: Mesurages en fonctionnement des décharges partielles effectués sur le système d'isolation

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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. À 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 du présent document de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété. À la date de publication du présent document, l'IEC n'a reçu aucune déclaration relative à des droits de brevets, qui pourraient être exigés pour la mise en œuvre du présent document. Toutefois, il est rappelé aux responsables de cette mise en œuvre qu'il ne s'agit peut-être pas des informations les plus récentes, qui peuvent être obtenues dans la base de données disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 60034-27-2 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

Projet	Rapport de vote
2/2153/FDIS	2/2166/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les directives ISO/IEC, Partie 1 et les directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60034, publiées sous le titre général *Machines électriques tournantes*, se trouve 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 webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À 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 mesurage en fonctionnement des décharges partielles (DP) des machines électriques tournantes est largement accepté, car il peut révéler la présence de points faibles localisés du système d'isolation du stator ainsi que différents phénomènes d'arc et d'étincelle. Néanmoins, plusieurs études ont démontré que non seulement de nombreuses méthodes de mesure différentes existent, mais également que les critères et méthodes d'analyse et d'évaluation finale des données mesurées sont souvent très différents et non véritablement comparables. Par conséquent, il est nécessaire de disposer d'une Norme internationale (IS - International Standard) fournissant des lignes directrices définies aux utilisateurs des mesurages des DP en fonctionnement pour évaluer l'état de leurs systèmes d'isolation.

Les mesurages en fonctionnement des DP sont enregistrés avec la machine électrique tournante soumise à toutes les contraintes de service (thermiques, électriques, environnementales et mécaniques). En raison de l'impact réaliste des contraintes sur l'enroulement pendant le mesurage et du fait que ledit mesurage est effectué pendant tous les types de fonctionnements normaux, comme la charge de base et la charge de pointe, les essais en fonctionnement de DP peuvent identifier les modifications du système d'isolation de l'enroulement à un stade précoce et permettent une évaluation de l'état en temps réel dans le cadre de stratégies de maintenance prédictive.

Une évaluation de l'évolution des DP et des comparaisons avec des machines de conception similaire et avec un système d'isolation analogue mesurés dans des conditions similaires, au moyen du même appareillage de mesure, sont recommandées afin d'assurer une évaluation fiable de l'état du système d'isolation des enroulements statoriques. Les informations de suivi d'évolution fournissent une bonne mesure pour l'indication précoce d'une variation de l'état du système d'isolation. Cette disposition permet de planifier un examen complémentaire à l'arrêt en matière d'inspection visuelle et d'essais à l'arrêt lors de la prochaine interruption pour inspection.

Le présent document ne traite pas des mesurages en fonctionnement des DP sur des machines électriques entraînées par convertisseur étant donné que différentes techniques de mesure sont nécessaires pour différencier le bruit émis par le convertisseur des DP de l'enroulement.

Limitations: les essais en fonctionnement des DP sur les enroulements statoriques produisent des mesures comparatives et non absolues. Ce phénomène crée une limite fondamentale pour l'interprétation des données de DP. Par conséquent, des critères d'acceptation associés à des limites simples pour de nouveaux enroulements statoriques ou des enroulements statoriques rebobinés ne peuvent être établis comme le démontrent les raisons suivantes:

- il existe de nombreux types de détecteurs de DP ainsi que d'instruments d'enregistrement et d'analyse. Généralement, ils sont incompatibles et produisent des résultats différents pour la même activité de DP;
- même avec un système de mesure identique, les impulsions de décharge partielle à haute fréquence interagissent avec la capacité et l'inductance de l'enroulement sur leur trajet entre le point d'origine et le point de mesure, par exemple aux bornes de l'enroulement. Ainsi, les mesurages des DP effectués sur des machines dont la conception et le calibre des enroulements sont différents produisent des résultats de DP différents, même si le type réel de source de DP est le même;
- les différents types de défauts d'enroulement produisent des amplitudes de DP différentes et ont un impact différent sur la destruction de l'isolation. Il n'existe pas de forte corrélation entre une DP élevée et un risque élevé de défaut d'isolement;
- l'activité de DP peut se produire à proximité ou à distance du détecteur de DP. En général, lorsque la source de DP se trouve à l'intérieur des bobines d'enroulement, à grande distance du détecteur de DP, elle produit une réponse plus faible au dit détecteur au niveau des bornes par rapport à une source de DP aux connexions de phase à proximité en raison de l'affaiblissement des impulsions.

Il convient que les utilisateurs sachent également que rien ne démontre que la durée de fonctionnement avant défaillance de l'isolation de l'enroulement statorique puisse être estimée à l'aide de toute grandeur de DP, seule ou même combinée. Afin de décrire de manière plus complète l'état de l'isolation statorique, les mesurages des DP doivent être complétés par d'autres essais électriques. De même, la détermination de la cause profonde d'un processus de détérioration de l'isolation à l'aide de l'identification des patrons de DP, en particulier si plusieurs processus se produisent, est encore quelque peu subjective, bien que la technologie d'analyse numérique évolue rapidement.

Le bruit et les perturbations qui proviennent de l'environnement électrique ont une incidence significative sur les mesurages en fonctionnement des DP. Le couplage croisé des DP et du bruit entre différentes phases peut rendre difficile une interprétation objective des résultats d'essai. Par conséquent, différentes techniques analogiques et numériques de suppression du bruit sont utilisées pour améliorer la sensibilité de mesure des DP et les outils d'analyse de ces dernières.

Il convient que les utilisateurs des mesurages des DP sachent que, du fait des principes méthodologiques, la mesure de l'activité de DP en fonctionnement ne permet pas de détecter tous les problèmes liés au système d'isolation des enroulements statoriques, par exemple, les défauts d'isolement qui impliquent des courants de fuite continus dus à des chemins conducteurs entre différents potentiels électriques du système d'isolation ou de fines fissures principales de l'isolation avec une activité de DP trop faible par rapport à une DP de délamination normale ou à des phénomènes de décharge sans impulsion.

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27-2: Mesurages en fonctionnement des décharges partielles effectués sur le système d'isolation

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60034-27 traite des mesurages en fonctionnement des DP et fournit une base commune avec, lorsque c'est possible, des procédures normalisées pour:

- les techniques et les appareils de mesure;
- la mise en place de l'installation;
- l'évaluation de la normalisation et de la sensibilité;
- les procédures de mesure;
- la réduction du bruit;
- la documentation des résultats;
- l'interprétation des résultats;

pour les besoins des mesurages en fonctionnement des décharges partielles sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes non entraînées par convertisseur, avec une tension assignée supérieure ou égale à 3 kV. Le présent document couvre les systèmes de mesure des DP et les méthodes de détection des signaux de DP électriques. Les mêmes appareils et procédures de mesure peuvent également être utilisés pour détecter les phénomènes d'étincelles et d'arc électriques.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60034-27-1:2017, *Machines électriques tournantes – Partie 27-1: Mesurages à l'arrêt des décharges partielles effectués sur le système d'isolation des enroulements*

IEC 60034-27-3, *Machines électriques tournantes – Partie 27-3: Mesure du facteur de dissipation diélectrique sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes*

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

IEC 60068-2-6, *Essais d'environnement – Partie 2-6: Essais – Essais Fc: Vibrations (sinusoïdales)*

IEC 60068-2-27, *Essais d'environnement – Partie 2-27: Essais – Essais Ea et guide: Chocs*

IEC 60112, *Méthode de détermination des indices de résistance et de tenue au cheminement des matériaux isolants solides*

IEC 60270:2000, *Technique des essais à haute tension – Mesure des décharges partielles*

IEC 62271-1, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes pour appareillage à courant alternatif*

IEC TS 62478, *Technique des essais à haute tension – Mesurage des décharges partielles par méthodes électromagnétiques et acoustiques*

ISO 8528-9: *Groupes électrogènes à courant alternatif entraînés par moteurs alternatifs à combustion interne – Partie 9: Mesurage et évaluation des vibrations mécaniques*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de l'IEC 60270 s'appliquent ainsi que les suivants.

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

décharge partielle

DP

décharge électrique localisée qui court-circuite partiellement une partie de l'isolation entre les conducteurs et qui peut ou non se produire à proximité d'un conducteur

3.2

mesurage en fonctionnement

mesurage effectué alors que la machine électrique tournante est en fonctionnement

3.3

mesurage à l'arrêt

mesurage effectué alors que la machine électrique tournante est à l'arrêt et non raccordée au réseau

Note 1 à l'article: La tension d'essai nécessaire est appliquée à l'enroulement à partir d'une source de tension distincte.

3.4

revêtement d'encoches conducteur

couche de peinture ou ruban conducteur parfaitement en contact avec la paroi isolante dans la partie couverte par les encoches des bobines, souvent appelé "revêtement semi-conducteur"

Note 1 à l'article: Ce revêtement associé à une conception d'encoche appropriée assure un contact électrique avec le paquet statorique, sans mise en court-circuit des tôles dudit paquet.

3.5

revêtement de protection anti-effluves

peinture ou ruban dont est revêtue la surface de la paroi isolante qui s'étend au-delà du revêtement conducteur de la partie couverte par les encoches des barres et bobines statoriques à haute tension

Note 1 à l'article: Le revêtement de protection anti-effluves réduit les contraintes dues au champ électrique le long de la tête de bobine à un niveau en deçà de la valeur critique qui serait à l'origine de décharges partielles sur la surface. Le revêtement de protection anti-effluves chevauche le revêtement conducteur de la partie couverte par les encoches afin d'assurer un contact électrique entre ces éléments.

3.6**décharge par effet de couronne**

décharge partielle visible adjacente à la surface d'un conducteur nu ou la surface de l'isolation d'un conducteur

3.7**décharges d'encoche**

décharges qui se produisent entre la surface extérieure de la partie couverte par les encoches d'une bobine ou d'une barre et les tôles du paquet statorique à la terre, du fait d'une intensité élevée du champ électrique

3.8**décharges électroérosion**

courants de surface interrompus entre la surface extérieure de la partie couverte par les encoches d'une barre et les tôles du paquet statorique à la terre, du fait de tensions induites axialement sur le revêtement d'encoches conducteur combinées à des vibrations de la barre

3.9**décharges internes**

décharges qui se produisent à l'intérieur de l'isolation principale

3.10**décharges superficielles**

décharges qui se produisent à la surface du système d'isolation ou des composants de l'enroulement au niveau de la tête de bobine ou de la partie active de l'enroulement de la machine

3.11**distribution d'amplitude des impulsions**

nombre d'impulsions dans une série de fenêtres équidistantes d'amplitudes d'impulsions pendant un temps de mesure prédéfini

3.12**distribution de phase des impulsions**

nombre d'impulsions dans une série de fenêtres équidistantes de phase pendant un temps de mesure prédéfini

3.13**patron de DP**

représentation de la distribution des DP par rapport à leur amplitude et au nombre de leurs impulsions en fonction de leur phase sur le cycle alternatif pour visualiser le comportement de DP pendant un temps de mesure prédéfini

3.14**détecteur de DP**

type général de transducteur, qui peut être utilisé pour détecter les signaux de DP transmis par l'enroulement de la machine

Note 1 à l'article: Un détecteur de DP comprend généralement un condensateur de couplage à haute tension, de conception à faible inductance, et un dispositif de couplage à basse tension montés en série.

3.15**dispositif de couplage**

généralement, réseau quadripôle, actif ou passif, qui convertit les courants d'entrée en signaux de tensions de sortie

Note 1 à l'article: Ces signaux parviennent à l'appareil de mesure par l'intermédiaire d'un circuit de transmission. La réponse en fréquence du dispositif de couplage est généralement choisie de manière à éviter, au moins et de façon efficace, que la fréquence de tension d'essai et ses harmoniques ne parviennent à l'appareil de mesure.

3.16

détecteur de température à résistance

RTD

sonde de température insérée dans l'enroulement statorique, généralement entre les barres supérieure et inférieure ou côté bobine dans une encoche donnée

Note 1 à l'article: L'abréviation "RTD" est dérivée du terme anglais développé correspondant "resistance temperature detector".

3.17

Amplitude de DP

Q

amplitude associée à une impulsion de DP enregistrée par un système de mesure

Note 1 à l'article: Dans le présent document, le symbole Q sert de paramètre fictif pour les deux définitions de charge, Q_m et Q_{IEC} comme cela est indiqué dans l'IEC 60034-27-1. Cette amplitude est généralement déduite d'un flux d'impulsions individuelles de DP.

4 Cause et effets d'une DP en fonctionnement

Généralement, les décharges partielles (DP) peuvent se produire à des emplacements auxquels les propriétés diélectriques des matériaux isolants sont hétérogènes. À de tels emplacements, l'intensité du champ électrique local peut être amplifiée. Les amplifications électriques locales peuvent conduire à un claquage partiel local. Ce claquage ne traverse que partiellement le matériau isolant. Généralement, l'établissement d'une DP exige un volume de gaz ou de vides, par exemple, des cavités noyées dans le système d'isolation à proximité des conducteurs ou aux interfaces du système d'isolation.

Une décharge partielle peut se produire lorsque l'intensité du champ électrique local dépasse la rigidité diélectrique du matériau. Ce processus peut se traduire par de nombreuses impulsions de DP au cours d'un cycle de la tension appliquée.

La quantité de charges transmises dans la décharge dépend étroitement des caractéristiques spécifiques de l'hétérogénéité, telles que les dimensions, la tension de claquage réelle et les propriétés diélectriques spécifiques des matériaux impliqués, par exemple, les caractéristiques de surface, le type de gaz, la pression du gaz, etc.

Les systèmes d'isolation des enroulements statoriques pour les machines à haute tension présentent toujours une certaine activité de DP, mais sont intrinsèquement résistants aux décharges partielles en raison de leurs composants inorganiques en mica. Cependant, l'importance d'une DP dans ces machines est généralement plus un signe révélateur de la présence d'anomalies dans le système d'isolation, telles que des problèmes de fabrication ou une détérioration due au fonctionnement, qu'une cause directe de défaillance. Néanmoins, selon les processus individuels, une DP dans les machines peut également attaquer directement le système d'isolation, et influencer ainsi sur le processus de vieillissement. La durée de fonctionnement avant défaillance ou la probabilité de défaillance peut ne pas toujours être en corrélation avec les niveaux de DP, mais dépend significativement d'autres facteurs, par exemple la température de fonctionnement, les conditions de calage, les vibrations de la barre, le degré de contamination, etc.

Le mesurage et l'analyse du comportement spécifique des DP peuvent être utilisés de manière efficace pour le contrôle de la qualité de nouveaux enroulements et de leurs composants, et pour la détection précoce des anomalies dans le système d'isolation, imputables à des conditions ambiantes, à des facteurs thermiques et électriques et à des mécanismes de vieillissement en service susceptibles de conduire à un défaut d'isolement.

Les principales différences entre les mesurages en fonctionnement et les mesurages à l'arrêt sont dues à une répartition différente de la tension le long de l'enroulement et à différents effets thermiques et mécaniques liés au fonctionnement, comme les vibrations, les arcs de contact ou les gradients de température entre le cuivre du stator et le noyau de fer du stator. En outre, en particulier pour les machines refroidies à l'hydrogène, le gaz et la pression du gaz peuvent être différents pour les mesurages à l'arrêt et en fonctionnement des DP.

De plus amples informations sur la nature des DP sont données à l'Annexe A.

