

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**CEI
IEC**

TECHNICAL SPECIFICATION

TS 60034-27

Première édition
First edition
2006-12

Machines électriques tournantes –

Partie 27:

**Mesures à l'arrêt des décharges partielles
effectuées sur le système d'isolation des
enroulements statoriques des machines
électriques tournantes**

Rotating electrical machines –

Part 27:

**Off-line partial discharge measurements
on the stator winding insulation of rotating
electrical machines**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TS 60034-27:2006

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

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

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**CEI
IEC**

TECHNICAL SPECIFICATION

TS 60034-27

Première édition
First edition
2006-12

Machines électriques tournantes –

Partie 27:

**Mesures à l'arrêt des décharges partielles
effectuées sur le système d'isolation des
enroulements statoriques des machines
électriques tournantes**

Rotating electrical machines –

Part 27:

**Off-line partial discharge measurements
on the stator winding insulation of rotating
electrical machines**

© IEC 2006 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XA

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	6
INTRODUCTION.....	10
1 Domaine d'application	14
2 Références normatives.....	14
3 Termes et définitions	14
4 Nature des DP dans les machines tournantes.....	18
4.1 Notions élémentaires sur les DP.....	18
4.2 Types de DP dans les machines tournantes	20
4.3 Propagation des impulsions dans les enroulements.....	22
5 Techniques et appareils de mesure	24
5.1 Généralités.....	24
5.2 Influence de la réponse en fréquence du système de mesure.....	24
5.3 Effets des ensembles de couplage des DP	26
5.4 Systèmes de mesure à large bande et à bande étroite.....	28
6 Visualisation des mesures	32
6.1 Généralités.....	32
6.2 Etendue minimale de la présentation des données relatives aux DP.....	32
6.3 Moyens supplémentaires de représentation des données relatives aux DP.....	34
7 Circuits d'essai.....	38
7.1 Généralités.....	38
7.2 Composants individuels d'enroulement.....	38
7.3 Enroulement complet.....	42
8 Normalisation des mesures	46
8.1 Généralités.....	46
8.2 Composants individuels d'enroulement.....	48
8.3 Enroulements complets.....	48
9 Modes opératoires d'essai.....	52
9.1 Réalisation de mesures de DP au niveau des enroulements et des composants d'enroulements	52
9.2 Identification et localisation de la source de décharges partielles	60
10 Interprétation des résultats d'essai	62
10.1 Généralités.....	62
10.2 Interprétation relative à la TADP, à la TEDP et à Q_m	64
10.3 Identification des patrons de DP.....	68
11 Rapport d'essai	72
Annexe A (informative) Mesures en fonctionnement des décharges partielles.....	78
Annexe B (informative) Méthodes non électriques de détection des DP et méthodes de localisation de celles-ci.....	82
Annexe C (informative) Bruit d'origine externe, perturbations et sensibilité	84
Annexe D (informative) Méthodes de suppression des perturbations.....	90
Annexe E (informative) Interprétation des données d'amplitude des DP et des patrons de DP résolus en phase.....	102

CONTENTS

FOREWORD.....	7
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	15
2 Normative references	15
3 Terms and definitions	15
4 Nature of PD in rotating machines	19
4.1 Basics of PD	19
4.2 Types of PD in rotating machines	21
4.3 Pulse propagation in windings	23
5 Measuring techniques and instruments.....	25
5.1 General.....	25
5.2 Influence of frequency response of measurement system.....	25
5.3 Effects of PD coupling units.....	27
5.4 Wide-band and narrow band measuring systems.....	29
6 Visualization of measurements	33
6.1 General.....	33
6.2 Minimum scope of PD data presentation.....	33
6.3 Additional means of PD data representation	35
7 Test circuits.....	39
7.1 General.....	39
7.2 Individual winding components.....	39
7.3 Complete winding.....	43
8 Normalization of measurements	47
8.1 General.....	47
8.2 Individual winding components	49
8.3 Complete windings	49
9 Test procedures	53
9.1 Acquiring PD measurements on windings and winding components.....	53
9.2 Identifying and locating the source of partial discharges	61
10 Interpretation of test results.....	63
10.1 General.....	63
10.2 Interpretation of PDIV, PDEV and Q_m	65
10.3 PD pattern recognition.....	69
11 Test report.....	73
Annex A (informative) On-line partial discharge measurements.....	79
Annex B (informative) Non-electrical methods of PD detection and methods for localization	83
Annex C (informative) External noise, disturbance and sensitivity.....	85
Annex D (informative) Methods of disturbance suppression	91
Annex E (informative) Interpretation of PD magnitude data and phase resolved PD patterns	103

Bibliographie.....	110
Figure 1 – Réponse en fréquence d'une impulsion de DP et dispositifs de couplage de différentes constantes de temps	26
Figure 2 – Réponses impulsionnelles types de systèmes de mesure de DP à large bande et à bande étroite	30
Figure 3 – Amplitude des DP en fonction de la tension d'essai normalisée $Q_m = f(U/U_{\max})$	34
Figure 4 – Exemple d'un patron $\phi-q-n$ de décharges partielles où les DP ont été mesurées à l'aide d'un dispositif de couplage monté en série et relié à l'objet soumis à essai, conformément à la Figure 5b, en adoptant un code de couleurs pour le nombre d'impulsions $H(n)$	36
Figure 5 – Circuits d'essai conformes à la CEI 60270	40
Figure 6 – Circuit d'essai destiné à la mesure des DP (S1.1) au niveau d'un enroulement complet	42
Figure 7 – Normalisation du circuit d'essai pour la mesure S1.1	50
Figure 8 – Tension appliquée à l'objet d'essai durant la mesure des DP	56
Figure 9 – Exemple pour l'identification et la localisation de sources de DP	70
Figure C.1 – Mise en charge de l'objet soumis à essai par diverses composantes de courant	86
Figure D.1 – Sans masquage des fenêtres	90
Figure D.2 – Avec masquage des fenêtres	90
Figure D.3 – Courants d'impulsion à travers le circuit de mesure	92
Figure D.4 – Exemple d'élimination de bruit	98
Figure D.5 – Exemple d'élimination de la diaphonie	100
Figure E.1 – Exemple de patrons de DP	104
Tableau 1 – Schéma de connexion S1 pour montage en étoile ouvert.....	44
Tableau 2 – Schéma de connexion S2 pour montage en étoile fermé.....	44
Tableau 3 – Schéma de connexion E1 pour montage en étoile ouvert.....	46
Tableau 4 – Schéma de connexion E2 pour montage en étoile fermé.....	46
Tableau E.1 – Risques associés aux sources principales de DP dans les machines tournantes	106

Bibliography.....	111
Figure 1 – Frequency response of a PD pulse and coupling units of various time constants.....	27
Figure 2 – Typical pulse responses of wide band and narrow band PD systems.....	31
Figure 3 – PD magnitude as a function of the normalized test voltage $Q_m=f(U/U_{max})$	35
Figure 4 – Example of a ϕ - q - n partial discharge pattern where the PD was measured in series with the test object in accordance with Figure 5b, with colour code for the pulse number $H(n)$	37
Figure 5 – Basic test circuits in accordance with IEC 60270.....	41
Figure 6 – Test circuit for PD measurement (S1.1) on complete winding	43
Figure 7 – Normalization of the test circuit for measurement S1.1.....	51
Figure 8 – Test voltage applied to the test object during PD measurement.....	57
Figure 9 – Example for identification and localization of PD sources.....	71
Figure C.1 – Recharging of the test object by various current components.....	87
Figure D.1 – Without window masking.....	91
Figure D.2 – With window masking	91
Figure D.3 – Pulse currents through the measuring circuit.....	93
Figure D.4 – Example of noise rejection.....	99
Figure D.5 – Example of cross-talk rejection.....	101
Figure E.1 – Example PD patterns	105
Table 1 – Connection diagram S1 for open star point.....	45
Table 2 – Connection diagram S2 for closed star point	45
Table 3 – Connection diagram E1 for open star point.....	47
Table 4 – Connection diagram E2 for closed star point	47
Table E.1 – Risks associated with the main PD sources in rotating machines	107

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27: Mesures à l'arrêt des décharges partielles effectuées sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes

AVANT-PROPOS

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

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'une spécification technique

- lorsqu'en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale, ou
- lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou quand, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat.

Les spécifications techniques font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines

FOREWORD

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

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical specification when

- the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts, or
- the subject is still under technical development or where, for any other reason, there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard.

Technical specifications are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards.

La CEI 60034-27, qui est une spécification technique, a été établie par le comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

Le texte de cette spécification technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
2/1384/DTS	2/1395A/RVC

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

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

Une liste de toutes les parties de la CEI 60034, sous le titre général *Machines électriques tournantes*, est disponible sur le site web de la CEI.

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

- transformée en Norme internationale,
- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IEC 60034-27, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

The text of this technical specification is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
2/1384/DTS	2/1395A/RVC

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

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

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

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

- transformed into an International standard,
- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

Depuis bien des années, la mesure des décharges partielles (DP) a servi comme un moyen précis permettant l'évaluation de la qualité d'un nouveau système d'isolation et comme moyen de détection de sources localisées de DP dans les anciens systèmes d'isolation électrique des enroulements dues aux contraintes opérationnelles en cours de fonctionnement. Comparées à d'autres essais diélectriques (c'est-à-dire la mesure de la tangente de l'angle de pertes ou de la résistance d'isolement), les mesures des décharges partielles offrent une caractéristique distinctive dans la mesure où elles permettent d'identifier les insuffisances localisées du système d'isolation.

Les essais de DP réalisés dans les machines tournantes servent également au contrôle de la qualité de l'assemblage et de la finition de nouveaux enroulements statoriques, de nouveaux composants d'enroulements (par exemple bobines et barres préformées, traversées H.T., etc.) et de stators à imprégnation globale.

En matière d'entretien courant, de dépannage et de révision des machines tournantes, la mesure des décharges partielles peut fournir également des informations sur:

- les faiblesses et insuffisances du système d'isolation;
- les processus de vieillissement;
- les mesures supplémentaires à prendre et les intervalles entre les opérations de révision périodiques.

Bien que les essais réalisés sur les DP dans les machines tournantes soient largement admis et acceptés, plusieurs études ont montré que non seulement il existe de multiples et diverses méthodes de mesure, mais également que les critères et méthodes d'analyse et d'évaluation finale des données mesurées sont souvent très différents et qu'ils ne sont pas réellement comparables. Par conséquent, il existe une nécessité impérieuse qui requiert la mise à disposition de certaines recommandations à l'attention des utilisateurs qui envisagent le recours aux mesures des DP pour les besoins d'évaluation de l'état de leurs systèmes d'isolation.

Les essais relatifs aux décharges partielles dans les enroulements statoriques peuvent être divisés en deux grands groupes:

- a) les mesures à l'arrêt effectuées avec l'enroulement statorique désaccouplé du réseau, une source d'alimentation séparée étant alors utilisée pour la mise sous tension de l'enroulement;
- b) les mesures en fonctionnement effectuées sur le système au cours desquelles la machine tournante est en condition normale de fonctionnement et reliée au réseau.

Ces deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients lorsqu'elles sont comparées à une autre. A cet effet, l'Annexe A traite brièvement des mérites des essais en fonctionnement réalisés sur le système ainsi que de leurs inconvénients. Cependant, dans la mesure où l'utilisation des méthodes de mesure en fonctionnement est largement répandue à travers le monde et considérant leur utilité éprouvée pour l'industrie, la présente spécification technique traite exclusivement des techniques de mesure à l'arrêt. Cette approche est jugée nécessaire et elle vise à faire de la présente étude un document condensé et concis qui s'adresse aux non-spécialistes dans le domaine des essais portant sur les DP.

INTRODUCTION

For many years, the measurement of partial discharges (PD) has been employed as a sensitive means of assessing the quality of new insulation as well as a means of detecting localized sources of PD in used electrical winding insulation arising from operational stresses in service. Compared with other dielectric tests (i.e. the measurement of dissipation factor or insulation resistance) the differentiating character of partial discharge measurements allows localized weak points of the insulation system to be identified.

The PD testing of rotating machines is also used when inspecting the quality of new assembled and finished stator windings, new winding components (e.g. form-wound coils and bars, HV bushings, etc.) and fully impregnated stators.

In connection with the servicing and overhaul of rotating machines, the measurement of partial discharges can also provide information on:

- points of weakness in the insulation system;
- ageing processes;
- further measures and intervals between overhauls.

Although the PD testing of rotating machines has gained widespread acceptance, 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 an urgent need to give some guidance to those users who are considering the use of PD measurements to assess the condition of their insulation systems.

Partial discharge testing of stator windings can be divided into two broad groups:

- a) off-line measurements, in which the stator winding is isolated from the power system and a separate power supply is employed to energize the winding;
- b) on-line measurements, in which the rotating machine is operating normally and connected to the power system.

Both of these approaches have advantages and disadvantages with respect to one another. A brief discussion of the merits of on-line testing, as well as the drawbacks, is provided in Annex A. However, while acknowledging the extensive world-wide use of on-line methods and their proven value to industry, this technical specification is confined to off-line techniques. This approach is considered necessary to render this specification sufficiently concise to be of use by non-specialists in the field of PD testing.

Réserves:

Lors des essais réalisés sur les enroulements statoriques, divers types d'appareils de mesure des DP donneront inévitablement des résultats différents; par conséquent, les mesures des DP ne seront alors comparables que dans certaines conditions. De ce fait, les limites absolues en matière d'enroulements de machines tournantes, telles que par exemple les critères d'acceptation de la production ou d'exploitation, sont difficiles à déterminer. Cela s'explique essentiellement par le phénomène de propagation impulsionnelle, par les difficultés d'étalonnage, par les caractéristiques spécifiques de réponse en fréquence des enroulements statoriques et par les systèmes de mesure des DP.

En outre, la gravité des détériorations, et par conséquent le risque de défaillance du système d'isolation dépendent du type spécifique de source de DP et de son emplacement à l'intérieur du système d'isolation des enroulements statoriques qui peuvent influencer dans une large mesure les résultats des essais.

Les limites empiriques vérifiées dans la pratique peuvent être utilisées comme base d'évaluation des résultats des essais. De plus, il est recommandé de procéder à l'évaluation de l'évolution des DP et à des comparaisons avec d'autres machines de conception similaire et disposant d'un système d'isolation semblable ayant fait l'objet de mesures effectuées dans des conditions similaires en mettant en œuvre les mêmes appareils de mesure, et ce afin d'apprécier de manière fiable l'état du système d'isolation des enroulements statoriques.