5 Bruit et perturbations

5.1 Généralités

Un enjeu important du mesurage en fonctionnement des DP consiste à séparer la DP de l'enroulement statorique du bruit ou des perturbations électriques, ainsi qu'à regrouper le signal en fonction de sources de DP spécifiques. Contrairement aux essais à l'arrêt correctement configurés des DP, dans la plupart des essais en fonctionnement, des impulsions de perturbation électrique sont souvent présentes. Ces impulsions de perturbation peuvent être plus fréquentes et d'une plus grande amplitude que les impulsions de DP de l'enroulement statorique, et les signaux peuvent également être verrouillés en phase à la fréquence de la tension alternative. Lorsque les perturbations ne sont pas correctement supprimées, lorsque le technicien d'essai n'est pas en mesure d'identifier correctement ce qui est une perturbation et ce qui est une DP du stator, il y a un grand risque que la perturbation soit classée comme DP du stator. Par conséquent, le stator peut être identifié comme présentant de graves problèmes d'isolation, alors qu'en fait l'isolation peut être en bon état. Dans le cas où de trop nombreux "faux positifs" se produisent, la confiance dans l'essai est perdue, et les prochains essais peuvent ne pas être réalisés de manière régulière, perdant ainsi l'avantage des essais en fonctionnement des DP.

5.2 Sources de bruit et de perturbations

Conformément à l'IEC 60034-27-1, le bruit est défini comme étant des signaux d'enroulement non statorique qui ne sont manifestement pas des impulsions. Le bruit peut être dû à des dispositifs électroniques au sein du système de détection des DP lui-même, par exemple le bruit thermique des dispositifs semi-conducteurs. Le bruit peut également provenir de stations de radiodiffusion, d'émetteurs radio, de téléphones mobiles, de signaux porteurs de lignes électriques, etc. Ce bruit est facilement séparé des signaux en forme d'impulsion, soit visuellement sur un écran oscillographique, soit à l'aide de filtres. Ainsi, il n'est pas étudié de manière plus approfondie dans le présent document.

Les perturbations sont des impulsions électriques de durée relativement courte qui peuvent avoir de nombreuses caractéristiques des impulsions de DP de l'enroulement statorique - mais qui en fait ne sont pas des DP de l'enroulement statorique. Les perturbations peuvent être différenciées en deux groupes: Dans la plage des basses fréquences, elles se propagent de préférence sous forme de signaux électriques par l'intermédiaire de conducteurs métalliques et, dans la plage des très hautes fréquences, elles se diffusent principalement sans fil sous forme d'ondes électromagnétiques. Certaines de ces perturbations sont synchronisées avec le cycle alternatif, et d'autres non. Parfois, les impulsions de perturbation synchronisées peuvent être supprimées en fonction de leur position par rapport à l'angle de phase du courant alternatif.

Exemples de perturbations synchronisées:

- a) décharges partielles provoquées, par exemple par des précipitateurs électrostatiques ou des décharges d'isolateur de traversée;
- b) fonctionnement d'un outil électrique tel que le soudage à l'arc et l'étincelage du collecteur (peut également être non synchronisé);
- c) transitoires causés par l'électronique de puissance, par exemple les moteurs alimentés par un convertisseur ou les systèmes d'excitation. Cette perturbation peut également ne pas être synchronisée avec le cycle alternatif;

- d) mauvaises connexions électriques (qui entraînent des étincelles de contact) sur le bus ou le câble qui relie la machine électrique tournante au réseau électrique;
- e) mauvaises connexions électriques en tout autre point de l'installation qui entraînent des étincelles de contact;
- f) DP dans d'autres appareils connectés aux bornes du moteur ou du générateur, par exemple le bus de sortie, le câble d'alimentation, l'appareillage de commutation et/ou les transformateurs;
- g) sources d'arc ou d'étincelles au sein du moteur ou du générateur, par exemple des étincelles des tôles du paquet statorique.

Exemples de perturbations non synchronisées:

- h) fonctionnement d'un outil électrique (soudage à l'arc et étincelage du collecteur);
- i) transitoires provoqués par l'électronique de puissance, par exemple, les moteurs alimentés par un convertisseur ou les systèmes d'excitation statique;
- j) étincelles de bague collectrice sur le rotor de la machine;
- k) étincelles dans le rail d'alimentation d'un pont roulant.

Toutes ces perturbations créent des impulsions électriques que les personnes non averties peuvent confondre avec les DP des enroulements statoriques. Avec les perturbations d), e), f) et g), l'opérateur souhaite normalement savoir si une telle activité se produit, car elle peut indiquer d'autres problèmes (au-delà des problèmes d'isolation du stator) qui peuvent entraîner une défaillance de l'équipement. Ainsi, certains utilisateurs peuvent ne pas classer ces exemples comme une perturbation, mais plutôt comme des signaux à identifier.

Pour réduire le risque de fausses indications sur l'état de l'isolation de l'enroulement statorique, de nombreuses méthodes ont été développées pour aider les utilisateurs à séparer manuellement et/ou automatiquement les DP de l'enroulement statorique des perturbations. De nombreuses méthodes disponibles dans le commerce utilisent une ou plusieurs des méthodes identifiées à l'Annexe B.

6 Techniques et appareils de mesure

6.1 Généralités

Le mécanisme de la physique des gaz d'une décharge partielle génère un mouvement de charge transitoire qui peut être mesuré sous forme d'une impulsion électrique qui circule comme un courant transitoire à l'intérieur d'un circuit de décharge conducteur (voir la Figure 1). En outre, comme chaque décharge partielle est associée à un processus de conversion d'énergie, le mesurage d'une DP peut également être effectué par la réception de l'émission de lumière, de signaux acoustiques, d'ondes électromagnétiques ou la formation de réactions chimiques. Toutefois, le présent article traite seulement des méthodes électriques de mesure des décharges partielles, car le mesurage électrique des décharges partielles constitue la méthode la plus communément utilisée pour l'évaluation de l'état du système d'isolation des enroulements des machines électriques tournantes. Le mesurage électrique peut être effectué à l'aide de détecteurs de DP qui identifient les composantes du signal d'impulsion conduite, ou à l'aide d'antennes qui détectent les composantes rayonnées électromagnétiquement des signaux d'impulsion.

Les systèmes de mesure des décharges partielles peuvent être divisés en sous-systèmes: Le détecteur de DP (dont le système de transmission des signaux) et l'appareil de mesure des DP, qui influencent tous deux de manière significative les résultats de mesure des DP. Le choix des détecteurs, de l'instrumentation et de la technique de mesure est déterminé par les paramètres de mesure attendus, qui seront utilisés pour l'analyse et l'interprétation ultérieures des mesurages.

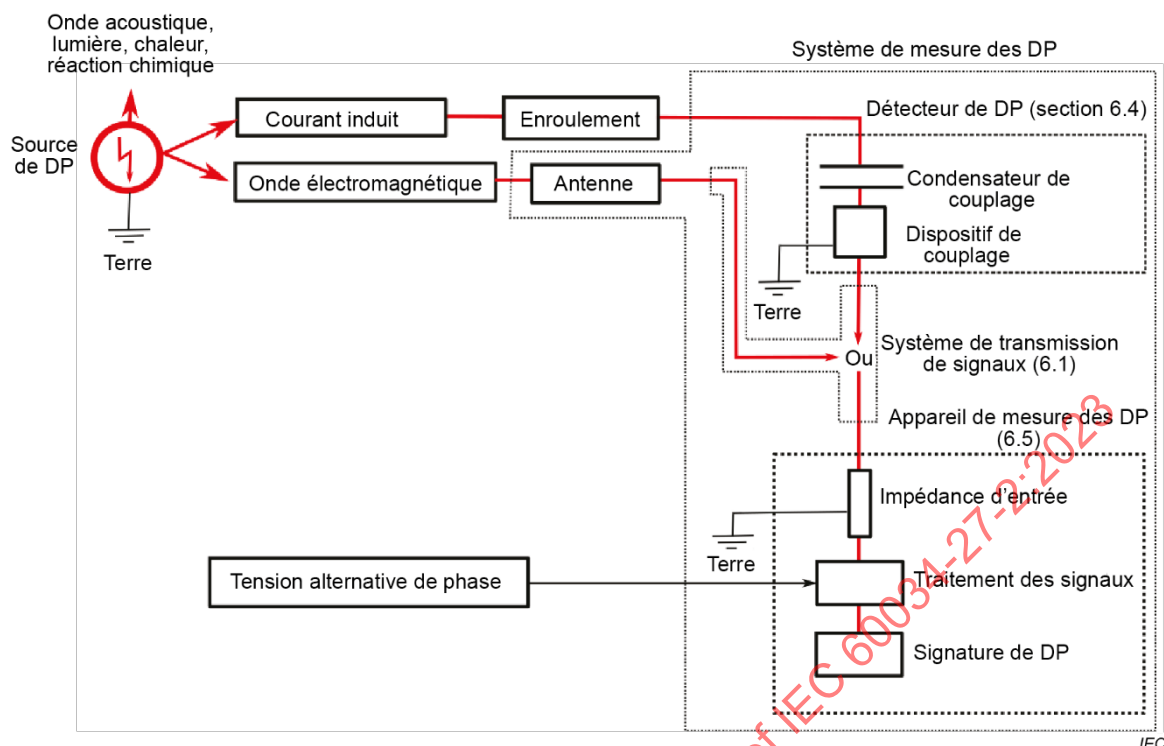


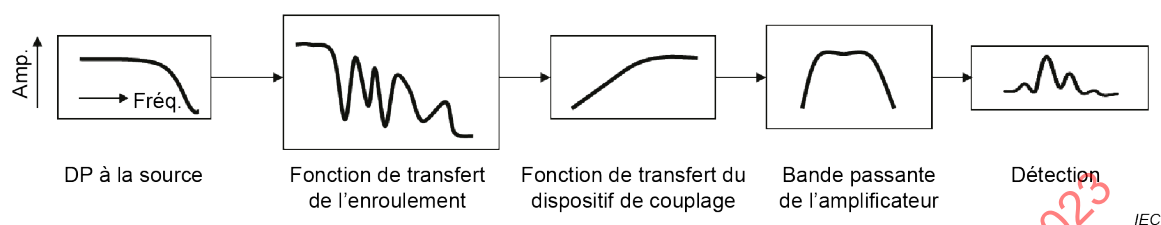
Figure 1 – Aperçu générique du système de mesure des DP et de ses sous-systèmes

6.2 Propagation des impulsions dans les enroulements

À l'origine, un courant de décharges partielles peut être caractérisé par une impulsion transitoire d'un temps de montée qui peut atteindre quelques nanosecondes. Pour ces impulsions de DP de courte durée qui se situent dans le domaine spectral des hautes fréquences, les enroulements statoriques représentent des objets dont la répartition des éléments favorise l'apparition des phénomènes d'ondes progressives, de couplages capacitifs et inductifs complexes et de résonance (Figure 2). Par conséquent, il est nécessaire de prendre en considération les phénomènes de propagation des impulsions de décharges partielles. En raison de l'affaiblissement, de la distorsion, de la réflexion et du couplage croisé des signaux d'ondes progressives, la forme et l'amplitude du signal de décharge partielle enregistré à l'emplacement du détecteur de DP installé, diffèrent de celles observées au point d'origine. Compte tenu de ce qui précède, les points suivants sont très importants pour le mesurage et l'interprétation ultérieure des mesurages de DP effectués sur les machines électriques tournantes:

- la fonction de transfert entre la source et le détecteur de DP est inconnue et dépend de la conception spécifique de la machine, ainsi que de l'emplacement de la source de DP, qui déterminent la réponse en fréquence de l'enroulement statorique. Par conséquent, l'énergie à la source des DP ne peut faire l'objet d'un mesurage direct;
- les composantes très haute fréquence des signaux de DP subissent un affaiblissement lors de leur propagation à travers l'enroulement et, en fonction de l'origine de la DP, peuvent ne pas être détectables à l'emplacement du détecteur de DP.

Par conséquent, les phénomènes susmentionnés suggèrent que la conception particulière des enroulements statoriques n'est pas la seule à influencer de manière significative les caractéristiques du signal de DP détecté à partir de l'enroulement, mais que la réponse en fréquence spécifique du système de détection des DP, y compris le détecteur de DP, l'appareil de mesure et les réglages du filtre, y contribue également. Différents mesurages doivent être effectués dans la même plage de fréquences pour être comparables entre eux.



IEC

Des courbes théoriques de chaque échelon sont représentées pour illustrer le comportement général.

Figure 2 – Cascade de canaux de réponse en fréquence

6.3 Caractéristiques de transfert des signaux

Le schéma de la Figure 3 représente la réponse en fréquence d'une impulsion de DP théorique à l'origine de la DP à l'intérieur de l'enroulement (fréquence de coupure supérieure f_{uPD0}) et la réponse en fréquence théorique aux bornes de la machine (fréquence de coupure supérieure f_{uPDt}) après un déplacement entre la source de DP et les bornes par l'enroulement. Du fait de l'affaiblissement possible des composantes de très haute fréquence, la fréquence de coupure supérieure du signal de DP qui arrive aux bornes (f_{uPDt}) est sensiblement inférieure à celle (f_{uPD0}) de l'impulsion de DP d'origine. La fréquence de coupure supérieure f_{uPD0} dépend du type de gaz, de la densité du gaz et du type de défaut.

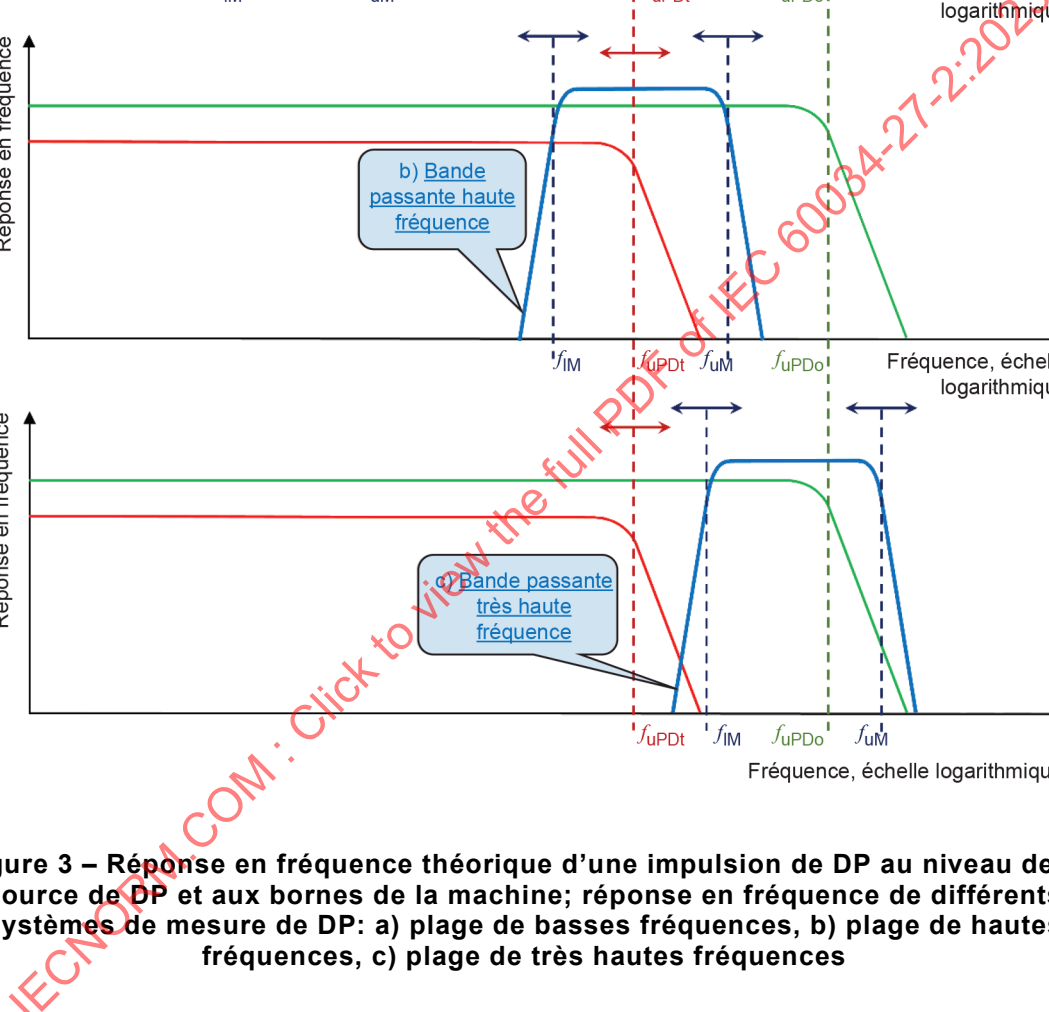


Figure 3 – Réponse en fréquence théorique d’une impulsion de DP au niveau de la source de DP et aux bornes de la machine; réponse en fréquence de différents systèmes de mesure de DP: a) plage de basses fréquences, b) plage de hautes fréquences, c) plage de très hautes fréquences

Le système de mesure des DP, qui comprend le détecteur de DP, les câbles de mesure et l'appareil de mesure, présente des caractéristiques de filtre passe-bande qui comportent des fréquences de coupure inférieures et supérieures spécifiques, qui dépendent principalement de la conception spécifique du détecteur de DP et de l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure. La Figure 3 représente trois exemples a), b) et c) pour différentes réponses en fréquence des systèmes de mesure de DP. Pour les systèmes disponibles dans le commerce, les fréquences de coupure, et donc la bande passante de mesure du système, peuvent varier sur une large plage de fréquences. La réponse en fréquence caractéristique du système de mesure complet a un impact considérable sur la sensibilité globale de la détection et les propriétés du signal utilisé pour une analyse et une interprétation ultérieures.

Il convient de noter que la Figure 3 ne décrit que les relations fondamentales par la présentation de courbes théoriques. Selon la conception de l'enroulement et l'appareil de mesure utilisé, dans des cas pratiques, il peut y avoir plusieurs effets qui influencent la forme exacte des courbes de réponse en fréquence et qui peuvent donc également influencer les résultats de DP, par exemple des phénomènes de résonance dans la plage de fréquences du système de mesure de DP (voir la Figure 2).

Comme cela est indiqué dans l'IEC TS 62478, les mesurages en fonctionnement des DP sur les machines électriques tournantes utilisent les plages de fréquences types suivantes pour le système complet de mesure des DP:

- a) dans la plage de basses fréquences (LF - low frequency), une bande passante type de 1 MHz environ, ou de quelques centaines de kHz, est utilisée, avec des fréquences de coupure inférieures généralement de plus de 100 kHz et des fréquences de coupure supérieures généralement de moins de 3 MHz. Le mesurage dans cette plage de fréquences assure une bonne sensibilité non seulement aux décharges partielles dans les barres/bobines situées à proximité du détecteur de DP, mais également à celles dont la source est plus éloignée dans l'enroulement. Comme la plage de basses fréquences est soumise au bruit et aux perturbations à un degré plus élevé, notamment lors des mesurages en fonctionnement (voir l'Article B.2), des procédures spéciales de séparation du bruit et des perturbations sont nécessaires.

Un système de mesure à large bande qui utilisant toute la bande passante des basses fréquences jusqu'à la plage des MHz peut résumer la majeure partie de la teneur en énergie disponible des DP pour une analyse ultérieure des signaux et des procédures de discrimination du bruit, indépendamment des résonances locales inévitables du spectre de transfert des impulsions. Comme la fréquence de coupure supérieure de la bande passante de détection est nettement inférieure à la fréquence de coupure supérieure de la réponse en fréquence de l'impulsion, les impulsions de DP détectées sont directement proportionnelles aux composantes basse fréquence de l'impulsion de DP. Cependant, la forme d'impulsion du signal de sortie de bande passante est déterminée par les caractéristiques de bande passante à basse fréquence. Étant donné que la forme originale de l'impulsion de DP arrivant à l'emplacement du détecteur est perdue lors de l'utilisation de systèmes à bande passante à basse fréquence, une séparation des signaux perturbateurs par l'analyse de la forme de l'impulsion ou la séparation dans le domaine temporel est limitée;

- b) dans la plage de hautes fréquences (HF - high frequency), une bande passante type comprise entre 3 MHz et 30 MHz est utilisée. Les fréquences de coupure inférieures peuvent également être réglées bien en dessous de 1 MHz afin d'assurer une bonne sensibilité pour les DP dans tout l'enroulement. Cependant, des fréquences de coupure inférieures de plus de 1 MHz sont souvent utilisées pour supprimer efficacement les signaux perturbateurs types présents dans la plage de basses fréquences.

La détection des DP dans la plage de hautes fréquences est moins sensible au bruit et aux perturbations et peut être utilisée efficacement pour caractériser les impulsions de DP qui arrivent au détecteur de DP par leur forme d'impulsion individuelle, ce qui permet de distinguer différentes sources de DP en fonction de la forme de leur signal. Dans le cas où la fréquence de coupure supérieure du système de détection est bien supérieure à la fréquence de coupure supérieure du signal de DP qui arrive à l'emplacement du détecteur de DP, le signal de sortie de bande passante affiche la forme de l'impulsion de DP, mais n'est plus directement proportionnel à la charge apparente de l'impulsion de DP. Ainsi, les résultats de DP dans la plage de hautes fréquences sont généralement exprimés en matière de tension (mV). Des méthodes efficaces de séparation des perturbations dans les domaines temporel et fréquentiel peuvent être appliquées selon l'Article B.5. Les mesurages du temps de vol effectués avec des impulsions individuelles peuvent être utilisés pour localiser la source de DP ou la source de perturbation à l'intérieur ou à l'extérieur de la machine, tant que les deux détecteurs sont distants de plus de 10 m, avec par hypothèse une bande passante totale de 30 MHz;

NOTE 1 Un des détecteurs pour les mesurages du temps de vol peut être situé sur le bus de sortie.

- c) dans la plage de très hautes fréquences (VHF - very high frequency), une bande passante de quelques centaines de MHz, est utilisée avec des fréquences de coupure inférieures généralement de 30 MHz et des fréquences de coupure supérieures jusqu'à la plage de 300 MHz. Comme cela est représenté à la Figure 3 c), la réponse en fréquence de ces systèmes présente un chevauchement prononcé avec la réponse en fréquence de l'impulsion de DP d'origine et, par conséquent, les mesures effectuées dans la plage de très hautes fréquences assurent une bonne sensibilité aux signaux qui proviennent d'une source plus proche du détecteur de DP. Il convient d'installer le détecteur de DP aux bornes haute tension et donc à proximité des bobines/barres qui subissent la plus forte contrainte électrique dans l'enroulement. La plage de très hautes fréquences offre également un bon rapport signal/bruit et est donc moins sensible au bruit et aux perturbations. Étant donné que la fréquence de coupure supérieure du système de détection est bien supérieure à la fréquence de coupure supérieure du signal de DP qui arrive à l'emplacement du détecteur de DP, le signal mesuré affiche la forme de l'impulsion de DP, mais n'est plus directement proportionnel à la charge apparente de l'impulsion de DP. Ainsi, les résultats de DP dans la plage de très hautes fréquences sont généralement exprimés en matière de tension (mV). Comme l'indique la Figure 3 c), la capacité de détection des DP dans cette plage de fréquences est réduite en raison de la fréquence de coupure supérieure des impulsions de DP qui arrivent à la position du détecteur de DP (f_{uPDt}).

La détection des DP dans la plage de très hautes fréquences assure un temps très court de résolution des impulsions puisque la forme de l'impulsion de courant de DP originale très courte peut être détectée. Par conséquent, des méthodes efficaces de séparation des perturbations dans les domaines temporel et fréquentiel, telles que le temps d'arrivée des impulsions, l'analyse de la forme des impulsions et les représentations TF, peuvent être appliquées selon l'Annexe B. L'analyse de la forme des impulsions et du temps de vol des impulsions individuelles peut être utilisée pour localiser la source de DP à l'intérieur ou à l'extérieur de la machine, tant que les deux détecteurs sont distants de plus de 2 m avec par hypothèse une bande passante totale de 300 MHz;

- d) dans la plage des ultra hautes fréquences (UHF - ultra high frequency), des fréquences de coupure inférieures généralement de 300 MHz et des fréquences de coupure supérieures jusqu'à 3 GHz sont utilisées. Les détecteurs de DP qui fonctionnent dans cette plage de fréquences sont des antennes, qui détectent des signaux d'impulsions rayonnés électromagnétiquement. L'énergie du signal déterminée par ces détecteurs et donc la sensibilité de la détection des DP dépendent principalement de l'emplacement spécifique de l'antenne, de la distance entre l'antenne et la source de DP et de la bande passante du système de détection. En général, plus l'antenne est proche des sources spécifiques de DP, meilleure est la sensibilité de la détection des DP. L'affaiblissement est élevé pour les signaux d'impulsion qui proviennent de sources de DP situées à l'intérieur de l'encoche et donc protégées par le noyau de fer.

NOTE 2 La fréquence de coupure supérieure des DP qui arrivent à l'emplacement du détecteur de DP f_{uPDt} peut varier de manière significative, selon la distance entre le détecteur de DP et la source de DP. Une petite distance peut entraîner une fréquence de coupure plus élevée, et une grande distance peut entraîner une fréquence de coupure inférieure en raison des phénomènes d'affaiblissement.

Par conséquent, dans le cas b) et notamment dans le cas c), le système de mesure présente une bonne sensibilité aux sources de DP plus proches du détecteur, en fonction de la fréquence de coupure inférieure du filtre passe-bande et du chevauchement des réponses en fréquence du filtre passe-bande et du signal de DP à l'emplacement du détecteur.

6.4 Détecteurs de DP

6.4.1 Généralités

En principe, une DP peut être détectée par des signaux d'impulsion conduits ou rayonnés électromagnétiquement. Dans le cas de signaux de DP conduits, une capacité séparée permet de détecter le signal de DP qui arrive à l'emplacement du détecteur de DP installé. Le signal d'impulsion rayonné électromagnétiquement est affaibli en raison de différents effets d'écran, par des composants de la machine tels que le noyau de fer avec encoches, des revêtements conducteurs, etc. Ainsi, l'emplacement de l'antenne, la distance par rapport à la source de DP et la bande passante spécifique du système de détection influencent de manière significative la sensibilité de détection.

6.4.2 Conception des détecteurs de DP

Les détecteurs de DP, qui identifient les signaux d'impulsions conduites, se composent généralement d'une capacité haute tension, souvent appelée condensateur de couplage, et d'un dispositif de couplage basse tension en série.

Les dispositifs suivants peuvent être utilisés comme capacité:

- condensateur de couplage de DP prévu à cet effet;
- condensateur de surtension existant;
- capacité des câbles d'alimentation qui conduisent à la machine.

Afin de former un détecteur de DP, ces capacités peuvent être utilisées avec les dispositifs de couplage suivants, conçus pour une réponse en fréquence appropriée:

- réseaux RLC;
- transformateurs de courant haute fréquence, y compris les transformateurs d'isolement et les bobines de Rogowski.

Les détecteurs de DP, qui identifient les signaux d'impulsion électromagnétiquement rayonnés sont généralement des antennes, qui fournissent une sensibilité caractéristique qui dépend sensiblement de leur lieu d'installation et de leur fonction spécifique de réponse en fréquence.

Les dispositifs suivants peuvent être utilisés comme détecteurs de DP:

- des antennes spécialement conçues pour les mesurages de DP, tels que les coupleurs à encoches de stators;
- des câbles de RTD à encoches déjà installés dans l'enroulement statorique;
- des antennes à plaques ou des antennes microruban installées en des emplacements spécifiques de l'enveloppe de la machine.

Les détecteurs de DP qui agissent en qualité d'antennes sont généralement conçus pour fonctionner dans les plages de très hautes et d'ultra hautes fréquences. Il est nécessaire d'installer ces détecteurs le plus près possible de la partie de l'enroulement qui peut être la plus exposée à une activité de DP très importante.

NOTE Dans certains cas, des transformateurs de courant à haute fréquence sont utilisés directement sur les câbles de mise à la terre des connexions neutres des générateurs. Cependant, ces dispositifs de couplage ne fournissent que des informations très limitées sur les signaux de type DP dans la partie de l'enroulement la plus proche de l'extrémité neutre. En outre, la conception doit fournir une isolation haute tension appropriée pour résister à un défaut à la terre.

En cas d'utilisation des condensateurs de surtension existants ou d'une capacité de câble, il faut savoir que le comportement de transfert de ces composants est inconnu et que lesdits composants peuvent ne pas avoir un comportement de transfert approprié dans la plage de fréquences favorable au mesurage des DP.

6.4.3 Fiabilité des détecteurs de DP

Les détecteurs de DP utilisés pour la surveillance en fonctionnement des DP sont généralement installés en permanence sur la machine. Il est essentiel que les détecteurs de DP eux-mêmes ne provoquent pas la défaillance de l'enroulement statorique. Cependant, les condensateurs de DP à usage spécial connectés aux câbles haute tension d'un enroulement statorique peuvent présenter un risque de défaut phase-terre. Il convient ainsi que ces détecteurs de DP capacitifs:

- aient une tension d'extinction de DP (TEDP pour un niveau de DP spécifié de 10 pC) supérieure à deux fois la tension de fonctionnement phase-terre, vérifiée par des essais individuels de série appropriés;
- soient soumis à un essai individuel de série de surtension alternative, à une tension au moins égale à celle de l'enroulement statorique;

- aient subi un essai de type d'endurance à la tension à 2,17 fois la tension assignée entre phases de la machine et n'ont pas échoué dans un délai de 400 h;
- aient un faible facteur de dissipation stable en fonction de la température jusqu'à la température maximale de fonctionnement prévue à l'emplacement d'installation du détecteur, vérifié par des essais de type appropriés.

De plus amples informations concernant les essais de fiabilité des détecteurs de DP sont décrites à l'Annexe D.

6.5 Appareil de mesure des DP

Les signaux électriques qui proviennent des différents types de détecteurs décrits en 6.4 peuvent être mesurés et enregistrés à l'aide de différents appareils de mesure. Le type d'appareil de mesure utilisé peut dépendre de la nature prévue du traitement, de l'analyse et de l'interprétation ultérieures des signaux (voir la Figure 1 pour une représentation schématique du système de mesure). Toutefois, il faut utiliser un appareil qui peut, directement ou par traitement ultérieur des signaux de DP mesurés, fournir au moins une distribution d'amplitude des impulsions et un patron de DP selon l'Annexe C.

L'appareil de mesure des DP se compose généralement

- d'un amplificateur d'entrée et d'un filtre de fréquence;
- d'une unité de traitement du signal, par exemple mise en forme des impulsions, échantillonnage et maintien, numériseur, forme d'onde de tension phase-terre;
- d'un dispositif de suppression du bruit et des perturbations;
- d'un dispositif de visualisation et de synchronisation de phases.