Il convient que les utilisateurs des données de mesure des DP soient conscients du fait que compte tenu des principes méthodologiques, la mesure des décharges partielles ne permet pas d'identifier tous les problèmes liés au système d'isolation des enroulements statoriques (par exemple défauts d'isolation impliquant des courants de fuite permanents dus aux interconnexions entre différents éléments du système d'isolation ou à des phénomènes de décharges non impulsionnelles).

Pour les essais portant sur les composants individuels des enroulements, les réserves formulées concernant les phénomènes de propagation des impulsions ne sont pas à prendre en considération lors de l'interprétation des résultats de mesure.

Limitations:

When stator windings are being tested different types of PD measuring instruments will inevitably produce different results and consequently PD measurements will only be comparable under certain conditions. Therefore, absolute limits for the windings of rotating machines, for example as acceptance criteria for production or operation, are difficult to define. This is mainly due to pulse propagation phenomena, specific difficulties with calibration and the individual frequency response characteristics of stator windings and PD measuring systems.

In addition, the degree of deterioration, and hence the risk of insulation system failure, depends on the specific type of PD source and its location within the stator winding insulation, both of which can influence the test results very significantly.

Empirical limits verified in practice can be used as a basis for evaluating test results. Furthermore, PD trend evaluation and comparisons with machines of similar design and similar insulation system measured under similar conditions, using the same measurement equipment, are recommended to ensure reliable assessment of the condition of the stator winding insulation.

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 partial discharges (e.g. insulation failures involving continuous leakage currents due to conductive paths between different elements of the insulation or pulseless discharge phenomena).

For testing individual winding components, the limitations due to pulse propagation phenomena need not be considered when interpreting the results of measurements.

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 27: Mesures à l'arrêt des décharges partielles effectuées sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60034 présente des modalités communes concernant

- les techniques de mesure et les appareils de mesure,
- la mise en place des circuits d'essai,
- les procédures de normalisation et les modes opératoires d'essai,
- la réduction du bruit,
- la documentation des résultats des essais,
- l'interprétation des résultats des essais

pour les besoins des mesures à l'arrêt des décharges partielles dans les systèmes d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes soumises à l'essai pour des tensions alternatives à fréquence inférieure ou égale à 400 Hz. Cette spécification technique s'applique aux machines tournantes disposant de barres ou de bobines préformées avec à revêtement conducteur en encoche. Cela est généralement valable pour les machines dont la tension assignée est supérieure ou égale à 6 kV. Les méthodes de mesure décrites dans cette spécification peuvent s'appliquer également aux machines sans revêtement conducteur appliqué aux encoches. Toutefois, les résultats peuvent être différents et ce cas n'est pas traité dans cette spécification.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

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

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

CEI 60270:2000, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions d'ordre général et relatifs aux mesures des décharges partielles donnés dans la CEI 60270 s'appliquent ainsi que les suivants.

3.1

mesure à l'arrêt

mesure effectuée alors que la machine tournante est à l'arrêt, la machine étant alors hors circuit et non reliée au réseau

NOTE La tension d'essai nécessaire est appliquée à l'enroulement à partir d'une source de tension distincte.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines

1 Scope

This part of IEC 60034 which is a technical specification provides a common basis for

- measuring techniques and instruments,
- the arrangement of test circuits,
- normalization and testing procedures,
- noise reduction,
- the documentation of test results,
- the interpretation of test results

with respect to partial discharge off-line measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines when tested with alternating voltages up to 400 Hz. This technical specification applies to rotating machines having bars or form wound coils with conductive slot coating. This is usually valid for machines with voltage rating of 6 kV and higher. The measurement methods described in this specification may also be applied to machines without conductive slot coating. However, results may be different and are not covered by this specification.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

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

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

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the general terms and definitions for partial discharge measurements given in IEC 60270 apply, together with the following.

3.1

off-line measurement

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

NOTE The necessary test voltage is applied to the winding from a separate voltage source.

3.2

mesure en fonctionnement

mesure effectuée alors que la machine tournante est en condition normale de fonctionnement

3.3

revêtement de protection anti-effluves

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

NOTE Le revêtement de protection anti-effluves réduit les contraintes dues au champ électrique le long de la développante 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.

3.4

revêtement d'encoches conducteur

couche de peinture ou ruban conducteur parfaitement en contact avec le mur isolant de mise à la terre dans la partie couverte par les encoches des bobines, souvent désigné par revêtement conducteur

NOTE Ce revêtement assure un bon contact électrique avec le noyau statorique.

3.5

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

3.6

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 noyau statorique mis à la terre

3.7

décharges internes

décharges qui se produisent à l'intérieur du système d'isolation

3.8

décharges superficielles

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

3.9

distribution d'amplitude d'impulsions

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

3.10

distribution de phase des impulsions

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

3.11

patron de décharges partielles

représentation graphique de la distribution de l'amplitude des DP en fonction de leur phase sur le cycle alternatif pour visualiser le comportement des DP pendant un temps de mesure prédéfini et utilisant des paramètres spécifiques aux DP

3.2**on-line measurement**

measurement taken with the rotating machine in normal operation

3.3**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 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.

3.4**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 This coating provides good electrical contact to the stator core.

3.5**resistance temperature detector****RTD**

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

3.6**slot discharges**

discharges that occur between the outer surface of the slot portion of a coil or bar and the grounded core laminations

3.7**internal discharges**

discharges that occur within the insulation system

3.8**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

3.9**pulse height distribution**

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

3.10**pulse phase distribution**

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

3.11**partial discharge pattern**

PD distribution map of PD magnitude vs a.c. cycle phase position, for visualization of the PD behaviour during a predefined measuring time, in which specific PD parameters are used for graphical representation

3.12

dispositif de couplage

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

NOTE 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 des signaux de tension d'essai et ses harmoniques ne parviennent à l'appareil de mesure.

3.13

ensemble de couplage des DP

condensateur de couplage à haute tension, de conception à faible inductance, et dispositif de couplage à basse tension montés en série

3.14

amplitude de la plus grande DP répétitive

Q_m

plus grande amplitude enregistrée par un système de mesure présentant une réponse à un train d'impulsions conforme aux exigences de 4.3.3 de la CEI 60270, ou amplitude associée à un taux de répétition des impulsions de DP de 10 impulsions par seconde, qui peut être directement déduit à partir d'une distribution d'amplitude d'impulsions

3.15

quantification normalisée des impulsions

NQN

zone normalisée en dessous d'une ligne droite tracée sous les comptages d'impulsions dans chaque fenêtre d'analyse de la distribution des impulsions en fonction de leur amplitude, dans laquelle les comptages d'impulsions sont exprimés en tant que logarithme du nombre d'impulsions par seconde, la fenêtre d'amplitude d'impulsions présentant une échelle linéaire

4 Nature des DP dans les machines tournantes

4.1 Notions élémentaires sur les DP

Généralement, les décharges partielles (DP) peuvent se produire à des endroits où les propriétés diélectriques des matériaux isolants sont hétérogènes. Dans de tels endroits, l'intensité du champ électrique peut être amplifiée. Les amplifications électriques locales peuvent conduire à un claquage local partiel. Ce claquage partiel ne provoque pas un claquage total du système d'isolation. Généralement, l'établissement des DP nécessite un volume de gaz, par exemple dans les vides remplis de gaz et noyés 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 de champ, à chaque défaut d'homogénéité, dépasse la limite de claquage. Ce processus peut se traduire par de multiples impulsions de DP au cours d'une période 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.

3.12**coupling device**

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

NOTE These signals are transmitted to the measuring instrument 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 instrument.

3.13**PD coupling unit**

a high voltage coupling capacitor of low inductance design and a low voltage coupling device in series

3.14**largest repeatedly occurring PD magnitude**

Q_m

the largest magnitude recorded by a measuring system which has the pulse train response in accordance with 4.3.3 of IEC 60270, or the magnitude associated with a PD pulse repetition rate of 10 pulses per second (pps), which can be directly inferred from a pulse height distribution

3.15**normalized quantity number**

NQN

normalized area under a straight line fitted to the pulse counts in each magnitude window of a pulse height analysis, in which the pulse counts are expressed as a logarithm of the pulses per second and the pulse magnitude window is a linear scale

4 Nature of PD in rotating machines**4.1 Basics of 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 partial breakdown does not result in a total breakdown of the insulation system. PD in general requires a gas volume to develop, for example in gas filled voids embedded in the insulation, adjacent to conductors or at insulation interfaces.

A partial discharge can occur when the local field strength of each inhomogeneity exceeds its breakdown field. 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, for example surface properties, kind of gas, gas pressure, etc.

Les systèmes d'isolation des enroulements statoriques des machines à haute tension connaissent généralement une certaine activité en termes de DP, mais ils présentent une résistance intrinsèque aux décharges partielles en raison de la présence de composants inorganiques en mica. Cependant, l'importance des DP dans ces machines est un signe généralement révélateur de la présence d'anomalies dans le système d'isolation, liées par exemple à des problèmes de fabrication ou à des détériorations dues au fonctionnement, plutôt qu'une cause directe de défaillance. Toutefois, compte tenu des processus individuels, les DP dans les machines peuvent également attaquer directement le système d'isolation et influencer ainsi le processus de vieillissement. La durée de fonctionnement avant défaillance peut ne pas avoir de rapport avec les niveaux de DP, mais elle dépend dans une large mesure d'autres facteurs tels, que par exemple, la température de fonctionnement, l'état des cales d'encoches, le degré de contamination, etc.

La mesure des DP et l'analyse de leur comportement spécifique peuvent être pleinement exploitées pour la maîtrise 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.

4.2 Types de DP dans les machines tournantes

4.2.1 Généralités

Les décharges partielles peuvent se développer à travers le système d'isolation des enroulements statoriques et elles peuvent être imputables à des technologies et des anomalies de fabrication et à un processus normal ou anormal de vieillissement en cours d'exploitation. La conception des machines, la nature des matériaux mis en œuvre, les méthodes de fabrication, les conditions de fonctionnement, etc. peuvent influencer profondément la grandeur, l'implantation, les caractéristiques, l'évolution et la portée des décharges partielles. Pour une machine donnée, les différentes sources de DP peuvent être dans de nombreux cas identifiées et localisées par le comportement caractéristique des décharges partielles.

4.2.2 Décharges internes

4.2.2.1 Vacuoles

Bien que les procédés de fabrication soient conçus de manière à réduire au minimum les vacuoles d'air, les bandes de mica imprégné de résine d'un système d'isolation, généralement utilisées dans les machines tournantes à haute tension, contiennent inévitablement une certaine proportion de vides. En fait, le mica mis en œuvre dans le système d'isolation empêche la propagation des décharges partielles de provoquer un claquage total. Tant que la taille des vacuoles demeure réduite et qu'elle n'évolue pas de manière significative, la fiabilité opérationnelle n'est pas affectée.

4.2.2.2 Délamination interne

Une délamination interne dans le système d'isolation de base 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 finit par attaquer de manière significative le système d'isolation. La délamination réduit tout particulièrement la conductivité thermique du dispositif d'isolement ce qui peut conduire à une accélération du processus de vieillissement, voire à un emballement thermique. Par conséquent, la délamination mérite une attention particulière et elle doit être prise en considération lors de l'évaluation de l'activité des décharges partielles.

Stator winding insulation systems for high voltage machines will normally 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 may not correlate with PD levels, but depends significantly on other factors, for example operating temperature, wedging conditions, 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.

4.2 Types of PD in rotating machines

4.2.1 General

Partial discharges 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 various PD sources may be identified and distinguished in many cases by their characteristic PD behaviour.

4.2.2 Internal discharges

4.2.2.1 Internal voids

Although manufacturing processes are designed to minimize internal voids, inevitably there is some void content in a resin impregnated mica tape insulation system that is normally used in high voltage rotating machines. Actually, 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.

4.2.2.2 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 or even a thermal runaway. Thus, delamination needs careful consideration when PD activity is being assessed.

4.2.2.3 Décollement entre conducteurs et matériaux d'isolation

Le décollement au niveau de l'interface entre le matériau conducteur en cuivre et l'isolation principale, généralement due aux variations excessives du cycle thermique, présente un danger dans la mesure où l'isolation des spires ou brins des conducteurs peut être gravement endommagée.

4.2.3 Décharges d'encoche

Dans les machines à haute tension, les décharges qui se produisent au niveau des encoches se développent en cas d'endommagement du revêtement conducteur de la partie couverte par les encoches dû au déplacement des barres/bobines à l'intérieur de l'encoche ou dans la zone extérieure adjacente aux encoches, par exemple par défaut de pression des cales d'encoches suite à un affaissement, une érosion du matériau, une abrasion ou une attaque par des produits chimiques ou en raison de défauts de fabrication. Les décharges à haute énergie se produisent en présence d'une détérioration mécanique déjà sérieuse, ce qui peut entraîner un endommagement supplémentaire de l'isolation principale et finalement un défaut d'isolement. Au stade précoce, les décharges d'encoche sont des étincelles dues aux vibrations plutôt que des décharges partielles classiques. Ce phénomène d'étincelles dues aux vibrations peut se produire également à des endroits à basse tension, par exemple à proximité du point de connexion en étoile de l'enroulement. Bien que le temps absolu entre le moment de détection de ce phénomène et l'occurrence d'une défaillance de l'isolation soit inconnu, mais éventuellement court, une détection fiable à un stade précoce est nécessaire dans la mesure où elle permet d'entreprendre une action corrective appropriée.

4.2.4 Décharges superficielles de développante

Des décharges partielles peuvent se produire à plusieurs endroits dans la zone de la développante et en cas de champs électriques localement élevés. De telles décharges se développent généralement aux interfaces entre différents éléments des développantes. Lorsque le revêtement de protection anti-effluves de la développante perd de son efficacité en raison d'une mauvaise conception des liaisons d'interface, de contamination, de porosité, d'effets thermiques, etc., une répartition efficace du champ électrique n'est plus assurée ce qui provoque le développement de décharges superficielles qui peuvent être à l'origine d'une érosion progressive des matériaux. Il s'agit généralement d'un lent mécanisme de défaillance, même si le comportement des DP peut connaître des variations relativement rapides dues à des effets superficiels. En outre, les DP peuvent se produire entre phases, par exemple en raison d'une distance d'isolement inadéquate entre interfaces, au niveau des éléments du support des développantes, ou entre phase et terre à la surface de la tête de bobine.

4.2.5 Particules conductrices

La présence de particules conductrices, particulièrement les petites particules, dues, par exemple, à une contamination de l'enroulement, peut provoquer une forte concentration localisée de décharges partielles. Celles-ci peuvent provoquer un "trou d'épingle" ou une "piqûre" dans l'isolation.

4.3 Propagation des impulsions dans les enroulements

A l'origine, un courant de décharges partielles peut être caractérisé par une impulsion transitoire d'un temps de montée de quelques nanosecondes seulement. Pour ces impulsions de DP 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. Par conséquent, le phénomène de propagation des impulsions de décharges partielles mérite d'être pris en considération. 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, telles qu'elles sont enregistrées aux bornes des enroulements, diffèrent de celles observées au point d'origine. Compte tenu de ce qui précède, les points suivants sont très importants pour l'interprétation des résultats de mesure des DP sur les machines tournantes:

4.2.2.3 Delamination between conductors and insulation

Delamination at the interface of the copper conductor and the main insulation that usually results from excessive thermal cycling is dangerous since the turn or strand insulation of the conductors can be severely damaged.

4.2.3 Slot discharges

Slot discharges in high voltage machines will develop when the conductive slot portion coating is damaged due to bar/coil movement in the slot or slot exit area, for example by a loss of wedging pressure due to settlement, erosion of the material, abrasion, chemical attack or manufacturing deficiencies. High-energy 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. In the early stage, slot discharges are rather vibration sparking than being classical partial discharges. This vibration sparking may also occur at low potential sites, for example close to the star point of the winding. Though the absolute time between detection of this phenomenon and final insulation failure is unknown, but could be short, reliable detection at an early stage is necessary to initiate appropriate remedial action.

4.2.4 End-winding surface discharges

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. If the stress control coating of the end-winding becomes ineffective because of poorly designed interfaces, contamination, porosity, thermal effects, etc. reliable field grading is no longer assured and 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. In addition, PD may occur between phases, for example due to inadequate interface clearance, at elements of the overhang support system or as phase to ground discharges on the end-winding surface.

4.2.5 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. This may result in a 'pin-hole' in the insulation.

4.3 Pulse propagation in windings

At its origin a partial discharge current can be characterized as a transient pulse with a rise time of only 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. 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 terminals of the winding differ from those at the point where it originates. With that in mind, the following points are very important for interpreting PD measurements taken on rotating machines:

- la fonction de transfert entre la source et le détecteur de DP est inconnue et dépend de la conception spécifique de la machine qui détermine la réponse en fréquence de l'enroulement statorique. Pour cette raison, l'énergie à la source des DP, qui peut être prise comme une mesure de l'effet érosif sur l'isolation, ne peut faire l'objet d'une mesure directe;
- en termes de transmission des hautes fréquences, le comportement individuel d'un enroulement statorique génère aux bornes des signaux de DP qui sont caractéristiques de la machine soumise à essai et de l'emplacement de la source des décharges partielles;
- les composantes très haute fréquence des signaux de DP subissent un affaiblissement considérable lors de leur propagation à travers l'enroulement et, en fonction de l'origine des décharges partielles, elles pourraient ne plus être détectables aux bornes de l'objet soumis à essai.

Par conséquent, les phénomènes évoqués ci-dessus suggèrent que la conception particulière des enroulements statoriques n'est pas la seule à influencer de manière significative les caractéristiques du signal détecté aux bornes de l'enroulement, mais que la réponse en fréquence spécifique du système de détection des DP, y compris les dispositifs de couplage, y contribuent également.

5 Techniques et appareils de mesure

5.1 Généralités

Conformément à la CEI 60270, le présent article traite seulement des méthodes électriques de mesure des décharges partielles car la mesure électrique et par conduction des décharges partielles est la méthode la plus communément utilisée pour l'évaluation du système d'isolation des enroulements des machines tournantes. L'Annexe B dresse une liste des méthodes non électriques de mesure et de localisation.

Les systèmes de mesure des décharges partielles peuvent être répartis en sous-systèmes: dispositif de couplage, système de transmission (par exemple câble de connexion ou liaison optique) et appareil de mesure. Généralement, le système de transmission ne contribue pas aux caractéristiques du circuit, hormis un certain affaiblissement éventuel des signaux, et il ne sera donc pas pris en considération.

5.2 Influence de la réponse en fréquence du système de mesure

La réponse en fréquence du système de détection des décharges partielles, y compris l'ensemble de couplage des DP, détermine la quantité d'énergie détectable au niveau du signal de DP provenant de l'enroulement. La réponse en fréquence du système, et tout particulièrement le type d'ensemble de couplage mis en œuvre, a donc un effet considérable sur la sensibilité globale du système de détection. En raison des différentes valeurs de la fréquence de coupure inférieure, les relations qualitatives suivantes sont fondamentalement applicables lors des essais portant sur des enroulements complets:

- la mesure dans la gamme de fréquences inférieure assure une bonne sensibilité non seulement aux décharges partielles dans les barres/bobines situées à proximité du détecteur mais également à celles dont la source est plus éloignée dans l'enroulement. Toutefois, la gamme de fréquences inférieure est plus exposée aux bruits et aux perturbations;
- la mesure dans la gamme des très hautes fréquences peut permettre de ne capter qu'une petite portion de l'énergie totale des décharges partielles, ce qui se traduit par une sensibilité aux seuls signaux issus des points situés à proximité immédiate du détecteur. Toutefois, cette gamme de fréquences peut être moins sensible aux bruits et aux perturbations.

Pour obtenir une sensibilité adéquate aux DP sur l'ensemble de l'enroulement, il est judicieux, lors des essais à l'arrêt, d'utiliser des systèmes de mesure de DP à large bande. Conformément à la CEI 60270, il convient que la fréquence de coupure inférieure se situe dans une gamme de quelques dizaines de kHz.

- the transmission function from the PD source to the PD sensor is unknown and depends on the specific design of the machine which determines the frequency response of the stator winding. Therefore, the energy at the source of the PD, which can be taken as a measure of the erosion of the insulation, cannot be measured directly;
- the individual high frequency transmission behaviour of a stator winding produces PD signals at the terminals that are a characteristic of the machine being tested and of the location of the PD source;
- very high frequency components of PD signals are subject to considerable attenuation when travelling through the winding and, depending on the origin of the PD, might not be detectable at the terminals of the test object

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 coupling devices, will significantly influence the characteristics of the signal detected at the terminals of the winding.

5 Measuring techniques and instruments

5.1 General

In line with IEC 60270, this clause deals solely with electrical methods of measuring partial discharges because the electrical, conductive measurement of partial discharges is the most commonly used method of assessing the winding insulation of rotating machines. Non-electrical methods of measurement and localization are listed in Annex B.

Partial discharge measuring systems can be divided into subsystems: coupling device, transmission system (for example, connecting cable or optical link) and measuring instrument. In general, the transmission system does not contribute to the circuit characteristics, apart from some possible signal attenuation, and will thus not be taken into consideration.

5.2 Influence of frequency response of measurement system

The frequency response of the PD detection system, including the PD coupling unit, determines how much energy of the PD signal from the winding can be detected. Thus, the frequency response of the system, especially the type of coupling unit being used, has a considerable impact on the overall sensitivity of detection. Due to the different values of lower cut-off frequency, the following qualitative relationships are basically applicable when testing complete windings:

- measurement in the lower frequency range ensures good sensitivity not only for partial discharges in bars/coils close to the sensor but also for those that originate from further away in the winding. However, the lower frequency range is more subjected to noise and disturbances;
- measurement in the very high frequency range may acquire only a very small proportion of the total PD energy, which results in sensitivity to signals originating only very close to the sensor. However, this frequency range may be less susceptible to noise and disturbance.

For off-line PD testing to obtain appropriate sensitivity to PD from the whole winding it is advisable to use wide band PD measuring systems. The lower cut-off frequency should be in the range of several tens of kHz in accordance with IEC 60270.

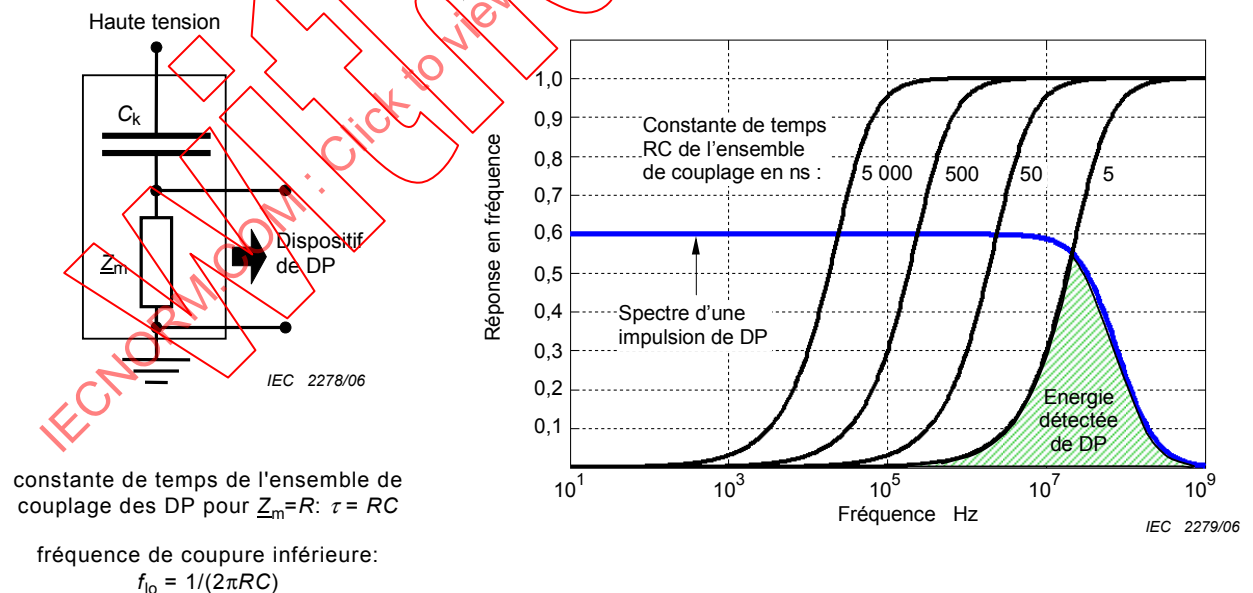
Il convient de noter qu'en fonction de la conception de l'enroulement et du dispositif de mesure mis en place, des phénomènes de résonance, dans la gamme de fréquences du dispositif de mesure des DP, peuvent se produire et avoir ainsi un effet sur les résultats de mesure des DP.

5.3 Effets des ensembles de couplage des DP

Pour les mesures à l'arrêt des DP, effectuées sur des enroulements statoriques, et les essais réalisés sur les composants des enroulements et destinés à la détection des DP, des ensembles de couplage capacitif sont souvent utilisés. Ces derniers intègrent un condensateur à haute tension et un dispositif de couplage à basse tension montés en série. Lors des essais effectués sur des composants d'enroulements, le dispositif de couplage peut être aussi branché en série à l'objet soumis à essai (voir Figure 5b). Le dispositif de couplage à basse tension est relié au système de transmission.

Le condensateur à haute tension, le dispositif de couplage, le système de transmission et l'impédance du circuit d'entrée du système de mesure constituent un filtre passe-haut. Par conséquent, une impédance accrue au niveau du circuit d'entrée ou des valeurs capacitives plus élevées contribuent à augmenter la sensibilité.

La Figure 1 montre de manière schématique la réponse en fréquence d'une impulsion idéale de DP et les fonctions de transfert de divers ensembles de couplage de DP intégrant un condensateur à haute tension et une résistance de mesure d'impédance $Z_m=R$ côté basse tension. Le point de chevauchement identifié des spectres de l'impulsion de DP et de l'ensemble de couplage, illustré à Figure 1, à une constante de temps RC de 5 ns, détermine l'énergie du signal qui peut être mesurée. Dans la pratique, de tels systèmes affichent des caractéristiques de filtre passe-bande en raison des composants parasites L et C .



Composants

- Z_m impédance de mesure
- C_k condensateur de couplage

Figure 1 – Réponse en fréquence d'une impulsion de DP et dispositifs de couplage de différentes constantes de temps

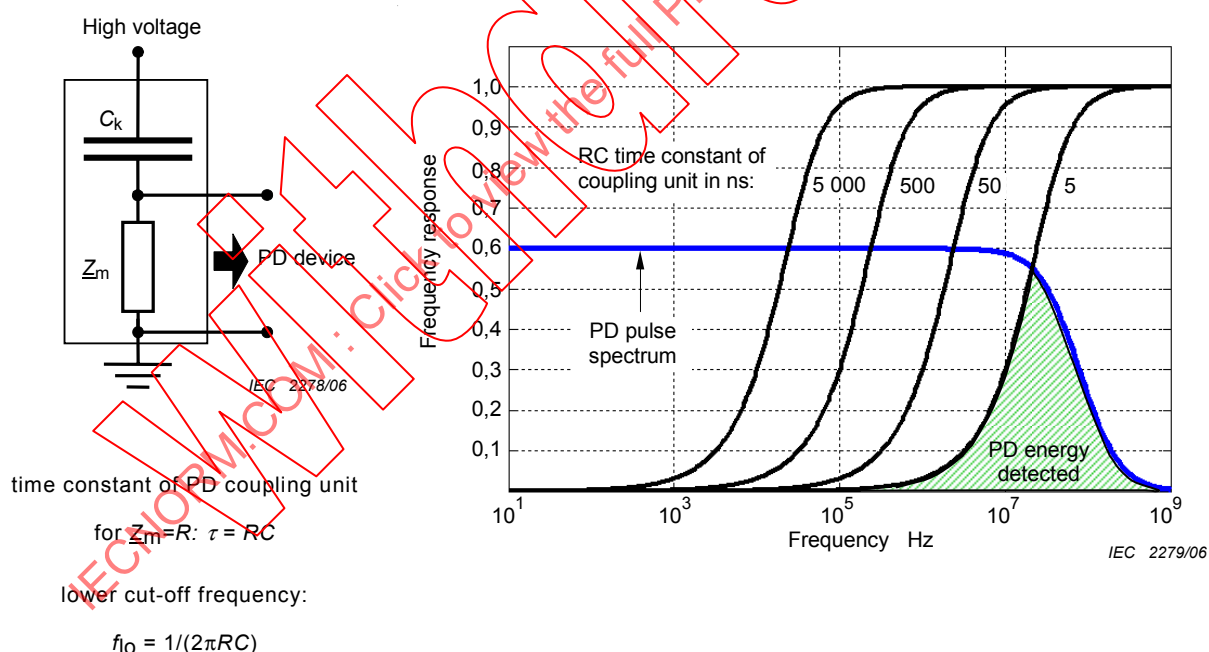
It should be noted that depending on the winding design and the measurement arrangement used, resonance phenomena that are in the frequency range of the PD measuring device may occur and therefore may also influence PD results.