Afin d'exploiter pleinement les caractéristiques du détecteur de DP installé, il convient que les limites de fréquence de l'appareil de mesure couvrent la réponse en fréquence connue du détecteur installé conçu pour une impédance d'entrée donnée de l'appareil de mesure des DP.

6.6 Paramètres de mesure des DP

6.6.1 Généralités

Différents paramètres de mesure des DP peuvent être utilisés pour la visualisation, l'analyse et l'interprétation des mesurages en fonctionnement. Afin d'être en mesure d'évaluer l'état réel de l'isolation de l'enroulement statorique, il convient que les paramètres utilisés fournissent un moyen sensible de caractérisation de la nature des DP de la machine en essai, ainsi que du développement des processus de DP dans la durée lors du suivi de l'évolution de l'état de la machine par des mesurages réguliers.

6.6.2 Amplitude de DP

Pour évaluer le comportement de DP, il convient au moins de mesurer l'amplitude q de chaque impulsion de DP et de la traiter de manière appropriée. L'amplitude q de DP d'une impulsion individuelle peut être exprimée en matière de tension (mV) ou de charge apparente (nC), selon l'approche de principe du fabricant du système de mesure des DP (voir la Figure 1), ainsi que selon les caractéristiques d'impédance et de fréquence de l'objet en essai. Une conversion de base des amplitudes de DP mesurées en matière de tension (mV) en charge (nC) et inversement n'est pas possible pour des enroulements statoriques complets.

L'amplitude mesurée des DP peut dépendre des spécifications et des réglages de l'instrument d'enregistrement. L'Annexe B de l'IEC 60034-27-1:2017 traite de ce sujet de manière détaillée.

6.6.3 Paramètres de DP supplémentaires

Lors de l'utilisation d'appareils de mesure numérique des DP, l'amplitude q_i de DP est acquise pour le train d'impulsions de DP pour chaque événement de DP individuel qui se produit pendant le temps de mesure et la tension instantanée associée u_i au temps t_i ou l'angle de phase ϕ_i dans la période correspondante de la tension de phase. Dans chaque cas, les valeurs mesurées de DP sont enregistrées avec un type d'appareil de mesure approprié et stockées de manière à pouvoir être analysées ultérieurement par des méthodes appropriées. Ce processus permet de calculer ensuite les éventuels paramètres de DP déduits supplémentaires sur la base des données mesurées d'origine. Selon le système et les réglages du filtre, la polarité des impulsions peut être perdue dans le signal de DP.

Lorsque des systèmes de mesure qui fonctionnent dans la plage HF ou VHF sont utilisés, il est possible de mesurer des paramètres supplémentaires dans le domaine temporel comme le temps de montée, le temps de descente ou même la forme complète de chaque impulsion de DP, afin d'appliquer ensuite des méthodes spéciales d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel, par exemple, pour séparer les différentes sources de DP.

7 Installation des systèmes de mesure

7.1 Généralités

Les composants pour un mesurage en fonctionnement des DP peuvent être installés selon des configurations différentes. En fonction de la configuration de l'installation, des mesurages en fonctionnement périodiques ou continus des DP peuvent être réalisés (voir 9.4 et 9.5).

7.2 Installation des détecteurs de DP

La réalisation de mesurages en fonctionnement des DP exige au moins d'installer les détecteurs de DP en un emplacement approprié. Cet emplacement peut se situer à l'intérieur de la boîte à bornes de la machine, de l'enveloppe de la machine ou de l'armoire du point neutre, voire à proximité de la gaine à barre. Le type de détecteur de DP détermine l'emplacement et la procédure d'installation du détecteur.

Il convient que le fournisseur transmette une documentation appropriée pour l'installation, la mise en service, l'exploitation et la maintenance des détecteurs de DP et de leurs câbles de connexion. Il convient que l'installation et la mise en service soient réalisées uniquement par des personnes qualifiées.

Si un composant supplémentaire est connecté entre la haute tension et la terre (par exemple, un condensateur haute tension), il convient qu'il satisfasse aux exigences de performance d'isolation sur le lieu d'installation, de sorte que la coordination de l'isolement du système ne soit pas affectée.

Par ailleurs, il convient que le composant ne soumette pas le système à un risque de défaut électrique inacceptable. Sur demande, il convient que le fournisseur du composant transmette les informations nécessaires à une appréciation du risque, par exemple, les données issues des essais d'endurance de tension et des statistiques de défaillance (6.4.3).

Il convient que les détecteurs de DP résistent aux conditions normales de fonctionnement sur leur lieu d'installation.

Il convient que les pièces métalliques soient constituées de matériau non magnétique afin d'éviter tout échauffement par les effets du champ magnétique.

Pour chaque phase de la machine, il est recommandé d'utiliser au moins un détecteur de DP, qu'il convient de positionner le plus près possible de l'enroulement. Éventuellement, un détecteur de DP peut être connecté au point neutre de la machine. À chaque phase, un deuxième détecteur de DP peut être installé à une certaine distance des bornes pour recueillir des informations sur la direction des impulsions (voir l'Article B.3).

Pour la position, le montage et la connexion des détecteurs de DP, les considérations suivantes sont importantes:

- le détecteur de DP et ses câbles de connexion y compris l'acheminement des câbles de mesure basse tension ne doivent pas compromettre les performances d'isolation du stator et de la barre de phase ni les dégagements exigés;
- lors de l'installation des détecteurs de DP, veiller à satisfaire à des dégagements comme cela est indiqué dans les normes nationales et internationales pertinentes;
- le montage du détecteur doit résister à toutes les conditions de fonctionnement telles que la température, les vibrations et les transitoires de court-circuit, car un desserrage ou une déformation peut déclencher un défaut électrique;
- il convient de ne pas placer les détecteurs de DP directement connectés à un potentiel haute tension dans un environnement qui présente une contamination et une humidité excessives. Une contamination de surface peut provoquer des courants de fuite, qui entraînent finalement une dégradation du cheminement de surface ou un embrasement par la pollution;
- il convient que le détecteur de DP et ses câbles de connexion n'introduisent pas d'activité de décharge partielle;
- le détecteur de DP, ses câbles de connexion et le système de transmission des signaux ne doivent pas introduire de boucles d'induction;
- il convient que les connexions au potentiel haute tension et au potentiel de terre soient aussi courtes que possible et de faible inductance. Une attention particulière à la qualité mécanique de ces connexions est exigée dans la mesure où elles peuvent se desserrer en raison de vibrations.

7.3 Point d'accès extérieur et câblage

Étant donné que les emplacements des détecteurs de DP, en raison des restrictions en matière de santé et de sécurité, ne sont normalement pas accessibles pendant le fonctionnement de la machine, un point d'accès extérieur non restreint est recommandé. Il convient que le point d'accès permette la connexion et la déconnexion de l'appareil de mesure des DP aux câbles des détecteurs de DP pendant le fonctionnement de la machine sans présenter de risque pour le personnel et les équipements. Lorsqu'il n'est pas inclus dans le détecteur de DP, il convient que le point d'accès comporte un dispositif de protection contre les surtensions afin de réduire la tension maximale à sa sortie à un niveau de sécurité conforme à des règles et réglementations techniques communes, en cas de défaillance dans le circuit de mesure.

Étant donné que le câble peut introduire un point d'entrée pour le bruit électromagnétique par des processus de couplage, il convient d'utiliser un degré approprié de blindage et des connecteurs de haute qualité. En raison de vibrations continues à proximité de la machine, il est nécessaire que toutes les connexions soient d'un type mécaniquement robuste.

Lorsque le blindage d'un câble est mis à la terre aux deux extrémités, le blindage établit une boucle de terre, ce qui peut entraîner des courants élevés et endommager le blindage. Il existe différentes méthodes connues pour réduire ces courants de terre sans compromettre le blindage. La conception de la mise à la terre du câble doit prendre en considération la conception de la mise à la terre de la sortie du détecteur de DP et de l'entrée de l'appareil de mesure des DP. Le concept global de mise à la terre du générateur, des conducteurs de bus de phase et du transformateur HT doit être respecté.

En variante, les informations de DP peuvent être transférées au point d'accès extérieur par l'intermédiaire d'un câble optique.

Un point d'accès extérieur permet de connecter en toute sécurité un appareil de mesure portable des DP à tout moment pendant le fonctionnement de la machine et d'acquérir des signaux en fonctionnement des DP. Cette connexion temporaire d'un appareil de mesure des DP est suffisante pour effectuer des mesurages instantanés à des intervalles spécifiques et n'exige qu'un seul appareil de mesure pour plusieurs unités de machine par site. Ces mesurages sont généralement appelés "mesurages périodiques des DP" (voir 9.4).

7.4 Installation de l'appareil de mesure des DP

Un mesurage continu des DP sur le stator d'une machine nécessite l'installation permanente d'un appareil de mesure des DP en plus des détecteurs de DP. Pour permettre la maintenance ou le remplacement de l'appareil lors du fonctionnement de la machine, il est également recommandé d'installer un point d'accès selon 7.3. En ce qui concerne les connexions de câbles, des considérations identiques à celles applicables pour les câbles entre les détecteurs de DP et le point d'accès doivent être prises en compte.

En outre, une connexion de communication peut être exigée entre l'appareil de mesure des DP et un ordinateur qui transfère les informations de contrôle et d'état, ainsi que les données de DP. En fonction des distances, de la configuration du site et des perturbations, il convient d'utiliser une méthode de connexion fiable dans cet environnement spécifique.

Les données de DP sont stockées en permanence dans l'instrument de DP, sur l'ordinateur ou tout lecteur de réseau si l'ordinateur est intégré dans un réseau distribué.

Plusieurs appareils de mesure des DP dans une centrale électrique, un pour chaque machine, peuvent être connectés, par l'intermédiaire d'un réseau de données, à un poste informatique central qui permet d'observer et d'analyser l'activité de DP dans toutes les machines à partir d'un seul endroit, par exemple la salle de commande. Des options d'accès à distance par le biais de liens de communication, comme une connexion internet sécurisée à un centre de diagnostic, doivent être possibles.

7.5 Installation de systèmes d'acquisition des données de fonctionnement

Outre les données de DP, il convient d'acquérir de manière automatique les données de fonctionnement fournies par la machine et de les stocker avec lesdites données de DP, le cas échéant. Les données de fonctionnement, telles que la puissance active, la puissance réactive, les températures de l'enroulement statorique et du noyau, la température de l'air/gaz de refroidissement, la tension du stator et l'humidité du gaz de refroidissement sont importantes pour l'évaluation du système d'enroulement statorique fondée sur l'interprétation des données de DP. Les données de fonctionnement doivent être liées aux données de DP dans la base de données, les données de DP sont transmises à l'ordinateur de l'installation ou tous ces ensembles de données doivent être transférés à un centre de diagnostic distant par l'intermédiaire d'une connexion internet sécurisée.

Ces données de fonctionnement des machines sont accessibles par la mise en place d'interfaces appropriées avec le système de commande de l'installation. Exemples types de mises en place d'interfaces possibles:

- l'installation d'un module convertisseur analogique-numérique (CAN) multicanal, capable d'acquérir les signaux de traitement et qui transmet les données numérisées à l'ordinateur par le biais du réseau de communication;
- l'installation d'une interface logicielle sur l'ordinateur, qui sert d'interface avec le système de commande de l'installation et fournit les données de fonctionnement exigées sur l'ordinateur.

Les systèmes de mesure en fonctionnement des DP avec des dispositifs installés en permanence pour l'acquisition de DP et les systèmes d'acquisition de données de fonctionnement sont obligatoires pour effectuer la "surveillance continue en fonctionnement des DP" (voir 9.5).

8 Normalisation des mesurages

8.1 Généralités

En raison de la propagation des impulsions, de la résonance et du couplage croisé mutuel dans les enroulements de la machine, mentionnés en 6.2, l'étalonnage de l'amplitude n'est pas possible. En raison de la grande variété des plages de fréquences utilisées par les systèmes de mesure de DP, deux procédures de normalisation sont nécessaires pour différents systèmes.

8.2 Normalisation pour les systèmes basse fréquence

8.2.1 Généralités

La normalisation du circuit d'essai peut faciliter les comparaisons entre les mesurages effectués sur des machines de conception et de caractéristiques assignées similaires (tension, puissance, type de refroidissement), avec le même système de DP. Il convient de normaliser le circuit d'essai par l'injection d'impulsions de courant de courte durée d'amplitude de charge connue au moyen d'un générateur d'impulsions de référence (dispositif d'étalonnage) conforme aux spécifications données dans l'IEC 60270. La procédure de normalisation ne peut être réalisée qu'à l'arrêt.

Il est important de souligner les points suivants:

- la normalisation ne définit pas la fonction de transfert de signal inconnue et dépendante de la machine entre la source de DP réelle dans l'isolation de l'enroulement et l'emplacement des détecteurs installés, qui dépend en général de l'emplacement de la source de DP et de la conception de l'enroulement individuel;
- la normalisation aux bornes de la machine ne représente pas correctement les impulsions de DP qui se produisent effectivement en un emplacement inconnu de l'enroulement statorique. Par conséquent, le processus de normalisation d'un mesurage sur des enroulements complets ne fournit pas une mesure de la qualité du système d'isolation en matière de grandeurs absolues;
- la normalisation augmente la comparabilité des résultats de DP entre des machines de même conception et de même puissance assignée et permet donc une comparaison d'au moins un ordre de grandeur entre des machines différentes;
- pour la normalisation des systèmes de mesure de DP dans la plage de basses fréquences, il convient d'utiliser des générateurs d'impulsions de référence qui fournissent un spectre constant de fréquences d'impulsion dans la plage de fréquences utilisée;
- la procédure de normalisation peut être répétée pour une vérification de la fonction du système de mesure;
- la normalisation n'est généralement valable que pour un seul paramétrage de l'appareil de mesure. Lorsque la fréquence du système de détection est variable, chaque variation de la fréquence limite inférieure, de la fréquence limite supérieure et des bandes passantes exige une normalisation distincte. Il n'est pas possible de convertir un facteur de normalisation obtenu pour un certain réglage de fréquence en facteurs de normalisation pour d'autres réglages. Le même principe est exigé en cas de modification des caractéristiques de filtrage, par exemple, modification de filtre de Bessel en filtre de Chebyshev ou autres;
- en raison du produit gain-bande passante limité de nombreux instruments, les mêmes dispositions s'appliquent si les mesurages doivent être réalisés à des réglages de gain autres que normalisés. Dans ce cas également, la normalisation peut être nécessaire avant les mesurages;
- toute modification du circuit de mesure, par exemple, la modification des détecteurs de DP, le câblage et l'acheminement de ceux-ci, l'installation d'équipements en parallèle à l'enroulement (parafoudres ou condensateurs de surtension, etc.) exige une nouvelle normalisation.

8.2.2 Procédure de normalisation

La normalisation du circuit d'essai s'effectue par l'injection d'impulsions de courant d'une amplitude de charge spécifiée aux bornes de la machine ou le plus près possible de celles-ci, au moyen d'un générateur d'impulsions de référence. Cette opération consiste à simuler les impulsions de DP telles qu'elles apparaissent aux bornes de la machine lors du mesurage.

De préférence, le générateur d'impulsions de référence doit fonctionner en quelque sorte en synchronisation avec le réseau. Ce fonctionnement synchronisé permet d'identifier les impulsions de normalisation, notamment dans un environnement bruyant (voir la Figure 4).