5.3 Effects of PD coupling units

For off-line PD measurements on stator windings and PD tests on winding components capacitive coupling units are often used. These consist of a high voltage capacitor and a low voltage coupling device in series. When testing individual winding components, the coupling device may also be connected in series to the test object (see Figure 5b). The low voltage coupling device is connected to the transmission system.

The high voltage capacitor, the coupling device, the transmission system and the input impedance of the measurement system represent a high-pass filter. Therefore, increased input impedance or higher capacitance values lead to an increased sensitivity.

Figure 1 shows schematically the frequency response of an idealized PD pulse and the transfer functions of different PD coupling units with a high voltage capacitor and a resistive measuring impedance $Z_m=R$ at the low voltage side. The marked overlap of the spectra of the PD pulse and the coupling unit, shown in Figure 1, for an RC time constant of 5 ns, determines the signal energy which can be measured. In practical cases, such systems show band pass filter characteristics due to parasitic L and C components.



Components

- Z_m measuring impedance
- C_k coupling capacitor

Figure 1 – Frequency response of a PD pulse and coupling units of various time constants

Les impulsions de DP subissent un affaiblissement et se dispersent par propagation, particulièrement à hautes fréquences, à travers l'enroulement. Par conséquent, les systèmes de mesure à fréquence de coupure inférieure dans la gamme de fréquences inférieure offrent généralement une bonne sensibilité moyenne aux DP au niveau de l'ensemble de l'enroulement.

Lorsque des mesures sont effectuées sur des composants individuels d'enroulements, le condensateur de couplage à haute tension est relié au conducteur en cuivre. Pour les mesures des DP réalisées sur des enroulements complets, l'ensemble de couplage est relié aux bornes de la machine ou directement aux conducteurs de l'enroulement à l'intérieur de la carcasse.

Les dispositifs de couplage à basse tension suivants sont généralement associés au condensateur à haute tension:

- filtres RLC ou réseaux quadripôles (voir CEI 60270), où une inductance sert à supprimer la composante de fréquence industrielle;
- transformateurs de courant à haute fréquence (RF-CT) qui peuvent également servir à assurer une séparation galvanique entre les circuits à haute tension et le dispositif de mesure.

Un transformateur de courant à haute fréquence (RF-CT) relié à des câbles de terre peut également être utilisé comme dispositif de couplage autonome. En cas d'utilisation d'émetteurs de signaux à fibres optiques, il est également possible d'installer les dispositifs de couplage côté haute tension du condensateur.

5.4 Systèmes de mesure à large bande et à bande étroite

Les systèmes de mesure des DP se distinguent principalement par leurs bandes passantes respectives. Les impulsions de DP parvenant aux bornes ont un spectre de fréquence qui dépend de manière caractéristique de la fonction de transmission de l'enroulement de la machine. Le signal mesuré de DP est ainsi plus ou moins affecté, et ce en fonction de la bande passante du système de mesure. De plus, les systèmes d'isolation micacés se caractérisent par un haut taux de répétition des impulsions de DP. La Figure 2 présente des réponses impulsionnelles types de différents systèmes de mesure. La trace supérieure affichée sur les oscillogrammes représente l'impulsion d'entrée et la trace inférieure la réponse impulsionnelle du système de mesure:

- 1) système à large bande : (a) faible taux de répétition des impulsions, (b) fréquence accrue, (c) haute fréquence à l'origine de la superposition des impulsions,
- 2) système à bande étroite: (a) faible taux de répétition des impulsions, (b) fréquence accrue, (c) haute fréquence à l'origine de la superposition des impulsions.

PD pulses are attenuated and dispersed especially at higher frequencies while propagating through the winding. Therefore, measurement systems with lower cut-off frequency in the lower frequency range usually provide an average good sensitivity to PD from the whole winding.

When taking measurements on individual winding components, the high voltage coupling capacitor is connected to the copper conductor. For PD measurements on complete windings, the coupling unit is connected to the terminals of the machine or inside the frame directly to the winding conductors.

The following low voltage coupling devices are typically combined with the high voltage capacitor:

- RLC filters or four-terminal networks (see IEC 60270) wherein an inductance serves to suppress the power frequency component;
- high-frequency current transformers (RF-CT) which may also serve to galvanically separate the high voltage circuitry from the measuring device.

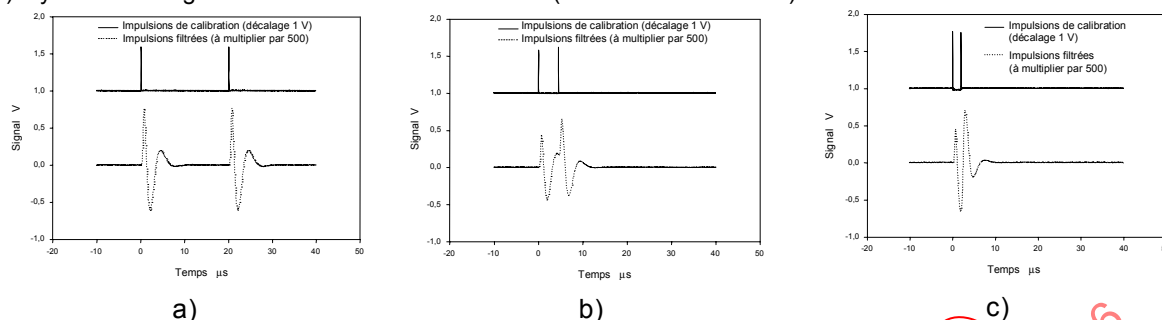
RF-CT connected with ground wires can also be used as a standalone coupling device. When using fibre optical signal transmitters, the coupling devices can also be installed on the HV side of the capacitor.

5.4 Wide-band and narrow band measuring systems

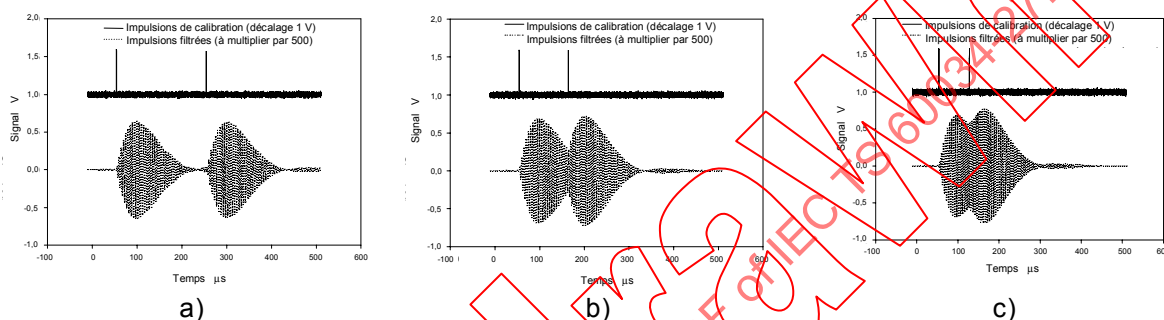
The principal difference between the various PD measuring systems is their bandwidth. The PD pulses arriving at the terminals have a frequency spectrum characterized by the transmission function of the machine winding. The measured PD signal will be affected to a greater or lesser degree depending on the bandwidth of the measuring system. Furthermore, micaceous insulation systems are characterized by a high repetition rate of PD pulses. Figure 2 shows typical pulse responses of different measuring systems. The upper trace of the oscillograms represents the input pulse, and the lower trace the pulse response of the measuring system:

- 1) wide band system: (a) low pulse repetition rate, (b) increased rate, (c) high rate leading to superposition of pulses,
- 2) narrow band system: (a) low pulse repetition rate, (b) increased rate, (c) high rate leading to superposition of pulses.

1) Système à large bande: Δf à -3 db: 210 kHz (filtres de 2^{ème} ordre)



2) Système à bande étroite: Δf à -3 db: 9 kHz (filtres de 2^{ème} ordre)



IEC 2280/06

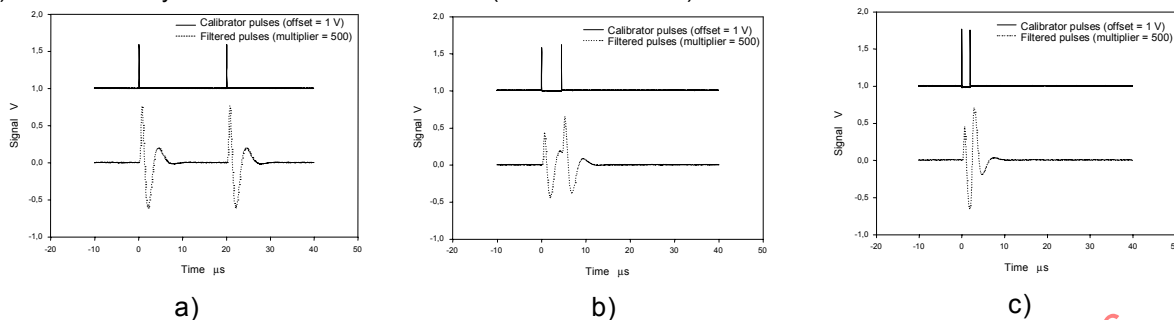
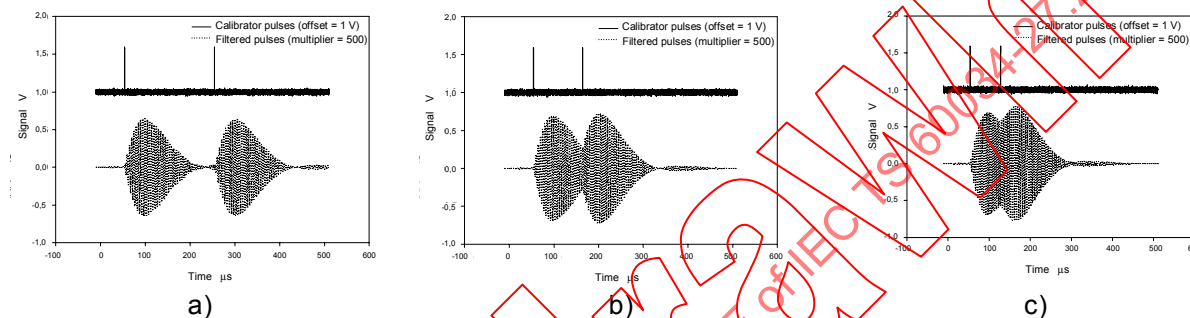
Figure 2 – Réponses impulsionnelles types de systèmes de mesure de DP à large bande et à bande étroite

(1) Systèmes à large bande

Conformément à la CEI 60270, les systèmes de mesure des DP sont dits à large bande lorsque leur bande passante dépasse 100 kHz. Pour les machines tournantes, des systèmes de mesure de ce type, d'une bande passante maximale d'environ 1 MHz, sont généralement utilisés. Certains systèmes disposent de bandes passantes allant jusqu'à 500 MHz. La bande passante du système est déterminée par la réponse en fréquence de l'ensemble de couplage et par le mode de traitement du signal dans l'appareil de mesure.

La plus grande partie des dispositifs de mesure de DP à large bande est conforme aux exigences de la CEI 60270. La fréquence limite inférieure est réglée à ≥ 10 kHz afin de supprimer la fréquence du réseau et les harmoniques celle-ci. La fréquence limite inférieure peut être variable et atteindre une valeur maximale de quelques centaines de kHz afin de supprimer les perturbations externes, par exemple les impulsions de commutation provenant d'éléments à semi-conducteurs des installations du réseau. Les bandes passantes types d'un grand nombre de dispositifs de mesure varient entre 100 kHz et 1 MHz.

Certains dispositifs de mesure de DP disposent de bandes passantes de plusieurs 100 MHz avec des options permettant d'intégrer des oscilloscopes numériques. Les valeurs mesurées en amplitude des impulsions ne sont pas étalonnées ou normalisées en unités de charge, conformément à la CEI 60270, mais exprimées en mV. Parmi ces appareils, certains sont capables de supprimer des signaux perturbateurs extérieurs par des méthodes de mesure différentielle.

1) Wide band system: Δf at –3 db: 210 kHz (2nd order-filters)2) Narrow band system: Δf at –3 db: 9 kHz (2nd order-filters)

IEC 2280/06

Figure 2 – Typical pulse responses of wide band and narrow band PD systems

(1) Wide band systems

In accordance with IEC 60270, PD measuring systems are defined as wide band if their bandwidth exceeds 100 kHz. With rotating machinery, wide-band measuring systems are typically used up to a bandwidth of approximately 1 MHz. Some systems use bandwidths of up to 500 MHz. The system bandwidth is determined by the frequency response of the coupling unit and by the signal processing in the measuring instrument.

Most of the wide band PD measuring devices conform to the requirements of IEC 60270. The lower limit frequency is set to ≥ 10 kHz to suppress mains frequency and its harmonics. The lower limit frequency may be variable up to a few hundred kHz to suppress external disturbances, for example commutating pulses from power semiconductors. Typical bandwidths of many measuring devices vary between 100 kHz and 1 MHz.

Some PD measuring devices use bandwidths of several 100 MHz with options to include digital oscilloscopes. The measured values of pulse amplitude are not calibrated or normalized in units of charge, in accordance with IEC 60270, but are quoted in mV. Some of these instruments are able to suppress external disturbance signals by means of differential measurements.

(2) Systèmes à bande étroite

Les dispositifs de mesure de DP à bande étroite se caractérisent par une faible bande passante variant de 9 kHz à 30 kHz avec une fréquence centrale réglable dans une gamme étendue maximale de 1 MHz. Le grand nombre de décharges partielles dans un système d'isolation micacé, associé au long temps de décroissance des impulsions en oscillation, peut conduire à une superposition de décharges successives (voir Figure 2). De ce fait, des erreurs de lecture des impulsions individuelles peuvent se produire. Par conséquent, les systèmes de mesure à bande étroite sont moins fréquemment utilisés pour les besoins de mesure des décharges partielles sur les machines tournantes.

(3) Systèmes de mesure du débit quadratique

Le débit quadratique, conformément à la CEI 60270, est exprimé en (coulombs)² par seconde et attribue une plus grande importance aux impulsions de plus grande amplitude. La fréquence centrale d'un filtre à bande étroite est réglée à quelques kHz, avec une bande passante étroite de quelques centaines de Hz. Les signaux en sortie du filtre sont transmis à un détecteur de débit quadratique où les résultats sont exprimés en décibels au-dessus d'un certain niveau défini en C²/s. La détection, en termes de débit quadratique, élimine, jusqu'à une certaine limite, l'altération des valeurs de lecture lorsque l'intervalle de temps entre décharges successives est aléatoire. Dans ce cas, la valeur de lecture est proportionnelle à l'énergie dissipée dans les décharges internes.

6 Visualisation des mesures

6.1 Généralités

Etant donné qu'un système d'isolation est censé faire l'objet d'une évaluation, il convient que les données relatives aux DP enregistrées par l'un des dispositifs de mesure décrits à l'Article 5 subissent un traitement approprié. Dans la mesure où le degré de détérioration du système d'isolation, et par conséquent le niveau du risque de défaillance, sont directement liés à la nature particulière de la source de décharges partielles, il est nécessaire de recueillir des informations fiables sur le type de sources de décharges partielles soumises aux mesures. Divers types de traitements visuels de données peuvent être affichés et employés à cet effet.

6.2 Etendue minimale de la présentation des données relatives aux DP

Afin d'évaluer le comportement des décharges partielles, il est recommandé de faire au moins appel aux paramètres classiques de mesure des décharges partielles, à savoir:

- l'amplitude des DP, et
- la valeur efficace de la tension d'essai.

L'amplitude des DP, celle dont la répétition est la plus fréquente, peut être exprimée en termes de tension [mV] ou en termes de charge apparente [pC], et évaluée conformément à la CEI 60270. En principe, l'unité de mesure utilisée pour quantifier l'amplitude des DP est arbitraire. Dans l'affichage obtenu à partir de ces deux paramètres, l'amplitude des DP, Q_m , rapportée à la tension d'essai, U , appliquée à l'enroulement ou l'élément d'enroulement, correspond à la fonction $Q_m = f(U)$ pour une tension croissante et décroissante. La tension d'essai, conformément à 9.1.5, augmente ainsi jusqu'à une valeur maximale spécifiée, de manière continue ou progressivement par échelons choisis de manière adéquate, avant d'être réduite à la valeur minimale de la tension d'essai.

(2) Narrow band systems

Narrow band PD measuring devices are characterized by a small bandwidth of 9 kHz to 30 kHz with an adjustable centre frequency in a wide range of up to 1 MHz. The large number of partial discharges in mica insulation in conjunction with the long decay time of the oscillating pulses may lead to a superposition of successive discharges (see Figure 2). Thus, the readings of the individual pulse charge may be erroneous. Consequently, narrow band measuring systems are less frequently used for taking partial discharge measurements on rotating machinery.

(3) Quadratic rate based systems

The quadratic rate in accordance with IEC 60270 is expressed as (coulombs)² per second and assigns greater weight to larger pulses. The centre frequency of a narrow band filter is set to several kHz, with a narrow bandwidth of several hundred Hz. The output of the filter is sent to a quadratic rate detector where the results are expressed in decibels above a certain level defined in C²/s. Detection in quadratic rate eliminates, up to a certain limit, the falsification of readings when the time between successive discharges is randomized. In that case, the reading is proportional to the energy dissipated in internal discharges.

6 Visualization of measurements

6.1 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 devices described in Clause 5 should be processed appropriately. Since the degree of damage to the insulation system, and therefore the risk of failure, is directly related to the particular nature 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.

6.2 Minimum scope of PD data presentation

To evaluate the PD behaviour, it is recommended that at least the classic parameters of partial discharge measurement, are used as follows:

- the PD magnitude, and
- the r.m.s. value of test voltage.

The PD magnitude, as the largest repeatedly occurring magnitude, can be expressed in terms of voltage [mV] or in terms of apparent charge [pC] and evaluated in accordance with IEC 60270. In principle, the measuring unit used for quantifying the PD magnitude is arbitrary. In the display obtained from these two parameters, the PD magnitude Q_m related to the test voltage U applied to the winding or winding element is shown as function $Q_m = f(U)$ for increasing and decreasing voltage. Here, the test voltage, in accordance with 9.1.5, is increased to a specified maximum value, either continuously or in suitably chosen steps, before being reduced to the minimum test voltage.

En outre, la tension d'apparition U_i (TADP) et la tension d'extinction U_e (TEDP) des décharges partielles au niveau de l'objet soumis à essai peuvent être déterminées, conformément à la CEI 60270, à partir de la courbe $Q_m = f(U)$ donnée dans la Figure 3. Les tensions d'apparition et d'extinction dépendent de la valeur de seuil inférieure spécifiée de l'amplitude des DP. Par conséquent, le seuil de détection permettant d'évaluer la TADP et la TEDP peut varier de manière significative en fonction du niveau de bruit de fond lors de l'essai.

La Figure 3 présente un exemple du diagramme $Q_m = f(U)$. Il est préférable de prévoir la tension sur l'axe des abscisses et l'amplitude des DP sur celui des ordonnées. L'axe des tensions est gradué selon une échelle linéaire. L'établissement de tensions normalisées selon des valeurs de référence prédéterminées, par exemple la tension d'essai maximale U_{max} , facilite les comparaisons. L'axe d'amplitude des DP peut être gradué selon une échelle linéaire ou logarithmique.

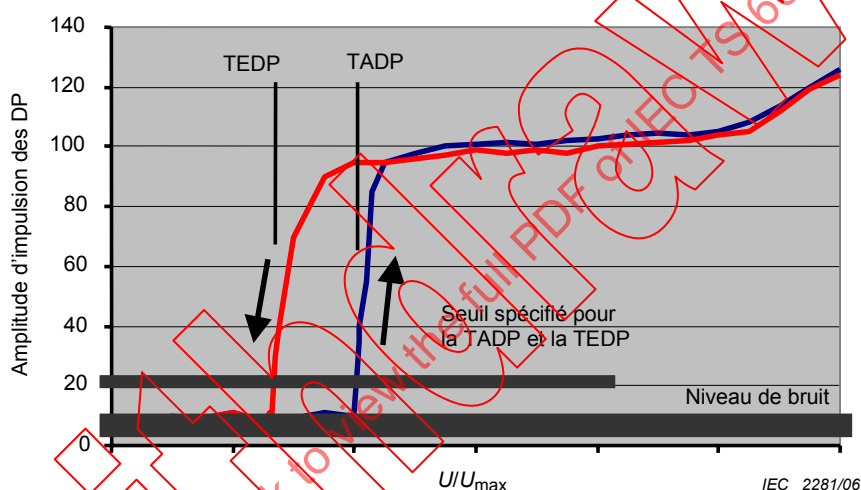


Figure 3 – Amplitude des DP en fonction de la tension d'essai normalisée $Q_m = f(U/U_{max})$

6.3 Moyens supplémentaires de représentation des données relatives aux DP

6.3.1 Généralités

En cas d'utilisation de dispositifs de mesure de DP numériques, l'amplitude des DP, q_i , est obtenue pour le train d'impulsions de DP pour chaque événement individuel impliquant les DP et qui se produit lors de la durée de mesure, et la tension instantanée associée u_i , correspond à l'instant t_i ou, pour des tensions c.a. variant périodiquement, à l'angle de phase ϕ_i dans la période correspondante de la tension d'essai à la fréquence industrielle. Dans chaque cas, les valeurs mesurées des DP sont enregistrées à l'aide d'un type de dispositif de mesure adéquat et conservées de manière à pouvoir les analyser ultérieurement en mettant en œuvre des méthodes appropriées.

Des grandeurs supplémentaires peuvent être dérivées des données relatives aux DP, telles que charge d'intégration, courant de décharge, débit quadratique, puissance des DP et énergie des DP, conformément à la CEI 60270. La grandeur de quantification normalisée NQN des impulsions peut être utilisée également. Toutefois, en cas d'utilisation de systèmes numériques, les grandeurs calculées concernant les DP dépendront des réglages spécifiques de l'appareil lors des essais, tels que celui du seuil de déclenchement, etc. En utilisant des

In addition, the inception voltage U_i (PDIV) and the extinction voltage U_e (PDEV) of the partial discharges from the test object, in accordance with IEC 60270, can be determined from the curve $Q_m = f(U)$ in Figure 3. The inception and extinction voltages are related to a specified low threshold value of PD magnitude. Consequently, the detection limit to assess PDIV and PDEV may significantly vary, depending on the background noise level during testing.

Figure 3 shows an example of the $Q_m = f(U)$ diagram. It is preferable to assign the voltage to the abscissa and the PD magnitude to the ordinate. The voltage axis is then linear scaled. Normalizing the voltage values to predetermined reference values, for example the maximum test voltage U_{max} , facilitates comparisons. The PD magnitude axis can be scaled either linearly or logarithmically.

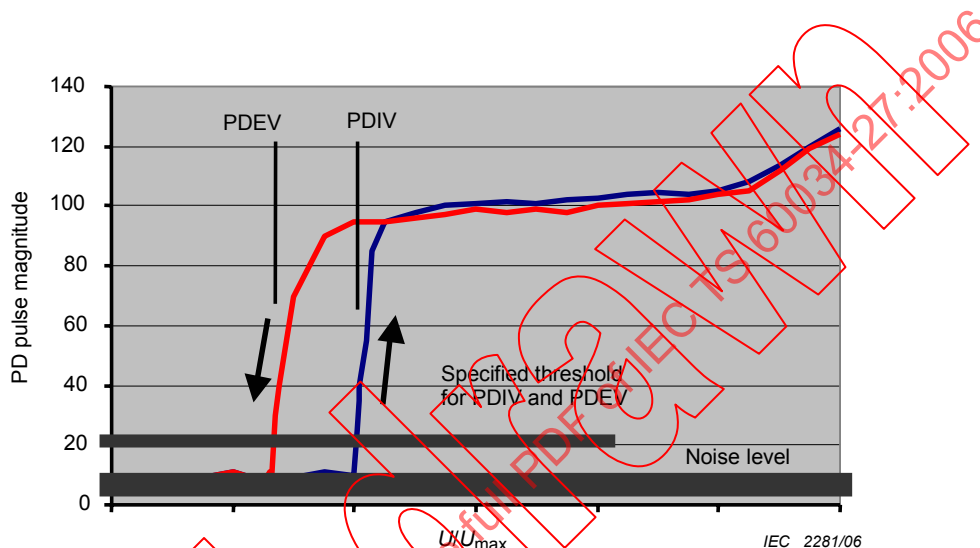


Figure 3 – PD magnitude as a function of the normalized test voltage $Q_m = f(U/U_{max})$

6.3 Additional means of PD data representation

6.3.1 General

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, for periodic a.c. voltages, the phase angle ϕ_i within the corresponding period of the power-frequency test 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.

Additional quantities can be derived from the PD data like integrated charge, discharge current, quadratic rate, PD power, and PD energy in accordance with IEC 60270. The NQN quantity (normalized quantity number) can be used too. However, with digital systems, the derived PD quantities will depend on the specific instrument settings during testing, for example trigger level, etc. 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

diagrammes appropriés lors de l'analyse ultérieure, il est possible d'afficher les résultats de mesure des DP de manière à pouvoir évaluer le système d'isolation. Des distributions statistiques des paramètres des DP, une présentation en fonction de la phase ou du temps des paramètres individuels mesurés des DP ou des diagrammes dits de dispersion des paramètres spécifiques peuvent être exploités à cet effet (par exemple distribution d'amplitude d'impulsions, distribution de phase d'impulsions, distribution d'amplitude d'impulsions en fonction de la phase, oscillogrammes de trains d'impulsions, représentations de la distribution des DP, etc.).

Le bulletin technique CIGRE 226, cité en référence [2]¹⁾, fournit des informations détaillées sur des types de diagrammes adéquats de DP et des diagrammes de représentation de DP destinés à une analyse ultérieure.

6.3.2 Patron de décharges partielles

Un patron de décharges partielles peut être considéré comme une représentation de la distribution des DP dans laquelle des grandeurs spécifiques de DP sont corrélées dans le cadre d'un diagramme de dispersion afin de recueillir des informations sur les sources de l'activité des DP. Généralement, un diagramme en deux dimensions de la distribution des DP sert à la visualisation.

Pour l'identification des causes à l'origine des DP dans les systèmes d'isolation d'enroulements statoriques, le patron de DP $\phi-q-n$ est recommandé, l'amplitude q_i et la phase d'occurrence ϕ_i des DP étant respectivement présentées en ordonnée et en abscisse pour chaque impulsion individuelle de DP. Dans le diagramme de dispersion, il convient de visualiser la fréquence d'occurrence (n) de DP à l'intérieur de chaque fenêtre phase/amplitude en utilisant un code de couleurs approprié, l'échelle de graduation étant affichée sur le côté du diagramme. La Figure 4 présente un exemple d'un patron $\phi-q-n$.

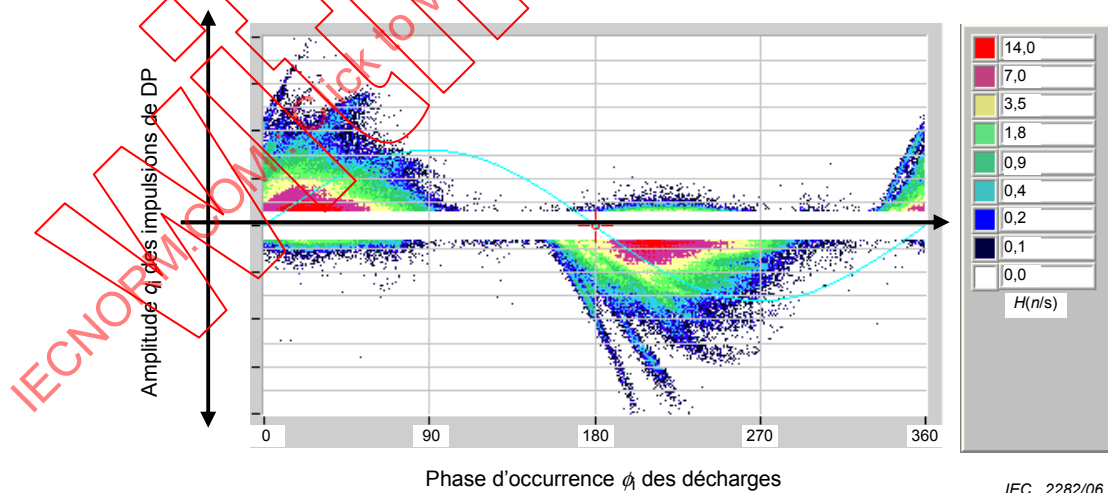


Figure 4 – Exemple d'un patron $\phi-q-n$ de décharges partielles où les DP ont été mesurées à l'aide d'un dispositif de couplage monté en série et relié à l'objet soumis à essai, conformément à la Figure 5b, en adoptant un code de couleurs pour le nombre d'impulsions $H(n)$

¹⁾ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

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.).