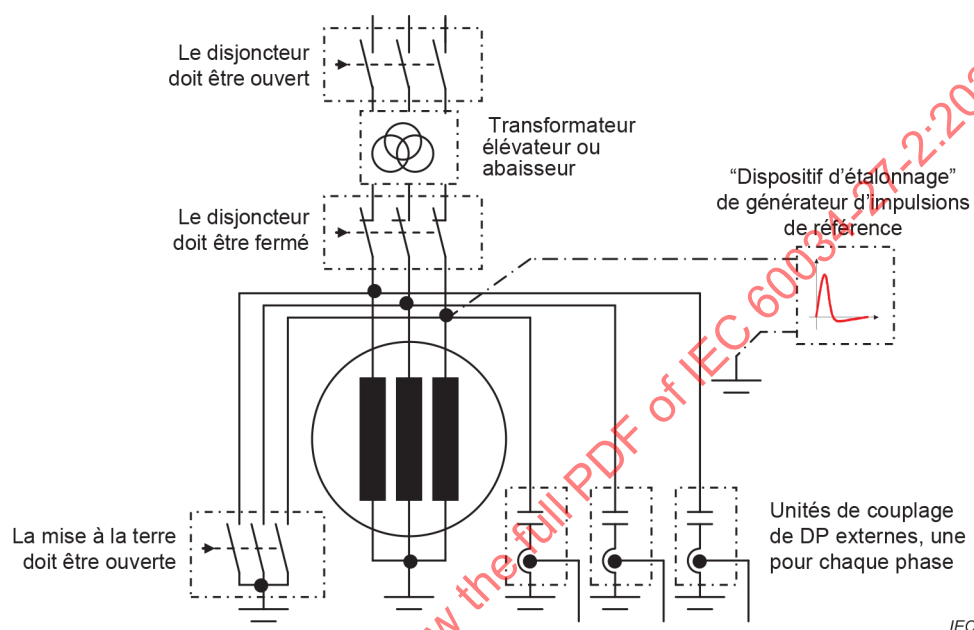


Figure 4 – Objet de mesure dans un processus de normalisation, état du point neutre identique à un point neutre en fonctionnement

Il convient d'exécuter la procédure de normalisation comme suit:

- toutes les connexions entre la machine et le transformateur principal doivent être fermées. Si cette opération n'est pas possible en raison de restrictions de sécurité, le protocole de normalisation doit l'indiquer;
- les bornes de la machine ne doivent pas être mises à la terre;
- la connexion du point neutre doit être maintenue dans le même état que pendant le fonctionnement;
- lorsque des condensateurs de surtension sont installés sur la machine, ils doivent rester connectés à l'enroulement;
- le générateur d'impulsions de référence doit être connecté le plus près possible de la borne et de la carcasse avec les câbles d'essai le plus court possible. Dans le cas d'un détecteur de DP installé au point neutre, le mesurage de normalisation est uniquement indicatif du fait de la distance généralement courte avec la terre;
- réalisation du mesurage de normalisation;
- il est recommandé de réaliser au moins un mesurage avec un générateur d'impulsions déconnecté pour vérifier la normalisation et le bruit de base qui peut superposer les impulsions de référence;
- pour vérifier la symétrie de toutes les phases installées et des détecteurs de DP, il est recommandé d'effectuer une normalisation sur toutes les phases séparément. En particulier sur les grandes machines, les longueurs des anneaux de phase peuvent différer considérablement d'une phase à l'autre.

8.3 Normalisation/contrôle de sensibilité pour les systèmes hautes et très hautes fréquences

8.3.1 Spécification pour la génération d'impulsions électroniques

Le contrôle de sensibilité est effectué par injection d'impulsions de tension sur le conducteur au point le plus proche de l'isolation. Ce point est généralement la borne de l'enroulement et est référencé comme la borne dans le reste du présent paragraphe.

La configuration générale de ce contrôle de sensibilité est représentée à la Figure 5.

Le générateur d'impulsions consiste en une impulsion de tension rectangulaire avec une tension de crête de U_g et une résistance interne de R_g en série. Pour le mesurage des DP à très haute fréquence, il est préférable d'avoir un générateur d'impulsions avec une impédance de source de 1Ω ou moins, car cela produit moins de distorsion de forme d'impulsion. Il convient que le temps de montée t_R du générateur d'impulsions soit inférieur à $1/f$, où f est la limite de fréquence supérieure du système de détection. Par exemple, si la fréquence de coupure supérieure du système de mesure des DP est de 100 MHz, il convient que le temps de montée des impulsions du générateur électronique soit inférieur à 10 ns.

La durée d'impulsion enregistrée aux bornes doit être plus longue que la réponse temporelle du système de détection. La réponse temporelle correspond au temps nécessaire au rétablissement de l'état initial du système après son excitation par une impulsion. Le temps de descente de l'impulsion n'est pas important.

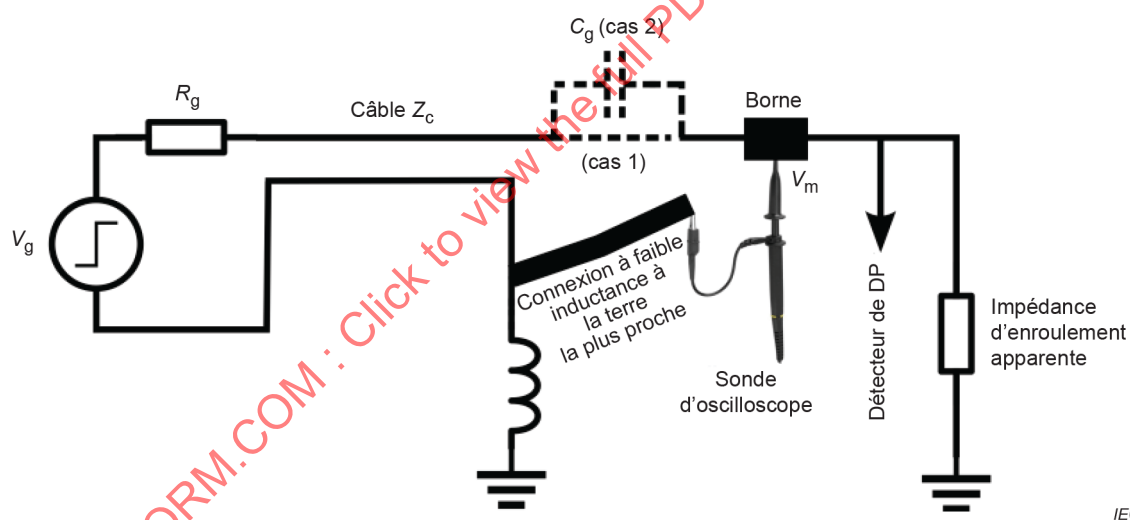


Figure 5 – Dispositif pour le contrôle de sensibilité

La Figure 5 représente la configuration à utiliser pour le contrôle de sensibilité et le modèle simplifié de la machine électrique tournante. À haute fréquence, l'impédance apparente de l'enroulement est totalement inconnue et la représentation habituelle par une capacité peut même être totalement erronée. Dans la plage de très hautes fréquences, le comportement de l'enroulement est plus similaire à celui d'une impédance de surtension. L'impédance de la connexion à la terre du générateur d'impulsions et de l'oscilloscope est également inconnue et représentée par une inductance. En raison de ces paramètres inconnus, l'échelon de tension injecté au niveau de la borne ne peut être déterminé par la tension de consigne du générateur d'impulsions. La tension à la borne V_m doit donc être mesurée, de préférence avec des sondes d'oscilloscope à entrée FET (ultra basse capacité).

Il existe deux conditions d'essai:

- Cas 1) la sortie du générateur d'impulsions est connectée directement à la borne;
- Cas 2) la sortie du générateur d'impulsions est connectée directement en série à un condensateur C_g lui-même connecté directement à la borne. Ce condensateur doit être choisi afin d'obtenir une charge $V_g C_g$ de quelques nC et inférieure à 1 nF.

Lorsque le générateur d'impulsions doit être situé à distance de l'enroulement, il convient que le câble coaxial comporte une terminaison de $50\ \Omega$. Lorsque la distance entre la borne et la terre de l'enroulement est supérieure à $1/10$ de la longueur d'onde de la limite de fréquence supérieure du système de détection, la connexion d'inductance à la terre n'est pas plus négligeable (inductance de terre à la Figure 5). Il convient d'installer un plan de masse à faible inductance pour prolonger la terre du générateur pour l'injection d'impulsion. L'utilisation d'une large feuille de cuivre ou d'un fil tressé est recommandée. Le point de terre peut être différent du point de terre du dispositif de couplage.

8.3.2 Configuration de la machine

Pour la démonstration de la sensibilité, il convient que la configuration de la machine soit celle indiquée à la Figure 4.

8.3.3 Contrôle de sensibilité

La procédure de contrôle de sensibilité peut être effectuée uniquement à l'arrêt, à moins d'utiliser un condensateur particulier d'injection de haute tension C_g . L'injection d'impulsions en fonctionnement constitue toutefois une opération dangereuse que le présent document ne couvre pas.

L'impulsion de tension V_m doit être mesurée directement à la borne au moyen d'une sonde d'oscilloscope et d'un oscilloscope rapide. Il s'agit, en mV, de la sensibilité du système de détection des DP. Si le générateur électronique peut être situé très près de la borne, à moins de $1/10$ de la longueur d'onde de la limite de fréquence supérieure du système de détection, y compris la connexion à la terre, la tension d'impulsion de consigne U_g peut être utilisée directement.

Il est prévu que le front de l'impulsion de tension oscille. La tension à prendre en considération pour le contrôle de sensibilité est la valeur de crête de la tension enregistrée à la borne. Si des oscillations de très haute fréquence par rapport à la fréquence limite supérieure du système de détection sont mesurées, un filtrage de cette composante de très haute fréquence doit être effectué.

En service, le bruit de fond peut augmenter de manière significative. Étant donné que ce contrôle s'effectue à l'arrêt, il est recommandé d'enregistrer la sortie de DP à différents niveaux de tension d'échelon afin d'évaluer le niveau minimal de sensibilité en fonctionnement. Le niveau minimal de sensibilité est la tension de crête du générateur d'échelons détectable au-dessus de la limite du bruit de fond. Il peut être difficile de déterminer la limite réelle de bruit, car la machine électrique tournante génère normalement une DP en fonctionnement.

Pour vérifier la symétrie de toutes les phases installées et des dispositifs de couplage, il est recommandé d'effectuer un contrôle de sensibilité sur toutes les phases séparément. En particulier sur les grandes machines, les longueurs des anneaux de phase peuvent différer considérablement d'une phase à l'autre.

La présente norme ne recommande aucune sensibilité minimale de DP. Ce contrôle de sensibilité n'est valable que pour une impulsion au niveau de la borne. En raison de l'affaiblissement des impulsions, la sensibilité peut chuter pour les sources de DP situées dans les bobines d'enroulement éloignées de la borne.

9 Procédures de mesure

9.1 Généralités

Les mesurages en fonctionnement des DP sur les machines tournantes peuvent être réalisés de manière périodique lors du fonctionnement normal de la machine, avec un appareil de mesure des DP connecté de manière temporaire aux détecteurs de DP installés, par le biais d'un point d'accès approprié, comme cela est décrit à l'Article 7. En variante, une surveillance continue en fonctionnement des DP peut également être effectuée, avec un appareil de mesure des DP installé de façon permanente et des connexions de communication appropriées conformes à l'Article 7. Pour ces deux approches, il est recommandé de réaliser un mesurage de référence initial qui peut servir de référence pour des mesurages futurs et pour une analyse d'évolution.

9.2 Paramètres de fonctionnement de la machine

Un des aspects les plus importants de toutes les procédures de mesure en fonctionnement est l'enregistrement des conditions de fonctionnement de la machine conjointement à la détection des données de DP. L'influence des conditions de fonctionnement de la machine sur les résultats de mesure est souvent essentielle dans l'analyse des données et la détermination ultérieure des sources de DP. S'il est prévu, l'ensemble suivant de paramètres de fonctionnement doit être enregistré pendant chaque mesurage en fonctionnement des DP:

- courant et tension statoriques;
- puissance active et réactive;
- température de l'enroulement mesurée par le RTD à encoches;
- température du gaz de refroidissement du côté gaz froid et gaz chaud de l'enroulement statorique et pression;
- température de l'eau de refroidissement pour des enroulements statoriques refroidis directement par eau;
- humidité relative du gaz de refroidissement en circulation.

Il convient d'enregistrer les paramètres de fonctionnement simultanément aux données de DP et de les stocker avec la même datation sur le même appareil d'enregistrement pour assurer une corrélation correcte des données et donc une interprétation significative du comportement de DP.

Si d'autres machines fonctionnent en parallèle sur le même bus haute tension, il est nécessaire de prendre en considération leur influence sur les perturbations externes (voir l'Annexe B).

Pour identifier les sources de décharge spécifiques, il convient de modifier systématiquement les facteurs qui influencent l'activité de décharge par un programme de mesure approprié. Étant donné que le programme de mesure peut influencer sur le régime de charge de l'unité de fonctionnement, il convient de communiquer ce programme à l'avance à l'utilisateur de la machine.

9.3 Mesurage de référence

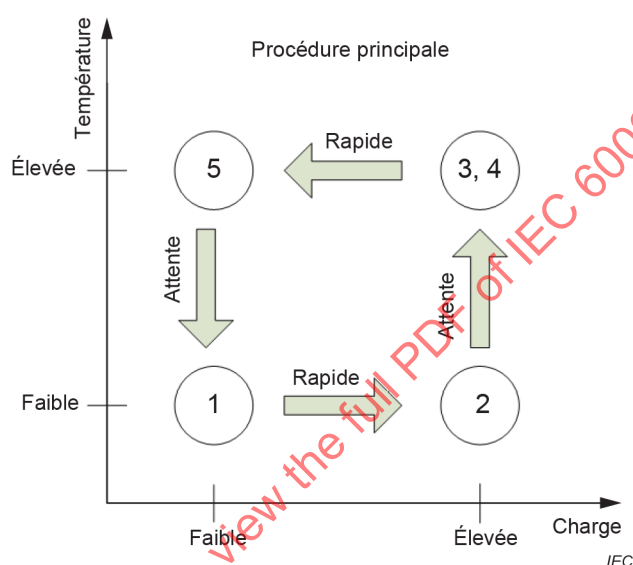
9.3.1 Généralités

Le mesurage initial en fonctionnement des DP effectué sur une machine donne une indication sur l'état du système d'isolation lors du mesurage. Il s'agit essentiellement d'une signature de l'activité de DP dans le système d'isolation, qui sert de base à une analyse d'évolution ultérieure qui sera établie par des mesurages futurs. Le mesurage de la signature initiale est meilleur après une période qui correspond aux mille premières heures de fonctionnement, car les nouveaux enroulements peuvent présenter des DP plus élevées et différentes des mesurages ultérieurs après un certain temps de fonctionnement en raison d'un effet de conditionnement.

9.3.2 Procédure d'essai complète

Pour un mesurage de référence complet, des mesurages de DP dans des conditions de fonctionnement différentes doivent être réalisés. La procédure suivante conforme à la Figure 6 peut être perçue comme un exemple d'essai de référence en fonctionnement de DP. Le programme de charge fournit des données pour une analyse ultérieure significative des DP, compte tenu principalement des effets de la charge et de la température.

Il convient de modifier les conditions de charge et de température selon la séquence de mesure représentée à la Figure 6. Selon les conditions de l'installation, la séquence de mesure peut être lancée avec une charge croissante au point (1), ou avec une charge décroissante au point (3). Noter que des variations rapides de charge dans les générateurs de turbine à vapeur ne sont pas toujours possibles. Dans certaines machines, il peut ne pas être possible de suivre la procédure complète pour des raisons pratiques.



Légende

- (1) Mesurage dans des conditions de charge faible et d'enroulement thermiquement stable
- (2) Mesurage avec une charge élevée directement après une augmentation de charge relativement rapide
- (3) Mesurage dans des conditions de charge élevée et d'enroulement thermiquement stable
- (4) Mesurage avec une charge élevée et modification importante des conditions de puissance réactive et d'enroulement thermiquement stable
- (5) Mesurage avec une charge faible directement après une diminution de charge rapide

Figure 6 – Procédure d'essai recommandée dans des conditions de charge et de température consécutives

Il convient de réaliser immédiatement les mesurages après la variation de charge (cas (2) et (5)). La stabilisation de la température nécessite un certain temps. Par conséquent, entre chaque point de charge, il est nécessaire de surveiller la température de l'enroulement statorique de telle sorte que les mesurages des DP (1), (3) et (4) soient chacun réalisés lorsque la température s'est stabilisée. Lorsque la modification de la charge active n'est pas possible, une modification également de la charge réactive permet au moins d'obtenir une variation minimale du courant statorique.

Afin d'obtenir une influence suffisamment importante des conditions de charge sur le comportement de DP, il convient que la différence entre la charge faible et la charge élevée corresponde au minimum à 50 % de la puissance nominale.

Il convient, lorsque c'est possible, d'effectuer également un mesurage à la tension et à la vitesse nominales avant de synchroniser la machine avec le réseau. Cette opération permet une détection plus fiable des défauts, qui dépendent uniquement de la répartition du champ électrique. Une durée d'essai minimale doit être de 10 s (voir l'Annexe A de l'IEC 60034-27-1:2017).

9.4 Mesurages périodiques

Les mesurages périodiques en fonctionnement des DP sont réalisés à des intervalles de temps spécifiques, qui dépendent de l'état individuel de la machine. Si les mesurages indiquent une condition d'activité de DP stable de l'enroulement de la machine et qu'aucune condition de fonctionnement inhabituelle n'a été rencontrée, alors les mesurages périodiques sont généralement réalisés une ou deux fois par an. En cas de constatations particulières qui peuvent être liées à des défauts d'isolation, les intervalles de temps peuvent être raccourcis afin de réduire le plus possible le risque qu'une détérioration importante de l'isolation puisse ne pas être détectée entre les essais. Il est également recommandé d'effectuer un mesurage en fonctionnement avant un arrêt de maintenance, afin d'indiquer les éventuels points faibles qui nécessitent un examen plus approfondi lors des travaux de maintenance.

Le programme de mesure complet avec variation de la charge et de la température, selon la Figure 6, n'est recommandé que dans le cas où l'activité de DP est clairement perceptible et nécessite une évaluation plus détaillée. Il convient de réaliser de manière régulière au moins un mesurage à un point de charge et dans des conditions thermiques stables (charge élevée (3), (4) selon la Figure 6). Afin d'assurer la comparabilité et donc de pouvoir établir une analyse d'évolution fiable pour les mesurages ultérieurs, les valeurs suivantes (Tableau 1) sont généralement observées comme meilleure pratique.

**Tableau 1 – Stabilité des conditions de fonctionnement
afin d'obtenir des évolutions valables des DP**

	Générateurs	Moteurs
Tension	$\pm 1,5 \%$	$\pm 3 \%$
Température d'enroulement	$\pm 5 \text{ K}$	$\pm 5 \text{ K}$
charge	$\pm 10 \%$	$\pm 10 \%$
Pression de gaz (hydrogène ou air pressurisé)	$\pm 30 \text{ kPa}$	$\pm 3 \%$

9.5 Mesurages continus

Une variante aux mesurages périodiques consiste à installer un système d'acquisition capable d'effectuer des mesurages en continu des DP. L'installation de base d'un module de surveillance continue des DP est la même que pour le système périodique, mais, en plus, l'appareil de mesure des DP et l'ordinateur de contrôle sont installés de façon permanente.

Lorsque les données de DP sont acquises en continu, le patron de DP et un ensemble de paramètres de suivi d'évolution calculés selon l'Article 10 peuvent être dérivés directement des données mesurées à l'origine. Une grande quantité de données est créée, qui ne peut être stockée indéfiniment. Il est donc nécessaire d'utiliser des algorithmes intelligents de réduction des données, qui sélectionnent automatiquement les paramètres et les patrons de suivi d'évolution importants à partir des mesurages répétitifs, par exemple par jour, et les stockent dans une base de données à long terme à des fins d'analyse ultérieure. Cette sélection automatique du patron peut être effectuée soit simplement en fonction du temps, avec des intervalles de temps réguliers prédéfinis, soit de manière plus appropriée en fonction du développement des paramètres de suivi d'évolution dérivés, qui sont utilisés à des fins de comparaison avec les conditions de référence du système d'isolation.

Le système de surveillance continue des DP peut être intégré dans un système de diagnostic de supervision qui combine différents modules de diagnostic pour l'évaluation de l'état de la machine. Dans ce cas, il est essentiel de prévoir des liaisons de communication appropriées, qui permettent de connecter le système à un centre de diagnostic distant, auquel une analyse détaillée des données mesurées peut être réalisée.

L'avantage de la surveillance continue en fonctionnement des DP consiste en ce que les données de DP peuvent faire l'objet d'une évolution continue conjointement au paramètre de fonctionnement sélectionné (voir 10.2) en temps réel, ce qui permet de détecter immédiatement les variations rapides du comportement de DP. Le risque de perte d'informations importantes concernant la variation de l'activité de DP en corrélation avec l'état de la machine est réduit le plus possible. Une analyse opportune des données par l'intermédiaire d'un centre de diagnostic distant est possible. Cette analyse permet de mettre en œuvre une analyse détaillée des DP sur la base d'un événement, plutôt que sur la base traditionnelle d'un intervalle de temps fixe.

10 Visualisation des mesurages

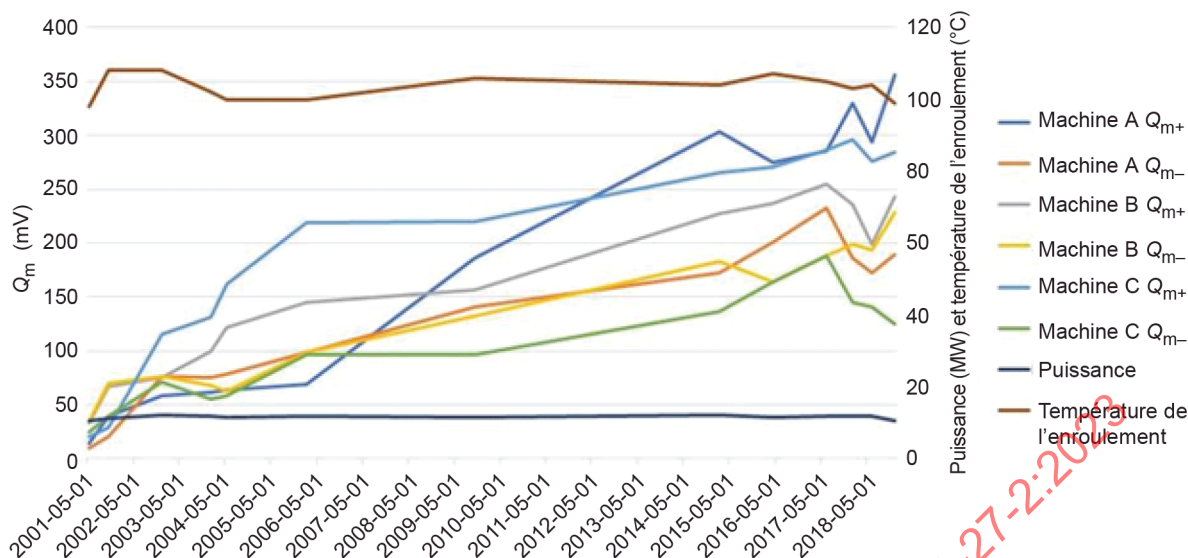
10.1 Généralités

Dans la mesure où l'état du système d'isolation est soumis à évaluation, il convient que les données de DP enregistrées par l'un des systèmes de mesure décrits à l'Article 6 fassent l'objet d'un traitement approprié. Étant donné que la nature des dommages occasionnés au système d'isolation, et par conséquent le risque de défaillance, est directement liée au type particulier de la source de décharges partielles, il est nécessaire de recueillir des informations fiables sur le type de sources de décharges partielles mesurées. Différents types de traitement des données visuelles peuvent être utilisés à cette fin.

10.2 Visualisation des paramètres de suivi d'évolution

La visualisation du comportement de suivi d'évolution de l'activité de DP fournit des informations importantes pour l'identification des sources de DP et l'évaluation du risque. La Figure 7 donne un exemple de l'évolution de l'amplitude de DP associée à des données de fonctionnement comme la puissance active et la température d'enroulement au cours d'une période donnée. La corrélation de la variation de l'activité de DP avec l'évolution des conditions de charge permet de mieux identifier la source de DP (voir 11.4).

L'utilisation de diagrammes appropriés lors de l'analyse ultérieure permet de visualiser les mesurages des DP afin de pouvoir évaluer l'état du système d'isolation. Des distributions statistiques de paramètres de DP, une présentation résolue en phase ou à résolution dans le temps des paramètres de DP individuels mesurés, ou des diagrammes dits de dispersion des paramètres spécifiques peuvent être utilisés à cette fin (par exemple, distribution d'amplitude d'impulsions, distribution de phase des impulsions, distribution d'amplitude d'impulsions résolue en phase, oscillogrammes de trains d'impulsions, représentations de la distribution des DP, etc.).



IEC

Les données ont fait l'objet d'un filtrage afin de ne représenter que la DP qui se produit lorsque le générateur fonctionne entre 35 MW et 40,9 MW et à une température comprise entre 98 °C et 108 °C.

Figure 7 – Exemple d'évolution de l'activité de DP de crête en trois phases sur un intervalle de 18 ans par des mesurages périodiques

Lors du suivi d'évolution de l'amplitude de DP ou d'autres paramètres de DP dans la durée, il est important d'acquérir simultanément des informations concernant la température de l'enroulement, l'humidité ambiante, la température et la pression du liquide de refroidissement, le courant d'excitation, le courant statorique, le facteur de puissance et la tension aux bornes.

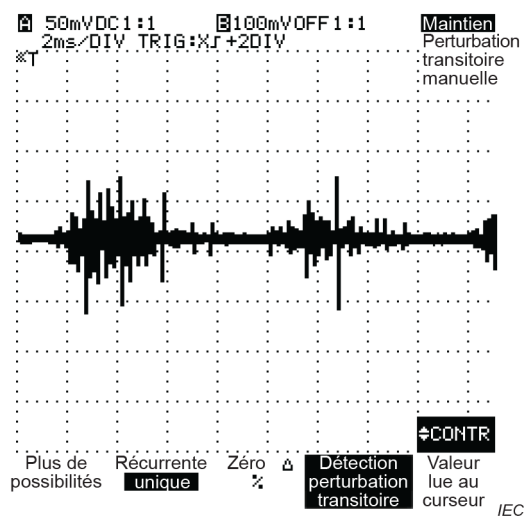
Outre le suivi d'évolution fondamental lié au temps, la visualisation de la relation entre l'amplitude de DP et les autres paramètres peut fournir des informations sur le développement de mécanismes de défaillance spécifiques, voir 11.4.

10.3 Visualisation des patrons de DP

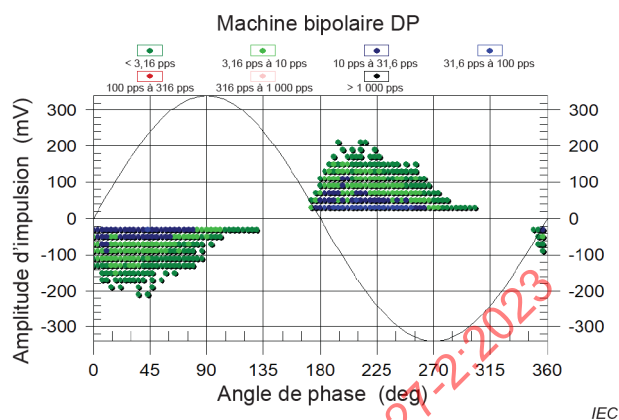
La manière la plus simple de visualiser les DP est celle qu'offrent les oscillogrammes d'impulsions fondés sur le temps et corrélés à la fréquence de réseau pour un seul cycle alternatif, comme cela est représenté à la Figure 8. Un patron de DP peut être considéré comme une représentation de la distribution des DP, dans laquelle des grandeurs de DP spécifiques sont corrélées dans le cadre d'un diagramme de dispersion, afin d'obtenir des informations sur les sources d'activité de DP. Généralement, une représentation bidimensionnelle de la distribution des DP sert à la visualisation.

Un patron de DP, recommandé pour l'identification des causes de DP dans les systèmes d'isolation des enroulements statoriques, est le patron de DP dans lequel l'amplitude q de DP est présentée en ordonnée, généralement sur une échelle linéaire, et la phase d'occurrence Φ est présentée en abscisse pour chaque impulsion individuelle de DP. La Figure 8 représente un exemple de ce type de patron. Dans le diagramme de dispersion, il convient de visualiser la fréquence d'occurrence (n) de DP à l'intérieur de chaque fenêtre phase/amplitude au moyen d'un code de couleurs approprié dont l'échelle de graduation peut être affichée sur le côté du diagramme.

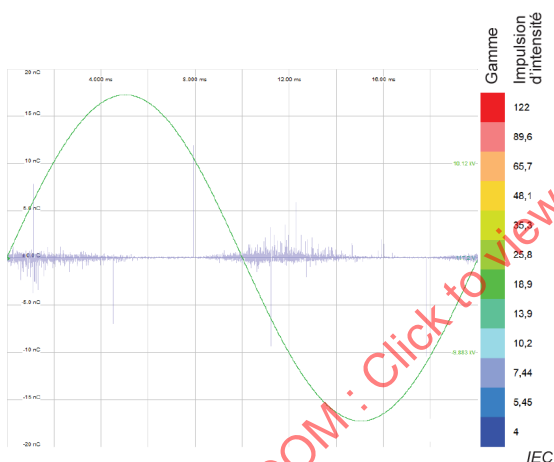
Les patrons de DP obtenus à partir de mesurages en fonctionnement peuvent également être affichés comme un diagramme à déphasage triphasé, comme cela est représenté à la Figure 9, qui peut être utilisé de manière efficace pour identifier les DP entre phases dans la développante, ainsi que l'effet du couplage croisé des signaux entre différentes phases.