More detailed information on suitable PD pattern types and PD diagrams for further analysis can be found in reference [2]¹⁾, CIGRE technical brochure 226.

6.3.2 Partial discharge pattern

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 ϕ - q - n pattern in which the PD magnitude q_i is on the ordinate and the phase of occurrence ϕ_i is on the abscissa for each individual PD pulse. 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. Figure 4 shows an example of a ϕ - q - n pattern.

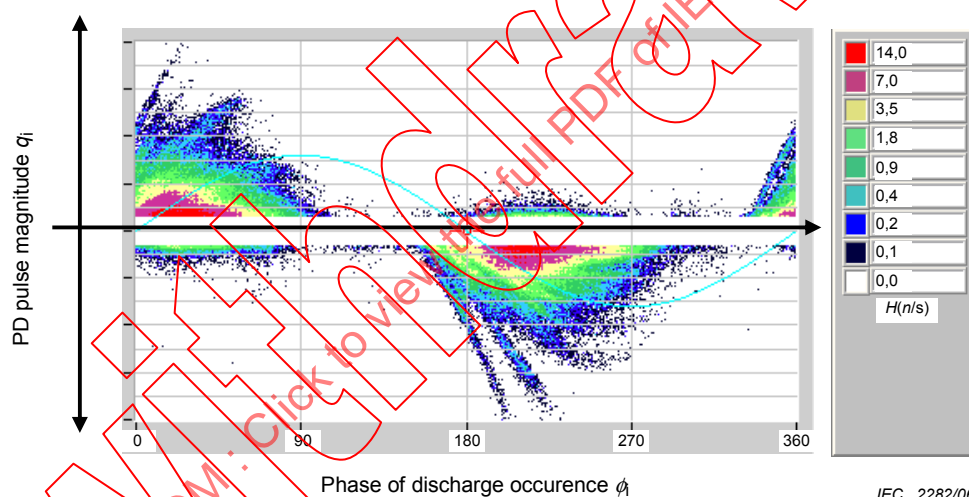


Figure 4 – Example of a ϕ - q - n partial discharge pattern where the PD was measured in series with the test object in accordance with Figure 5b, with colour code for the pulse number $H(n)$

¹⁾ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

7 Circuits d'essai

7.1 Généralités

La fonction essentielle d'un circuit d'essai en matière de mesure des décharges partielles est d'établir les conditions favorables à la détection de décharges partielles dans l'objet soumis à l'essai. Abstraction faite de l'objet soumis à essai, cette fonction est assurée dans les meilleures conditions dans la mesure où les différents composants du circuit d'essai sont suffisamment exempts de DP.

Principalement, le circuit d'essai est composé des éléments suivants:

- alimentation à haute tension conforme à la CEI 60060-1 et à la CEI 60060-2;
- dispositif de mesure de tension;
- ensemble adéquat de couplage des DP;
- câble de connexion reliant le dispositif de mesure d'impédance et celui de DP, présentant des caractéristiques d'amortissement suffisamment faibles et disposant d'un blindage de bonne qualité;
- système de mesure de décharges partielles;
- raccords à haute tension.

Afin de vérifier l'absence de tout effet du circuit d'essai sur la mesure des décharges partielles en provenance de l'objet soumis à essai, il convient tout d'abord de soumettre le montage à un essai réalisé à des tensions inférieures ou égales à la tension d'essai et selon le mode opératoire d'essai décrit en 9.1.6. Le niveau de bruit généré par l'ensemble du circuit d'essai à la tension d'essai maximale requise ne doit dépasser pas 100 pC en cas d'utilisation de la procédure de normalisation spécifiée à l'Article 8.

Dans le cas où le montage d'essai n'est pas suffisamment protégé contre les perturbations pour permettre la mesure de la faible valeur de seuil de l'amplitude spécifiée des DP, une charge (impédance) ou un filtre peut être placé(e) coté haute tension entre l'objet soumis à essai et la source d'alimentation à haute tension. Ce dispositif sert à affaiblir les perturbations générées par la source d'alimentation à haute tension, par exemple celles dues aux DP issues du transformateur d'essai, aux conducteurs à haute tension ou traversées, ou aux harmoniques supérieures de la tension d'essai se situant à l'intérieur ou à proximité de la bande passante du système de mesure. Les Annexes C et D fournissent des informations complémentaires sur le bruit d'origine externe, les perturbations et la sensibilité de mesure.

Il convient que l'ensemble du circuit d'essai présente une faible inductance propre. Il est essentiel d'éviter les boucles de mise à la terre. Il est recommandé d'utiliser des câbles faiblement inductifs pour les connexions de mise à la terre.

7.2 Composants individuels d'enroulement

Pour les besoins des mesures des décharges partielles au niveau des composants individuels d'enroulement (barres et bobines statoriques, etc.), utiliser de préférence deux circuits d'essai fondamentaux conformes aux exigences de la CEI 60270. Ces circuits sont représentés à la Figure 5.

Dans le cadre du circuit représenté à la Figure 5a, le dispositif de couplage à basse tension est placé sur le côté de mise à la terre du condensateur de couplage. Ce montage offre l'avantage d'être adapté aux objets soumis à essai disposant d'une borne de mise à la terre, l'objet soumis à essai étant directement branché entre la source d'alimentation à haute tension et la terre. En cas de défaillance du système d'isolation lors des essais, l'appareil de mesure n'est pas exposé aux dangers dus aux hautes tensions.

7 Test circuits

7.1 General

The essential task of a test circuit for partial discharge measurements is to provide appropriate conditions for the detection of partial discharges within the test object. This is best achieved when the various components of the test circuit, not including the test object, are sufficiently PD free.

The test circuit comprises primarily:

- a high-voltage power supply conforming to IEC 60060-1 and IEC 60060-2;
- a voltage measuring device;
- a suitable PD coupling unit;
- a connection cable from the measuring impedance to the PD device with sufficiently low damping characteristics and good shielding;
- a partial-discharge measuring system;
- high-voltage connections.

To ensure that the test circuit does not influence the measurement of partial discharges from the test object, the arrangement should first be tested up to the maximum test voltage in accordance with the test procedure given in 9.1.6. The noise level produced by the complete test circuit at maximum required test voltage shall not exceed 100 pC when using the normalization procedure in accordance with Clause 8.

In case the test arrangement is not sufficiently free of interference to allow the measurement of the specified low threshold value of PD magnitude, an impedance or filter can be introduced at the high voltage between the test object and the high voltage source. This serves to attenuate disturbances from the high voltage source, for example PD from the testing transformer, the high voltage conductors or from bushings, or higher harmonics of the test voltage within or close to the bandwidth of the measuring system. Further information on external noise, disturbances and measuring sensitivity can be found in Annexes C and D.

The whole test circuit should be of a low-inductance arrangement. It is essential that ground loops are avoided. Low inductance leads are recommended as ground connections.

7.2 Individual winding components

For partial discharge measurements on individual winding components (stator bars, coils, etc.) it is preferable to use two basic test circuits conforming to IEC 60270. These circuits are shown in Figure 5.

The low voltage coupling device in the circuit of Figure 5a is placed on the ground side of the coupling capacitor. This arrangement has the advantage of being suitable for test objects with one grounded terminal, the test object being connected directly between the high-voltage source and ground. In the event of insulation failure during testing, the measuring equipment is not subjected to dangerous high voltages.

Dans le circuit présenté à la Figure 5b, le dispositif de couplage à basse tension est placé sur le côté de mise à la terre de l'objet soumis à essai. A cet effet, il convient d'isoler de la terre le côté basse tension de l'objet soumis à essai. Comparé à celui présenté dans la Figure 5a, ce circuit d'essai pourrait conférer une meilleure sensibilité aux composants à faible capacité. La polarité des signaux de DP mesurés sera inversée pour les Figures 5a et 5b.

Dans les deux montages d'essai, il convient d'associer le dispositif de couplage à un circuit de protection conçu pour résister au courant de claquage des objets soumis à essai en prévision d'une défaillance éventuelle de ces derniers lors des essais.

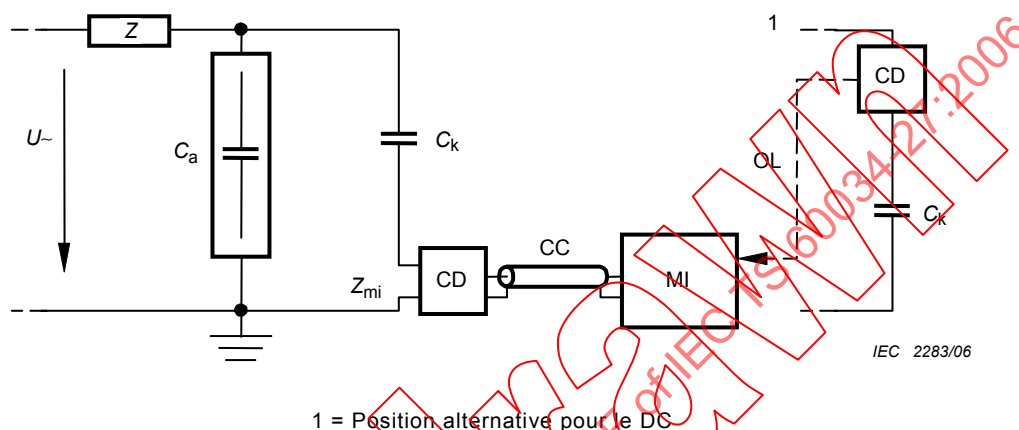


Figure 5a – Dispositif de couplage (DC) monté en série avec le condensateur de couplage

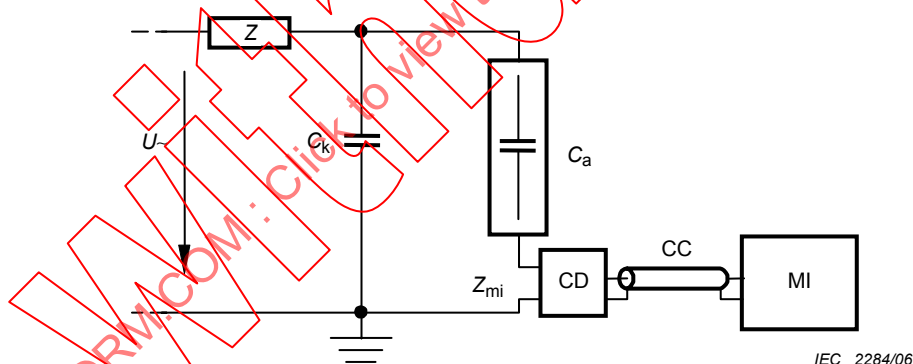


Figure 5b – Dispositif de couplage (DC) monté en série avec l'objet soumis à essai

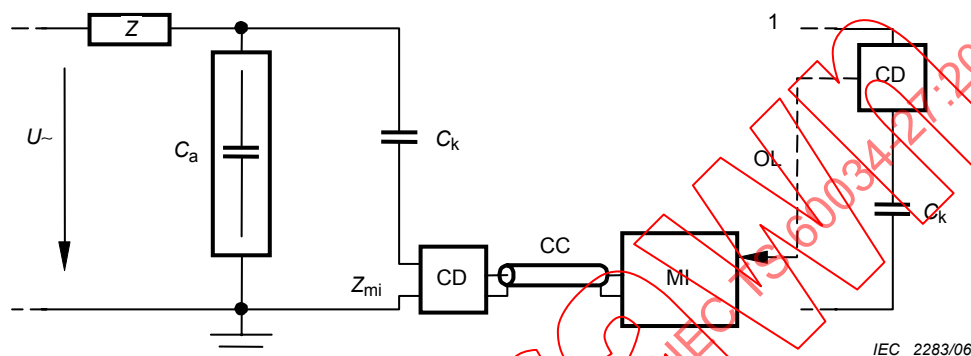
Composants

$U_{\sim}$	alimentation à haute tension
Z_{mi}	impédance d'entrée du système de mesure
CC	câble de connexion
OL	liaison à fibre optique
C_a	objet soumis à essai
C_k	condensateur de couplage
CD	dispositif de couplage
MI	appareil de mesure
Z	filtre

Figure 5 – Circuits d'essai conformes à la CEI 60270

In the circuit of Figure 5b, the low voltage coupling device is placed on the ground side of the test object. The low-voltage side of the test object should therefore be isolated from ground. This test circuit might produce better sensitivity for low capacitance components compared with Figure 5a. The polarity of measured PD signals will be reversed for Figures 5a and 5b.

In both test arrangements, a protection circuit designed to withstand the breakdown current of test objects, which might fail during testing, should be combined with the coupling device.



1 = Alternative position for CD

Figure 5a – Coupling device (CD) in series with the coupling capacitor

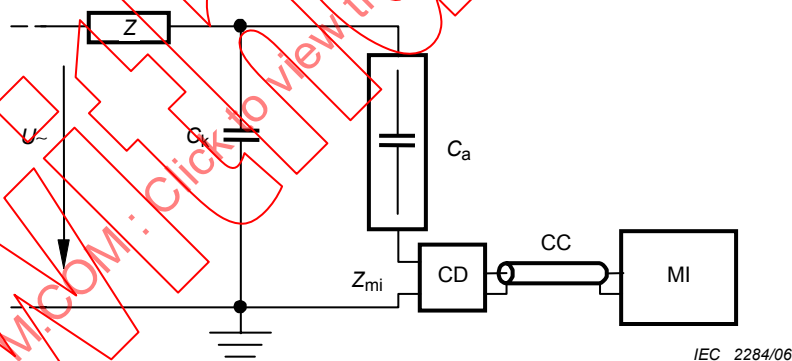


Figure 5b – Coupling device (CD) in series with the test object

Components

$U_{\sim}$	high-voltage supply
Z_{mi}	input impedance of measuring system
CC	connecting cable
OL	optical link
C_a	test object
C_k	coupling capacitor
CD	coupling device
MI	measuring instrument
Z	filter

Figure 5 – Basic test circuits in accordance with IEC 60270

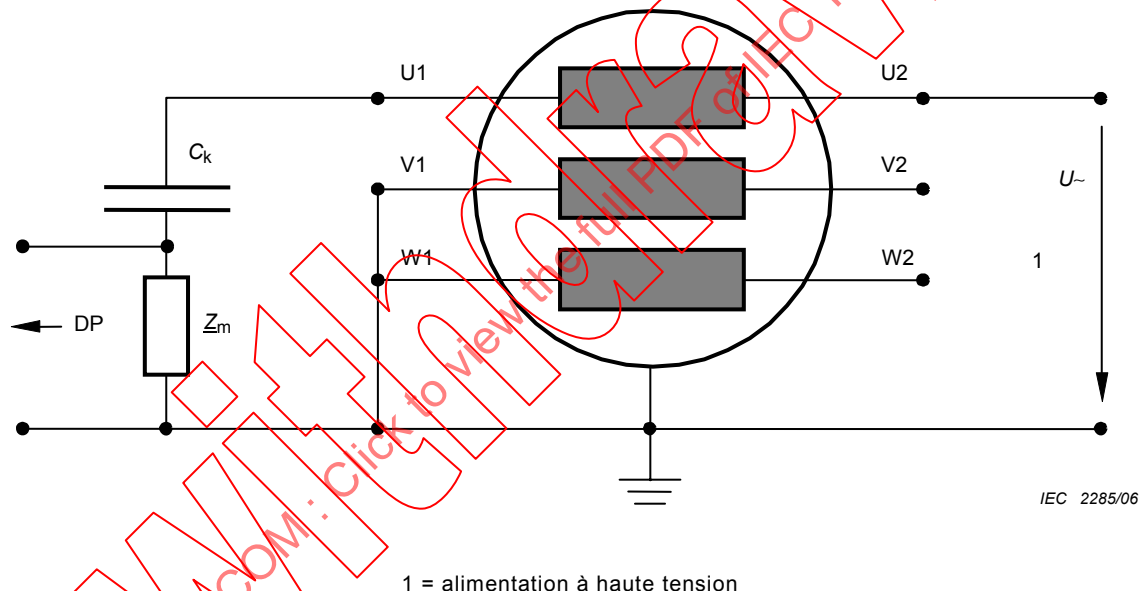
7.3 Enroulement complet

7.3.1 Généralités

Les informations qui peuvent être effectivement déduites des mesures de décharges partielles effectuées sur des enroulements à haute tension dépendent de la facilité d'accès au point de connexion en étoile et de la méthode de connexion choisie pour le dispositif de mesure.

Dans la mesure du possible, il convient de relier la source d'alimentation à haute tension et l'ensemble de couplage des DP aux bornes opposées de l'enroulement afin de tirer profit de l'avantage offert par l'effet amortisseur des phases de l'enroulement pour supprimer les perturbations transmises par conduction et issues de l'alimentation. Il convient d'installer l'ensemble de couplage des DP le plus près possible des bornes de l'enroulement. Normalement, il convient de relier le noyau statorique à la terre.

La Figure 6 présente un circuit d'essai destiné à une mesure des DP sur la phase U, les bornes U1, V1 et W1 correspondant aux bornes de phase à haute tension et les bornes U2, V2, W2 aux points de connexion en étoile côté enroulement.



Composants

$U_{\sim}$	alimentation à haute tension
Z_m	impédance de mesure
C_k	condensateur de couplage

Figure 6 – Circuit d'essai destiné à la mesure des DP (S1.1) au niveau d'un enroulement complet

7.3.2 Mesures normalisées recommandées (SX.X)

Pour les besoins des mesures sur des enroulements avec montage en étoile ouvert, il est recommandé d'utiliser les connexions d'enroulements données dans le Tableau 1. Le Tableau 2 présente les mesures recommandées en cas de montages en étoile fermés accessibles et inaccessibles. Afin de vérifier la qualité du produit fini après fabrication et de disposer d'une plate-forme de mesure de référence permettant de faciliter une comparaison ultérieure et une visualisation de l'évolution des résultats de mesure des décharges partielles, il est recommandé d'effectuer les mesures indiquées dans les Tableaux 1 et 2 sur des enroulements neufs et sur d'autres déjà longuement utilisés.

7.3 Complete winding

7.3.1 General

The information that can actually be obtained from partial discharge measurements taken on high-voltage windings depends on the accessibility of the star point and on the method of connection chosen for the measuring device.

The high voltage source and the PD coupling unit should be connected to opposite winding terminals whenever possible, to utilize the advantage of the damping effect of the winding phases to suppress conducted interference from the power supply. The PD coupling unit should be installed as close to the winding terminals as possible. The stator core should normally be grounded.

In Figure 6, a test circuit is shown for a PD measurement on phase U with terminals U1, V1, W1 being the high voltage phase terminals and U2, V2, W2 being the star point side of the winding.

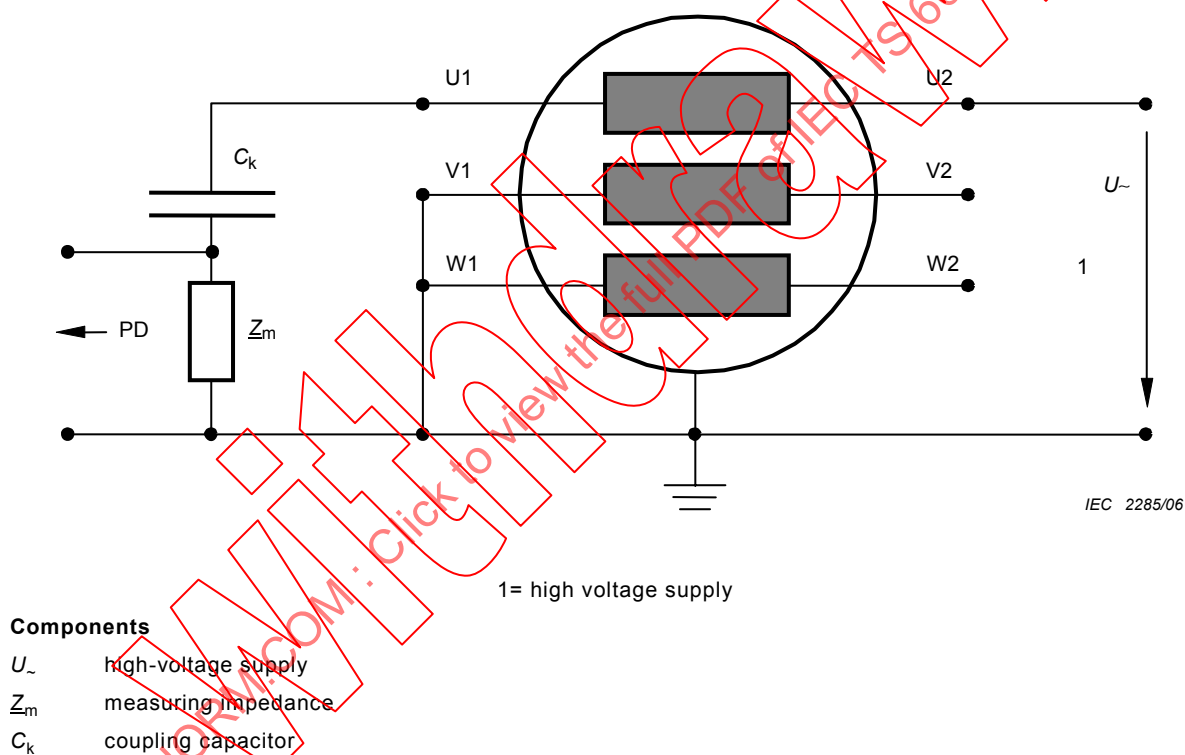


Figure 6 – Test circuit for PD measurement (S1.1) on complete winding

7.3.2 Recommended standard measurements (SX.X)

For measurements on windings with open star point, the winding connections given in Table 1 are recommended. Table 2 shows the measurements recommended for closed accessible and inaccessible star points. To check the production quality after manufacturing and to have a baseline measurement, which facilitates future comparison and trending of partial discharge results, it is recommended to perform the measurements listed in Tables 1 and 2 on new and used windings.

Tableau 1 – Schéma de connexion S1 pour montage en étoile ouvert

N° d'identification	HT	Terre	C _K
S1.1	U2	V1W1	U1
S1.2	V2	U1W1	V1
S1.3	W2	U1V1	W1
S1.4	U2V2W2	-	U1V1W1

Tableau 2 – Schéma de connexion S2 pour montage en étoile fermé

N° d'identification	HT	Terre	C _K
Montage en étoile accessible			
S2.1	U2V2W2	-	U1V1W1
Montage en étoile inaccessible			
S2.2	U1V1W1	-	U1V1W1

Une comparaison des résultats des mesures de S1.1 à S1.3 avec celle correspondant à S1.4, pour montage en étoile ouvert (Tableau 1), permet la détection et la mise en évidence de sources de décharges partielles spécifiques entre deux phases de l'enroulement, par exemple, celles dues à des défauts de fabrication ou celles résultant d'un vieillissement en service (voir 9.2).

En fonction des caractéristiques de l'alimentation électrique mise en œuvre et de la capacité de l'enroulement, l'alimentation de l'ensemble de l'enroulement peut ne pas être adaptée ou même réalisable. Il est alors possible de renoncer à la mesure S1.4 effectuée sur l'enroulement complet relié à la terre, pour le montage en étoile ouvert, et indiqué dans le Tableau 1. En cas d'enroulements neufs et pour de petites machines, par exemple, il peut être décidé de ne réaliser que la mesure S1.4 selon un mode opératoire d'essai simplifié et après fabrication, même pour le montage en étoile ouvert. Cependant, cet essai fournit moins d'informations pour des comparaisons ultérieures et sur l'évolution de l'état de l'enroulement; il ne permet d'obtenir aucune indication sur les décharges éventuellement présentes entre deux phases de l'enroulement.

En cas de suppression possible de perturbations transmises par conduction à partir de l'alimentation, les deux extrémités des bornes de l'enroulement, c'est-à-dire de phase et du neutre (U1U2, V1V2, W1W2), pour les mesures de S1.1 à S1.4 et S2.1, peuvent être reliées afin d'obtenir une sensibilité égale aux défauts du système d'isolation et/ou aux défauts de fabrication de part et d'autre de l'enroulement.

7.3.3 Mesures facultatives et étendues (EX.X)

Outre les mesures normalisées données dans les Tableaux 1 et 2, d'autres mesures étendues peuvent être réalisées de manière facultative afin d'étudier plus en détail le comportement des DP dans le cadre du système d'isolation des enroulements. Les Tableaux 3 et 4 dressent une liste de ces mesures. Il convient d'opérer également une sélection adéquate parmi ces mesures, lorsque les résultats des mesures normalisées font apparaître des sources spécifiques de décharges partielles qui nécessitent de faire l'objet d'une étude complémentaire. Quoi qu'il en soit et quel que soit le type particulier de mesure étendue à réaliser, la décision doit être prise à cet effet par l'opérateur ou le constructeur.

Table 1 – Connection diagram S1 for open star point

ID number	HV	Ground	C _K
S1.1	U2	V1W1	U1
S1.2	V2	U1W1	V1
S1.3	W2	U1V1	W1
S1.4	U2V2W2	-	U1V1W1

Table 2 – Connection diagram S2 for closed star point

ID number	HV	Ground	C _K
Accessible star point			
S2.1	U2V2W2	-	U1V1W1
Inaccessible star point			
S2.2	U1V1W1	-	U1V1W1

A comparison of measurement results from S1.1 to S1.3 with measurement S1.4 for open star point (Table 1) allows for the detection and distinction of specific partial discharge sources between two phases of the winding, for example due to manufacturing deficiencies or as a result of ageing during operation (see 9.2).

Depending on the characteristics of the available power supply and the capacitance of the winding, it may not be convenient or even feasible to energize the whole winding. Then the measurement S1.4 on the complete winding to ground for open star point in Table 1 can be left out. In case of new windings, it may be decided, for example for smaller machines, to apply a simplified test procedure after manufacturing even for open star point by performing only measurement S1.4. This, however, provides less information for future comparisons and trending of the winding condition and gives no indication of possible discharges between two phases of the winding.

In cases where conducted interference from the power supply can be excluded, both ends of the winding terminals, i.e. the phase and neutral side (U1U2, V1V2, W1W2) for measurements S1.1 to S1.4 and S2.1, can be connected, to obtain equal sensitivity for insulation defects and/or manufacturing deficiencies at both sides of the winding.

7.3.3 Optional, extended measurements (EX.X)

In addition to the standard measurements given in Tables 1 and 2, further extended measurements can be made optional, to investigate the PD behaviour of the winding insulation in more detail. These measurements are listed in Tables 3 and 4. Measurements should be selected appropriately, if the results of standard measurements indicate specific discharge sources that need further investigation. Whether or not, and what specific kind of extended measurement is needed, shall be decided by the operator or manufacturer.

Tableau 3 – Schéma de connexion E1 pour montage en étoile ouvert

N° d'identification	HT	Terre	C _K
E1.1	U1	V2W2	U2
E1.2	V1	U2W2	V2
E1.3	W1	U2V2	W2
E1.4	U1V1W1	-	U2V2W2

Tableau 4 – Schéma de connexion E2 pour montage en étoile fermé

N° d'identification	HT	Terre	C _K
Montage en étoile accessible			
E2.1	U2V2W2	-	U1
E2.2	U2V2W2	-	V1
E2.3	U2V2W2	-	W1
E2.4	U1V1W1	-	U2V2W2
Montage en étoile inaccessible			
E2.5	V1	-	U1
E2.6	W1	-	V1
E2.7	U1	-	W1

En réalisant les mesures étendues indiquées dans les Tableaux 3 et 4 en complément des mesures normalisées dont la liste est dressée dans les Tableaux 1 et 2, davantage d'informations de détail peuvent être obtenues sur l'emplacement spécifique des principales sources de décharges au niveau du système d'enroulements statoriques, dans la mesure où ces essais utilisent l'effet d'affaiblissement des impulsions lors de leurs déplacements à travers l'enroulement.

8 Normalisation des mesures

8.1 Généralités

En raison de la propagation des impulsions, du phénomène de résonance et du couplage croisé mutuel dans les enroulements équipant les machines, mentionnés en 4.3, l'étalonnage n'est pas possible. Le but de la normalisation est de mettre à l'échelle les diverses influences du circuit d'essai, par exemple les moyens de connexion de l'alimentation, la capacité parasite, la capacité du dispositif de couplage et la capacité électrique de l'objet soumis à essai, en appliquant une impulsion de référence bien définie aux bornes de la machine après avoir raccordé l'ensemble du circuit d'essai. La normalisation est destinée à assurer au système de mesure des DP une sensibilité suffisante lui permettant de mesurer correctement une valeur spécifiée d'amplitude des DP, telle qu'elle apparaît aux bornes de la machine lors de la mesure, et à vérifier que la réaction du système utilisé en réponse à la détection des décharges partielles est reproductible. De plus, la normalisation du circuit d'essai facilite les comparaisons entre résultats de mesures réalisées sur des objets présentant les mêmes caractéristiques de conception et effectuées à l'aide du même dispositif de mesure des décharges partielles. Il convient de procéder à la normalisation du circuit d'essai en appliquant des impulsions de courant de courte durée et d'amplitude connue en mettant en œuvre à cet effet un générateur d'impulsions de référence (dispositif d'étalonnage – calibrateur) conforme aux spécifications données dans la CEI 60270.