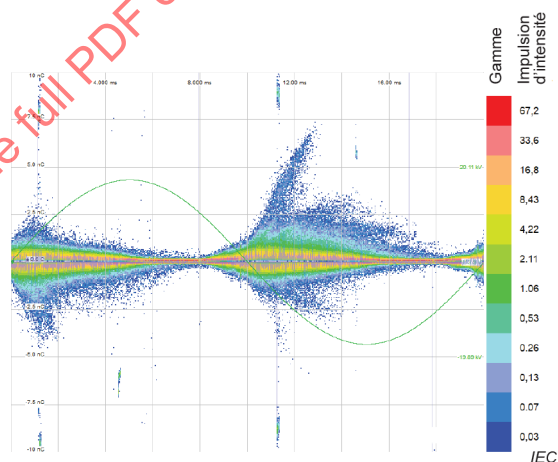
a) Activité d'impulsion de DP capturée par un oscilloscope numérique de 100 MHz au cours d'un cycle alternatif



b) Patron de DP obtenu avec le même objet en essai qu'en (a) pendant une durée de 80 s (4800 cycles alternatifs) au moyen d'un détecteur de DP disponible dans le commerce, dans la plage comprise entre 40 MHz et 350 MHz. Le détecteur supprime automatiquement les oscillations de chaque impulsion de DP



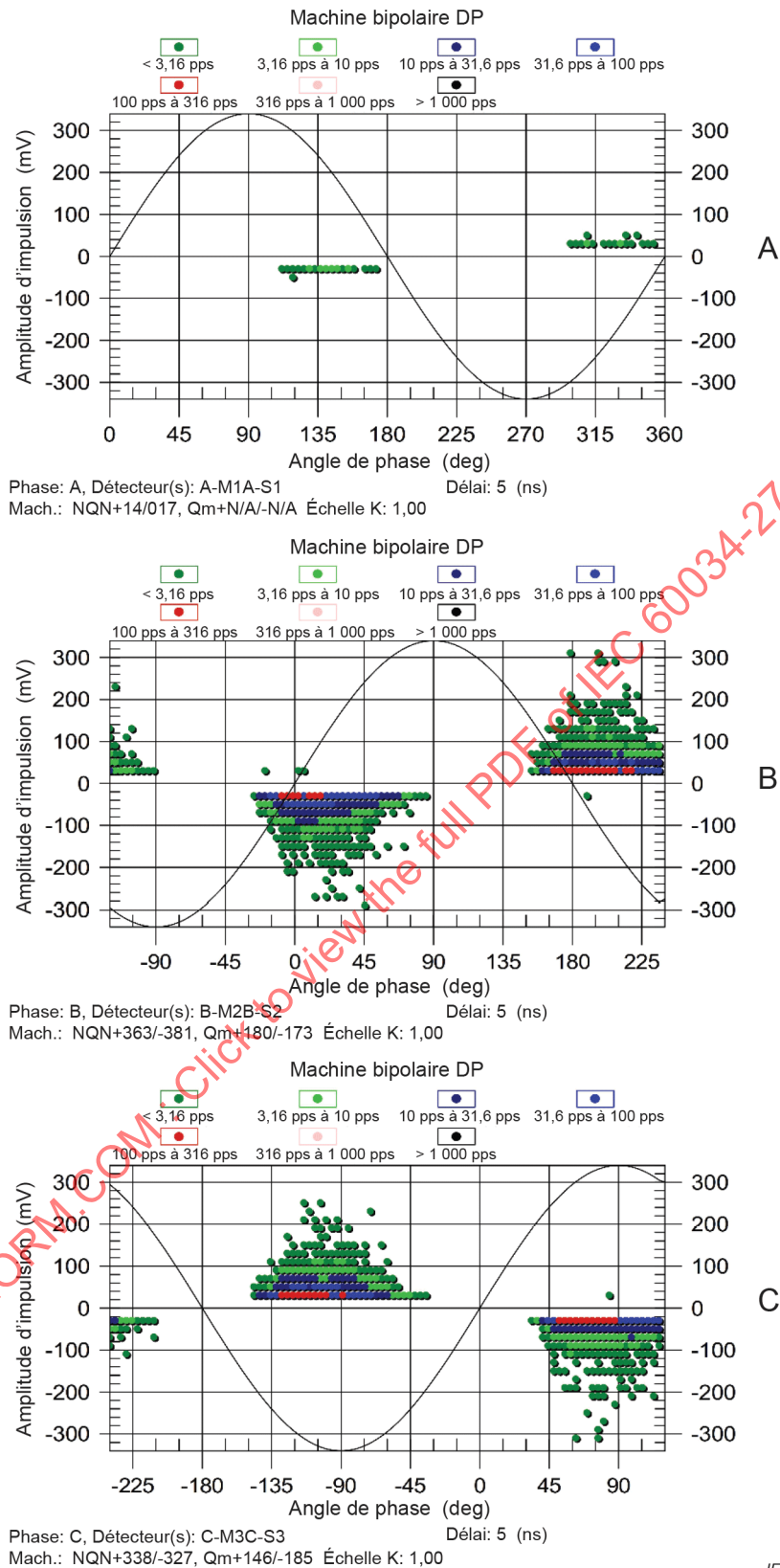
c) Activité d'impulsion de DP capturée par un détecteur de DP disponible dans le commerce, au cours d'un cycle alternatif dans la plage inférieure à 1 MHz



d) Patron de DP capturé pendant une durée de 20 s (1000 cycles alternatifs) dans la plage inférieure à 1 MHz avec un code de couleurs pour le nombre d'impulsions $H(n)/s$

NOTE Amplitude q_i des impulsions de DP exprimée en nC, phase d'occurrence des décharges ϕ_i .

Figure 8 – Exemples de patrons de DP



L'activité dans la phase A n'est pas une DP dans ladite phase, mais fait en revanche l'objet d'un couplage capacitif à partir des phases B et C.

Figure 9 – Diagrammes de patrons de DP entre phases dans lesquels la DP est due à un espacement insuffisant entre les développantes des phases B et C

11 Interprétation des mesurages en fonctionnement

11.1 Généralités

Il n'est généralement pas possible de spécifier un niveau de grandeur de DP lorsqu'il existe un risque de vieillissement accéléré qui peut entraîner une réduction de la durée de vie prévisible de l'isolation. Toutefois, une interprétation significative des résultats en fonctionnement est possible par l'utilisation de différentes sources d'information, qui peuvent inclure non seulement lesdits résultats en fonctionnement des DP, mais aussi la connaissance de la conception de la machine, l'historique de maintenance, les inspections visuelles, différents essais à l'arrêt, les conditions de fonctionnement et les connaissances spécialisées appropriées.

En général, il convient que l'interprétation des résultats en fonctionnement des DP s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, il est fondamental que toute planification de maintenance établisse les problèmes d'isolation potentiels, indiqués par une activité de DP significative. Ensuite, en cas d'activité significative, il est alors nécessaire que la source spécifique de l'activité de DP soit déterminée par une évaluation plus détaillée, par exemple par un mesurage à l'arrêt des DP conformément à l'IEC 60034-27-1 et une inspection visuelle. Étant donné que le degré de détérioration, et donc le risque de défaut d'isolement, dépend considérablement du type spécifique de décharges partielles, il est essentiel de disposer d'informations solides sur la source de toute activité de DP significative, c'est-à-dire sur le type et l'emplacement possible dans l'enroulement statorique de la machine. Pour obtenir des informations détaillées sur l'état de la machine par l'exploitation de toutes les informations contenues dans les signaux de DP mesurés, il est recommandé d'effectuer une analyse détaillée des patrons de DP au moins une fois par an. Lorsque des activités de maintenance sont planifiées, l'analyse doit être effectuée avant les activités de maintenance. Il est recommandé d'effectuer l'analyse des DP également après les activités de maintenance ou de réparation réalisées. Une analyse détaillée peut être réalisée par une analyse automatisée des patrons (voir l'Annexe B), une analyse spécialisée voire les deux.

11.2 Évaluation des paramètres d'évolution de base

Un moyen efficace d'interprétation des données de DP en fonctionnement consiste à évaluer l'évolution dans la durée de paramètres de DP spécifiques. Les nouveaux enroulements peuvent exiger des milliers d'heures de fonctionnement avant que l'obtention de relevés stables de repère de référence des DP ne soit possible, en raison du traitement thermique ultérieur continu du système de résine utilisé, du processus d'affaissement thermique et mécanique de l'isolation composite et du système de support dans la zone des encoches et de la développante, ainsi que des effets de contact d'interface entre le revêtement d'encoches conducteur des bobines d'enroulement et la surface des encoches du stator. Les paramètres qui peuvent être utilisés pour cette évaluation de l'évolution sont décrits en 9.2. Pour les nouvelles machines, il est essentiel, en vue d'une évaluation fiable de l'évolution, d'obtenir une signature initiale de l'activité de DP par un mesurage de référence selon 9.3. Cette signature initiale peut ensuite être utilisée pour une comparaison avec des mesurages périodiques ou continus ultérieurs des DP.

Lorsque, par exemple, l'amplitude Q des impulsions de DP sert de paramètre de suivi d'évolution, une interprétation significative peut prendre la forme:

- d'un suivi d'évolution dans la durée de l'amplitude Q sur la même machine, à l'aide du même système de mesure des DP;
- d'une comparaison de l'évolution de Q de différentes phases d'une seule machine, à l'aide du même système de mesure des DP;
- d'une comparaison de l'évolution de Q de plusieurs machines de même conception, à l'aide du même système de mesure des DP.

Cependant, d'autres paramètres d'évolution (par exemple selon l'Article 9), qui fournissent des informations significatives sur le développement de la détérioration des enroulements, peuvent être utilisés pour une analyse d'évolution. En général, il est utile d'utiliser non seulement un mais plusieurs paramètres de DP pour un suivi d'évolution simultané, qui fournissent des informations supplémentaires sur le comportement caractéristique de DP. Lorsque l'état des enroulements est stable dans la durée sans détérioration significative, alors le comportement des paramètres d'évolution observés est également stable. Toutefois, en cas de détérioration de l'enroulement due au fonctionnement en service, l'amplitude Q , par exemple, augmente alors généralement dans la durée. Le doublement approximatif de l'amplitude Q sur une année peut indiquer une détérioration significative effective. Dans le cas de niveaux de DP bas, ce concept général n'est applicable que de façon restreinte. Des essais à l'arrêt complémentaires ou une inspection visuelle de l'enroulement peuvent alors être réalisés.

Exemples de mises en garde concernant le suivi d'évolution dans la durée des DP:

- un stator neuf peut connaître une activité de DP relativement importante qui décroît après les mille premières heures de fonctionnement;
- dans le cas où le mesurage de référence sur un nouvel enroulement présente une DP relativement élevée par rapport à d'autres machines similaires, l'utilisateur de la machine peut demander aux fabricants l'assurance (par exemple, des essais d'acceptation de CQ par des essais à l'arrêt de DP) que le nouvel enroulement a été fabriqué avec le niveau de qualité normal que le fabricant a atteint dans le passé et que la signature initiale présente un comportement de DP normal pour ce type de machine et un nouvel enroulement statorique;
- le comportement de DP peut être affecté par les conditions de fonctionnement de la machine, par exemple, la température de l'enroulement et du stator, la charge, la température du gaz de refroidissement ou les conditions ambiantes. Les variations de DP qui résultent des conditions de fonctionnement doivent être comprises et distinguées de celles provoquées par le vieillissement progressif du système d'isolation, afin de permettre une évaluation précise de l'évolution des DP;
- les variations de Q selon un certain pourcentage, par exemple, $\pm 25\%$, peuvent être normales, en raison d'un comportement plus ou moins statistique des processus de DP, même si des points de fonctionnement comparables comme cela est indiqué en 9.4 sont fournis;
- pour déterminer le type spécifique de processus de DP, il ne suffit pas seulement de détecter et d'établir l'évolution des valeurs des paramètres de DP individuels, mais il est également nécessaire d'évaluer le patron de DP selon 10.3;
- une évaluation fiable du comportement de DP exige une évolution individuelle de chaque phénomène de DP détecté, ce qui est possible uniquement par analyse du patron de DP selon 10.3;
- dans les machines plus anciennes à activité de DP importante, il n'est pas rare que l'évolution des DP se stabilise bien que la détérioration progresse;
- lors du suivi d'évolution dans la durée du comportement de DP, les amplitudes de DP peuvent également diminuer bien que la détérioration effective de l'isolation soit importante. Comme dans la plupart des cas, l'activité de DP n'est qu'un symptôme d'un certain type de processus de détérioration thermique, mécanique ou induit par la contamination, son intensité peut varier du fait de l'évolution de la détérioration. Les évolutions à la baisse ne sont donc pas le signe d'une quelconque reprise de l'isolation;
- Le bruit et les perturbations peuvent également évoluer dans la durée, au fur et à mesure que des équipements sont ajoutés ou retirés de l'installation. Des méthodes efficaces de séparation du bruit et des perturbations (voir l'Annexe B) sont donc essentielles pour un suivi d'évolution efficace.

Lors du suivi d'évolution des paramètres dans la durée, si l'évolution est importante ou si le relevé individuel est élevé, il convient alors de soumettre les données de DP à une analyse plus approfondie afin de déterminer la cause probable d'une activité de DP importante. Dans ce cas, l'analyse des patrons de DP (Figure 8 et Figure 9) selon 11.3 et des évolutions selon 11.4 est utile pour l'identification des sources de DP.

11.3 Évaluation des patrons de DP

11.3.1 Généralités

Pour évaluer l'état de l'enroulement statorique, il convient d'utiliser le patron de DP (Figure 8), enregistré lors des mesurages périodiques ou lors d'une surveillance continue, afin de déterminer le type spécifique de toute activité de DP dans l'enroulement statorique de la machine.

Lors de l'utilisation des patrons de DP, il peut être possible de séparer les différentes sources de DP les unes des autres et d'établir l'évolution de leur comportement de DP séparément. Les techniques décrites à l'Annexe B pour la séparation du bruit et des perturbations des sources de DP peuvent également être utilisées pour séparer les différentes sources de DP. L'identification du type et de l'emplacement spécifiques de toute activité de DP dans l'enroulement permet également d'apprécier le risque associé aux sources de DP individuelles. Étant donné que chaque processus de DP peut avoir son propre niveau critique d'amplitude de DP, il n'est pas recommandé d'utiliser la seule amplitude de DP comme indicateur du risque de défaillance prématurée.

11.3.2 Interprétation des patrons de DP

Le but de l'interprétation des patrons de DP est d'identifier la source de DP dominante et de séparer les DP qui proviennent des différentes sources de DP dans l'enroulement statorique. Ces informations permettent:

- d'observer le comportement évolutif de chaque source de DP;
- de fournir des informations approximatives relatives aux emplacements possibles des différents phénomènes de DP;
- d'évaluer l'état du système d'isolation selon la source et le type de DP, et d'acquiescer de l'expérience sur le type d'enroulement statorique concerné. Pour des informations détaillées sur l'appréciation du risque, se reporter à l'IEC 60034-27-1.

Lors de l'analyse de patrons de DP, l'interprétation la plus pertinente peut être effectuée par:

- le suivi d'évolution dans la durée du patron de DP sur la même machine, à l'aide du même système de mesure des DP;
- une comparaison des patrons de DP détectées simultanément de différentes phases d'une seule machine, à l'aide du même système de mesure des DP;
- une comparaison des patrons de DP de plusieurs machines de même conception, à l'aide du même système de mesure des DP.

Pour faciliter la comparaison entre les mesurages, il convient d'utiliser une base de données adaptée des mesurages de DP. En théorie, il convient que cette base de données contienne un historique complet du comportement de DP et des informations sur le fonctionnement et la maintenance de chaque machine en essai. Avec certaines restrictions, une telle base de données peut également être utilisée pour la comparaison directe des mesurages de DP avec ceux de machines de conception et de système d'isolation similaires, ce qui fournit d'autres informations utiles.

La relation spécifique entre la source de la DP, son comportement type ainsi que ses implications concernant le risque de défaut d'isolement de l'enroulement statorique, est généralement fondée sur l'expérience passée, vérifiée dans la pratique.

L'Annexe C présente quelques exemples de l'aspect principal des patrons de DP et donne quelques règles générales d'interprétation qui peuvent souvent être appliquées pour les DP des enroulements statoriques.

11.4 Effet des facteurs de fonctionnement des machines

11.4.1 Généralités

L'analyse de l'effet de différents facteurs de fonctionnement des machines permet d'obtenir des informations supplémentaires sur le mécanisme probable de détérioration. En particulier, l'influence de la charge et de la température sur le comportement spécifique de DP peut être utilisée efficacement pour identifier les mécanismes de détérioration types qui entraînent des DP de l'enroulement statorique.

11.4.2 Facteurs de fonctionnement de la machine

Les principaux facteurs de fonctionnement de la machine qui influencent le comportement de DP sont les suivants:

a) conditions de charge:

les conditions de charge de la machine données comme charge active et réactive sont caractérisées par le courant statorique réel, la tension statorique et le facteur de puissance. Ces paramètres déterminent directement la température de l'enroulement et du stator de la machine, ainsi que les contraintes électriques et mécaniques sur le système d'isolation de l'enroulement statorique;

b) mode de fonctionnement de la machine:

le mode de fonctionnement d'une machine, qui peut fonctionner en charge de pointe ou en charge de base, peut influencer sur le comportement au vieillissement du système d'isolation de l'enroulement statorique en raison des contraintes thermiques et mécaniques;

c) système de refroidissement:

selon la puissance assignée de la machine, différents systèmes de refroidissement sont utilisés. L'enroulement statorique peut être refroidi directement ou indirectement par l'air ou par l'hydrogène, voire directement par l'eau. Les différentes méthodes de refroidissement et les différentes conceptions dépendant du type influencent de manière significative la contrainte thermomécanique des composants de l'enroulement statorique. De plus, pour les machines refroidies par gaz, la pression du gaz de refroidissement influence l'activité de DP;

d) conditions ambiantes:

les principaux facteurs d'influence de l'environnement sur le comportement de DP de la machine sont l'humidité et notamment la contamination, comme la graisse partiellement conductrice, la poussière, l'huile, etc., qui peut, par exemple, se produire dans les machines refroidies par l'air à circuit ouvert.

En raison de ces facteurs d'influence, pour l'analyse du comportement de DP en corrélation avec les conditions de fonctionnement de la machine, il est recommandé d'enregistrer les paramètres de fonctionnement selon 9.2. Les conditions de charge transitoires, telles que la montée en puissance rapide ou la réduction soudaine de la charge, fournissent des informations supplémentaires importantes sur le comportement de la source de DP en fonction de la charge, si la surveillance continue en fonctionnement des DP, associée à l'évolution des paramètres de fonctionnement est utilisée, voir 11.4.4.

11.4.3 Conditions de charge en régime permanent

Lors de mesurages en fonctionnement périodiques, il est nécessaire que les conditions de charge soient les mêmes pour chaque mesurage afin de pouvoir comparer les mesurages ultérieurs et évaluer de manière fiable le comportement évolutif, voir 9.4. De plus, il est nécessaire de déterminer si les conditions de bruit pour effectuer les mesurages ont varié.

Pour assurer des états de machine comparables, il est nécessaire d'enregistrer les facteurs de fonctionnement mentionnés en 11.4.2. Lorsque les états de machine sont identiques pour des mesurages ultérieurs, et les paramètres d'évolution ou les patrons de DP présentent des écarts importants entre les mesurages, ces éléments peuvent alors indiquer des variations de l'état du système d'isolation des enroulements. Dans ce cas, il est nécessaire d'identifier les conditions de perturbation éventuellement modifiées, tout comme il convient de déterminer le type de source de DP selon la forme caractéristique des patrons de DP.

Pour une vérification plus approfondie du type et/ou de l'emplacement des sources de DP, une variation systématique des paramètres de fonctionnement de la machine, comme cela est décrit au paragraphe suivant, est très utile.

11.4.4 Conditions de charge transitoires

Les variations des paramètres d'évolution de DP et/ou des patrons de DP par rapport aux paramètres de fonctionnement peuvent aider à identifier la source de DP et sa gravité relative.

- a) Variation avec la charge: lorsque la température et la tension sont maintenues constantes, une variation des amplitudes de DP dans la demi-onde de tension négative entre la faible charge et la forte charge indique un desserrement des bobines/barres dans les encoches statoriques. Cet effet est dû à des forces électromagnétiques plus grandes qui agissent sur l'enroulement à une charge plus élevée. De tels signes méritent d'être étudiés rapidement, car l'érosion de la paroi isolante thermodurcissable provoquée par la combinaison d'une décharge d'encoche et de vibrations électromécaniques peut être rapide.
- b) Variation avec le facteur de puissance: lorsque la température et la tension sont maintenues constantes, une variation du facteur de puissance permet de distinguer la DP provoquée par des champs électriques élevés et des effets d'arc dus à des forces de courant électromagnétique. Ce phénomène peut être identifié avec le patron de DP, car, contrairement à la DP qui résulte de champs électriques élevés, les effets d'arc entraînés par des forces électromagnétiques produisent des déphasages types des impulsions de DP dans le patron de décharge.
- c) Variation avec la température: lorsque la charge et la tension sont maintenues constantes, une variation des amplitudes de DP en fonction de l'augmentation ou de la diminution de la température indique généralement des décharges qui proviennent principalement de la partie encoche de l'enroulement. Ce phénomène peut constituer une indication de délamination entre le conducteur interne et l'isolation (l'augmentation de la température diminuant la DP) ou entre les couches de l'isolation principale (où la DP augmente avec l'augmentation de la température en cas de détérioration du revêtement semi-conducteur), voire une indication de décharges d'encoche. L'influence des variations de température sur le comportement de DP à partir de la zone de la développante ne peut être évaluée.
- d) Variation avec la pression du gaz: lorsque la pression du gaz peut être modifiée, il peut être possible d'effectuer des mesurages des DP à des pressions de gaz différentes. Ces résultats peuvent être utiles pour confirmer les sources de DP. S'il y a une augmentation de la DP avec la diminution de la pression, la DP se produit à l'intérieur de l'enveloppe de la machine électrique tournante et non à l'extérieur de ladite machine.
- e) Variation avec l'humidité: l'humidité du gaz de refroidissement environnant influe sur le comportement des décharges superficielles. Une DP plus faible a été attribuée aux surfaces des extrémités de bobines lorsque l'humidité est élevée, en raison d'un effet de répartition de champ homogène sur la surface de l'enroulement. Toutefois, en présence d'une contamination importante, une humidité plus élevée peut entraîner la formation de chemins conducteurs locaux qui entraînent des décharges superficielles supplémentaires. Une DP dans l'isolation principale ne varie pas avec l'humidité.

12 Rapport d'essai

Il convient que le rapport d'essai contienne toutes les données nécessaires à une analyse ultérieure des évolutions, ainsi qu'une recommandation claire à l'attention de l'opérateur qui concerne l'état de la machine. Pour une analyse approfondie des données, les informations suivantes doivent être incluses dans le rapport d'essai – les données obligatoires sont marquées d'un (*). L'opérateur doit s'efforcer de recevoir les données demandées.

RAPPORT D'ESSAI DE DÉCHARGES PARTIELLES EN FONCTIONNEMENT

Date (*):

Client (*):

Installation (*):

Unité (*):

Responsable de la sécurité:

Opérateur(s)

Nom	Fonction

(ajouter des lignes supplémentaires si nécessaire)

Détecteur Fabricant (*): Type (*): Numéro de série (*): Bande passante: Unité de sortie (mV/pC):	Détecteur de DP Fabricant: année de fabrication: type: capacitif HFCT coupleur à encoche de stator Capacité (le cas échéant): distance entre le détecteur et le point de connexion:
Contrôle de sensibilité: indiquer si un essai à l'arrêt a été réalisé précédemment pour vérifier la sensibilité de la chaîne de mesure ou pour étalonner ladite chaîne; faire référence à tout rapport précédent le cas échéant.	

Point(s) de fonctionnement lors des essais de DP

Température ambiante (*):

Humidité relative ambiante (*):

Tension	Puissance active	Puissance réactive	Température d'enroulement moyenne	Pression du milieu de refroidissement	Temps
kV (*)	MW (*)	Mvar (*)	°C (*)	MPa (*)	(*)

(ajouter des lignes supplémentaires si nécessaire)

DONNÉES RELATIVES À LA MACHINE

Les données suivantes ont été fournies le (date) _____ par M/Mme:

– Données de la plaque signalétique:

Fabricant (*):

Type et numéro de série (*):

Année de fabrication (*):

Tension assignée (kV) (*):

Puissance assignée (MVA) (*):

Facteur de puissance assignée (*):

Fréquence (Hz) (*):

Vitesse (t/min) (*):

Nombre de circuits parallèles:

Système de refroidissement du stator (*):

Indirect: air/hydrogène/dioxyde de carbone

Direct: air/hydrogène/eau

Pression assignée du milieu de refroidissement (le cas échéant):

– Données du système d'isolation:

Classe d'isolation (*):

Fabricant (en cas de rebobinage):

Technique de fabrication (riche en résine/VPI unique/VPI globale):

Type de système de répartition (peinture/rubans):

Dernier rebobinage annuel (le cas échéant):

Dernier recalage annuel (le cas échéant):

– Environnement externe:

Capacité et distance par rapport aux condensateurs de surtension, le cas échéant:

Distance entre la machine et le transformateur:

– Données de fonctionnement:

Type de centrale thermique (charbon/pétrole/gaz/hydraulique/nucléaire):

Mode de fonctionnement (continu/intermittent):

Mode veille (chaud/froid, applicable uniquement aux unités intermittentes):

Il convient de consigner les données suivantes à partir de la fabrication ou du dernier rebobinage (le cas échéant) jusqu'à ce jour:

Nombre de démarrages:

Nombre d'heures (*):

Charge moyenne:

Charge de crête:

Température d'enroulement moyenne:

Température d'enroulement maximale:

– Autres notes

Annexe A (informative)

Nature des DP dans les machines électriques tournantes

A.1 Types de DP dans les machines électriques tournantes

A.1.1 Généralités

Des décharges partielles sont toujours présentes à un certain niveau (en général, relativement bas), même sur de nouveaux enroulements, et peuvent se développer dans tout le système d'isolation de l'enroulement statorique en raison de techniques de fabrication spécifiques, de défauts de fabrication, du vieillissement normal en service ou d'un vieillissement anormal. La conception de la machine, la nature des matériaux utilisés, les méthodes de fabrication, les conditions de fonctionnement, etc. peuvent influencer fortement le nombre, l'emplacement, les caractéristiques, l'évolution et l'importance des décharges partielles. Pour une machine donnée, les sources de DP existantes peuvent être dans de nombreux cas identifiées et différenciées par leur comportement caractéristique de DP.

A.1.2 Décharges internes

A.1.2.1 Vacuoles

Bien que les procédés de fabrication soient conçus de manière à réduire le plus possible les vacuoles, une certaine proportion de vides est inévitablement observée. Par exemple, dans le système d'isolation des bandes de mica imprégné de résine, qui est couramment utilisé dans les machines électriques tournantes à haute tension, le mica présent dans le système d'isolation empêche les décharges partielles de se développer en un claquage complet. Tant que les vacuoles sont petites et que leur taille n'augmente pas de manière significative, la fiabilité de fonctionnement n'est pas réduite.

A.1.2.2 Délamination interne

Une délamination interne dans le système d'isolation principale peut être provoquée par un traitement thermique imparfait du système d'isolation, lors de la fabrication, ou par des contraintes mécaniques ou thermiques excessives en cours de fonctionnement. Des vides de taille importante peuvent se former sur une surface appréciable et être à l'origine de décharges d'une énergie relativement élevée qui peuvent attaquer de manière significative le système d'isolation. La délamination réduit tout particulièrement la conductivité thermique du système d'isolation, ce qui peut conduire à une accélération du vieillissement. Par conséquent, il est nécessaire d'accorder une attention particulière à la délamination lors de l'évaluation de l'activité de DP.

A.1.2.3 Décollement entre conducteurs et isolation

Les cycles thermiques peuvent provoquer un décollement à l'interface du conducteur et de l'isolation principale. Ce décollement peut générer des décharges partielles (à l'exception des barres avec protection interne contre l'effet couronne) qui peuvent rapidement entraîner une défaillance, notamment dans les bobines multispaires.

A.1.2.4 Arborescence électrique

L'arborescence électrique dans le système d'isolation d'une machine constitue un processus de vieillissement dans lequel de fins canaux d'érosion se propagent dans l'époxy autour des barrières de mica et peuvent finalement conduire à un claquage électrique de l'isolation principale. L'arborescence électrique peut commencer en tout point du champ électrique localement renforcé dans le système d'isolation, par exemple, les structures rugueuses du conducteur interne, les impuretés de l'isolation, les vides remplis de gaz ou les délaminations dans l'isolation. Ce processus est associé à une activité de décharges partielles internes.

A.1.3 Décharges d'encoche

Dans les machines à haute tension, les décharges d'encoche se développent dans le cas où le revêtement conducteur de la partie couverte par les encoches est endommagé ou insuffisant. Des décharges plus importantes se développent lorsque des dommages mécaniques importants sont déjà présents, ce qui peut entraîner des dommages supplémentaires à l'isolation principale et finalement un défaut d'isolement. Les décharges d'encoche sont généralement provoquées par des champs électriques localement renforcés, et ces processus ne se produisent donc qu'à l'extrémité de tension supérieure de chaque phase. Le temps absolu entre la détection de ce phénomène et le défaut final d'isolement est généralement inconnu. Toutefois, par rapport à d'autres effets de détérioration types, ce temps peut être relativement court, notamment en présence de vibrations de barres/bobines. Ainsi, une détection fiable à un stade précoce est nécessaire pour décider si des actions correctives appropriées sont exigées.

A.1.4 Décharges dans la développante

A.1.4.1 Généralités

Des décharges partielles peuvent se produire à plusieurs endroits dans la zone de la développante en cas de champs électriques localement élevés. De telles décharges se développent généralement aux interfaces entre différents éléments de la tête de bobine du stator.

A.1.4.2 Décharges superficielles

Les décharges superficielles se produisent généralement lorsque le champ électrique le long d'une surface dépasse le champ de rupture du gaz environnant. Ce phénomène peut se produire en l'absence de revêtement de protection anti-effluves ou lorsque le revêtement de protection anti-effluves de la développante perd de son efficacité en raison d'une mauvaise conception des interfaces, d'une contamination, d'une porosité, d'effets thermiques, etc. Lorsqu'une répartition fiable du champ électrique n'est plus assurée, des décharges superficielles se développent et peuvent être à l'origine d'une érosion progressive des matériaux. Il s'agit normalement d'un mécanisme de défaillance très lent, bien que le comportement de DP puisse connaître des variations relativement rapides dues à des effets superficiels.

A.1.4.3 Décharges entre phases

Des décharges partielles peuvent se produire entre les phases, par exemple en raison de distances d'isolement inadéquates entre les phases ou au niveau des éléments du support des têtes de bobine, comme les entretoises ou les cordons. En fonction des informations détaillées spécifiques de conception, ces décharges peuvent avoir des amplitudes élevées et peuvent se produire sous forme soit de décharges superficielles soit de décharges internes. Le temps entre la détection de ce phénomène et le défaut final d'isolement est donc incertain. Les décharges entre phases peuvent produire un claquage entre phases.

A.1.5 Particules conductrices

Les particules conductrices, notamment les petites particules, dues par exemple à une contamination de l'enroulement, peuvent provoquer une forte concentration localisée de décharges partielles.