Table 3 – Connection diagram E1 for open star point

ID number	HV	Ground	C _K
E1.1	U1	V2W2	U2
E1.2	V1	U2W2	V2
E1.3	W1	U2V2	W2
E1.4	U1V1W1	-	U2V2W2

Table 4 – Connection diagram E2 for closed star point

ID number	HV	Ground	C _K
Accessible star point			
E2.1	U2V2W2	-	U1
E2.2	U2V2W2	-	V1
E2.3	U2V2W2	-	W1
E2.4	U1V1W1	-	U2V2W2
Inaccessible star point			
E2.5	V1	-	U1
E2.6	W1	-	V1
E2.7	U1	-	W1

By using the extended measurements listed in Tables 3 and 4 as a supplement to the standard measurements of Tables 1 and 2, more detailed information can be obtained about the specific location of dominating discharge sources within the stator winding system, since these tests utilize the attenuation of pulses when travelling along the winding.

8 Normalization of measurements

8.1 General

Due to pulse propagation, resonance and mutual cross coupling in machine windings, mentioned in 4.3, calibration is not possible. The aim of normalization is to ratio out various influences of the test circuit, for example power supply connections, stray capacitance, coupling capacitance and test object capacitance, by injecting a well-defined reference pulse at the machine terminals with the complete test circuit connected. Normalization is to ensure that the PD measuring system provides sufficient sensitivity to measure a specified value of PD magnitude correctly, as it appears at the machine terminals during the measurement, and to show that the PD detection system used, is responding in a repeatable fashion. In addition, normalization of the test circuit facilitates comparisons between measurements on objects having the same design, taken with the same PD device. Normalization of the test circuit should be performed by injecting short-duration current pulses of known magnitude by means of a reference pulse generator (calibrator) conforming to the specifications given in IEC 60270.

Il est important de souligner les points suivants:

- la normalisation ne définit pas la fonction de transfert inconnue du signal spécifique à la machine, entre la source réelle des DP dans le système d'isolation des enroulements et l'emplacement d'installation des détecteurs, laquelle dépend généralement de l'implantation de la source des DP et de la conception spécifique des enroulements;
- la normalisation au niveau des bornes de la machine ne représente pas de manière adéquate les impulsions de DP qui apparaissent effectivement à un endroit inconnu de l'enroulement statorique. Par conséquent, l'opération de normalisation d'une mesure réalisée sur des enroulements complets ne permet pas de fournir une mesure de la qualité du système d'isolation en termes de grandeurs absolues;
- la normalisation ne peut pas fournir des repères de référence permettant une comparaison directe entre différentes machines.

Dans la mesure où il n'est pas nécessaire de tenir compte des phénomènes de propagation des impulsions lors d'essais réalisés sur des bobines, barres et autres composants individuels d'enroulements entièrement finis et qui peuvent être considérés comme des capacités localisées, la normalisation en termes d'amplitude des DP, selon la CEI 60270, peut également servir de base de comparaison absolue entre différents objets et fournir ainsi une mesure de la qualité, par exemple pour les besoins d'essais relevant de l'assurance de la qualité au cours de la phase de fabrication.

8.2 Composants individuels d'enroulement

Pour les besoins des essais portant sur des composants individuels d'enroulement, il convient de procéder à la normalisation du circuit d'essai décrit en 7.2 selon la procédure d'étalonnage définie conformément à l'Article 5 et à la Figure 4 de la CEI 60270, en injectant des impulsions de courant d'une amplitude d'impulsion spécifiée, le circuit d'essai complet étant conçu de manière à prendre en considération la mesure suivante. Cette opération est réalisée en mettant en œuvre un générateur d'impulsions de référence placé entre les bornes de l'objet soumis à essai et le module d'alimentation à haute tension relié au montage d'essai, mais sans l'activer.

Il convient de procéder à la normalisation à une amplitude qui se situe dans la gamme correspondante des amplitudes prévues afin de garantir une bonne exactitude de l'amplitude spécifiée des DP. Pour les composants individuels d'enroulement, la mesure de l'amplitude des DP, en termes de charge apparente q en [pC] et conformément à la CEI 60270, est recommandée.

8.3 Enroulements complets

Pour les besoins des essais portant sur des enroulements complets, la normalisation des circuits d'essai telle que décrite en 7.3 est réalisée en appliquant des impulsions de courant, d'une amplitude de DP spécifiée, aux bornes de la machine ou au point de montage de l'ensemble de couplage des DP, en utilisant un générateur d'impulsions de référence. Celui-ci est destiné à simuler des impulsions de DP telles qu'elles apparaissent aux bornes de la machine lors de la mesure. Toutefois, il convient de noter que l'utilisation du pC ou du mV ne permet pas de fournir des repères de référence autorisant une comparaison directe entre différentes machines ou lorsque divers détecteurs de DP sont mis en œuvre.

La normalisation est en principe nécessaire pour chaque type de montage d'essai décrit en 7.3, et ce avant le démarrage de l'essai proprement dit portant sur les décharges partielles. En cas de réalisation d'une séquence d'essais relatifs aux DP, par exemple S1.1, S1.2 ou S1.3, au cours de laquelle la symétrie des trois phases de l'enroulement peut être exploitée, la normalisation n'est nécessaire que pour la première parmi ces mesures.

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 cannot provide a benchmark for direct comparison of different machines.

Since pulse propagation phenomena need not be considered when testing fully processed coils, bars and other individual winding components which can be treated as lumped capacitance, normalization in terms of PD magnitude in accordance with IEC 60270 can also serve as a basis for absolute comparison of different objects and can thus give a measure of quality, for example for quality assurance testing during manufacturing.

8.2 Individual winding components

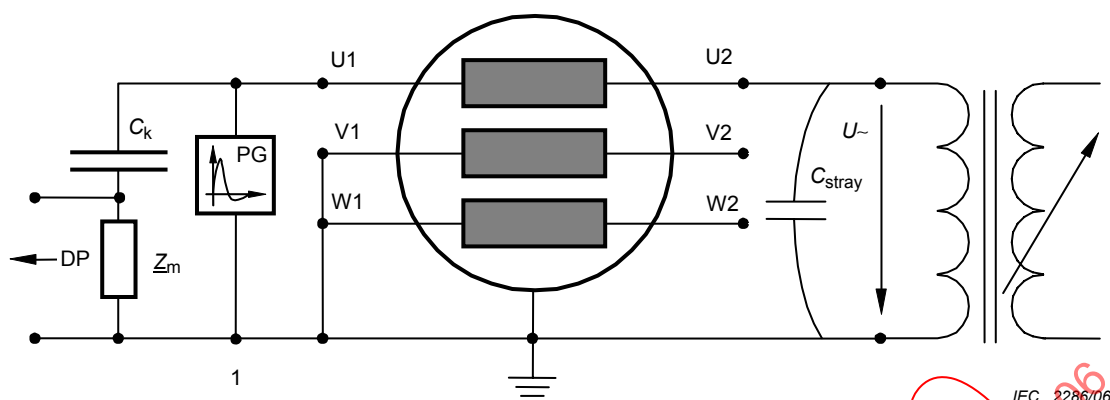
For testing individual winding components, the test circuit described in 7.2 should be normalized in accordance with the calibration procedure given in Clause 5 and Figure 4 of IEC 60270, by injecting current pulses of a specified pulse magnitude, with the complete test circuit designed for the subsequent measurement. This is performed by means of a reference pulse generator connected between the terminals of the test object and the high voltage supply connected to the test arrangement but not energized.

The normalization should be performed at one magnitude in the relevant range of magnitudes expected, to assure good accuracy for the specified PD magnitude. For individual winding components, the measurement of PD magnitude, in terms of apparent charge q in [pC] and in accordance with IEC 60270, is recommended.

8.3 Complete windings

For testing complete windings, the normalization of the test circuits described in 7.3 is performed by injecting current pulses of a specified PD magnitude at the machine terminals or at the location of the PD coupling unit, by means of a reference pulse generator. This is to simulate PD pulses as they appear at the machine terminals during the measurement. However, it should be noted that the use of pC or mV cannot provide a benchmark for direct comparison of different machines, or if different PD detectors are employed.

Normalization is in principle needed for each type of test circuit arrangement described in 7.3, before starting the actual PD test. In case a sequence of PD tests is performed, for example S1.1, S1.2, S1.3, in which the symmetry of the three-phase winding can be utilized, normalization is necessary only for the first of those measurements.



1 PG = Générateur d'impulsions selon la CEI 60270

Composants

$U_{\sim}$	alimentation à haute tension
Z_m	impédance de mesure
C_k	condensateur de couplage
C_{stray}	capacité parasite

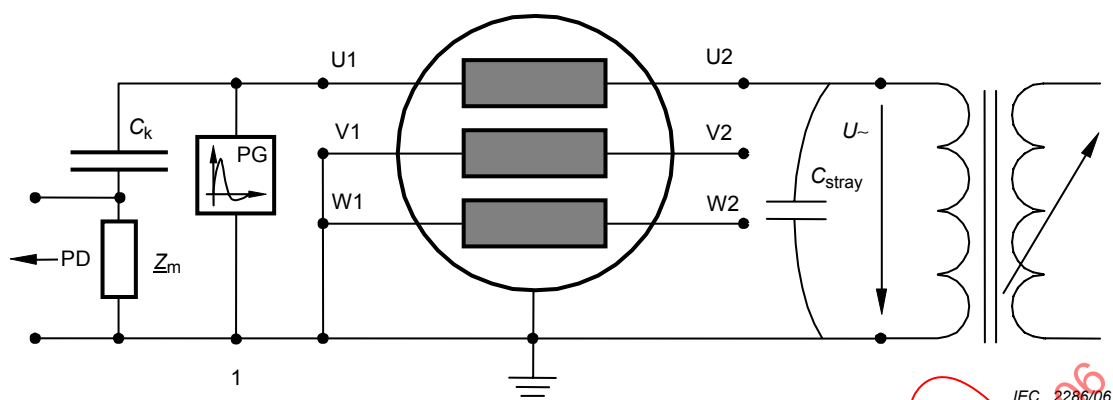
Figure 7 – Normalisation du circuit d'essai pour la mesure S1.1

En fonction de la taille de la machine individuelle soumise à l'essai, une normalisation séparée de chaque phase peut se révéler utile, dans la mesure où, pour les machines de très grandes dimensions, la symétrie des trois phases peut ne pas s'appliquer nécessairement en raison de l'influence due à la conception de la connexion circulaire du circuit.

Il convient d'exécuter la procédure de normalisation d'enroulements complets selon la Figure 7 en suivant les étapes suivantes:

- le circuit d'essai est choisi selon les exigences de 7.3 et en fonction du type de mesure à effectuer (voir Tableaux 1 à 4);
- il convient que tous les câbles de connexion aux bornes de phase, au dispositif de couplage des DP et à l'alimentation en tension d'essai soient les plus courts possibles et que tous les composants du circuit d'essai soient mis en place comme dans le montage final destiné à la mesure, l'alimentation en tension d'essai étant branchée mais non activée;
- le générateur d'impulsions de référence est raccordé entre la phase à soumettre à l'essai et la terre, les câbles devant être les plus courts possibles afin d'éviter la distorsion du signal en raison de leur inductance. Dans la mesure du possible, il convient toujours de raccorder directement le générateur d'impulsions de référence à la borne de phase;
- il convient de régler le générateur d'impulsions de manière à obtenir une amplitude d'impulsion dans la gamme correspondante des amplitudes des impulsions prévues délivrées par l'objet soumis à essai;
- les impulsions de référence d'amplitude constante sont mesurées par le dispositif prévu à cet effet pour les DP afin de déterminer un facteur d'échelle pour la mesure suivante.

Dans la mesure où le montage de l'objet soumis à essai dans sa totalité, le câblage de connexion et le dispositif de mesure avec filtre et amplificateur doivent être considérés dans le cadre d'un système entier, la normalisation d'un circuit d'essai individuel d'enroulements statoriques complets n'est valable que pour une machine donnée et pour un système de détection déterminé. Il est important de souligner qu'une normalisation est toujours nécessaire lorsque le nouveau montage d'essai diffère de celui mis en œuvre pour la réalisation d'une mesure précédente de sorte que la symétrie de l'enroulement ne peut être exploitée.



1 PG = Pulse generator according to IEC 60270

Components

$U_{\sim}$	high-voltage supply
Z_m	measuring impedance
C_k	coupling capacitor
C_{stray}	stray capacitance

Figure 7 – Normalization of the test circuit for measurement S1.1

Depending on the size of the individual machine under test, a separate normalization of each phase may be advisable, since for very large machines symmetry of the three phases may not necessarily apply because of the influence of circuit ring connection design.

The procedure of normalization for complete windings in accordance with Figure 7 should be performed as follows:

- the test circuit is selected in accordance with 7.3, depending on the type of measurement to be performed (see Tables 1 to 4);
- all connecting leads to the phase terminals, the PD coupler and the test voltage supply should be as short as possible and all components of the test circuit should be in the final arrangement for measurement with the test voltage supply connected but not energized;
- the reference pulse generator is connected between the phase to be tested, and ground, with leads as short as possible to avoid distortion of the signal because of lead inductance. If possible the reference pulse generator should always be connected directly to the phase terminal;
- the pulse generator should be adjusted to an adequate pulse magnitude in the relevant range of magnitudes expected from the test object;
- the reference pulses of constant magnitude are measured by the PD device to determine a scale factor for subsequent measurement.

Since the entire arrangement of the test object, connecting cables and measurement device with filter and amplifier needs to be considered from a system perspective, the normalization of an individual test circuit for complete stator windings will still only hold for a given machine and a given detection system. It is important to emphasize that a normalization is always needed if the new testing arrangement differs from that of the previous measurement so that no winding symmetry can be utilized.

En principe, des procédures de normalisation plus perfectionnées pourraient être exécutées; elles permettent d'obtenir des informations sur l'amortissement des impulsions et les effets du couplage croisé d'impulsions traversant l'enroulement. Cependant, ces procédures dépassent le domaine d'application de cette spécification.

9 Modes opératoires d'essai

9.1 Réalisation de mesures de DP au niveau des enroulements et des composants d'enroulements

9.1.1 Généralités

Les mesures à l'arrêt des DP peuvent être effectuées sur des enroulements complets, des phases distinctes ou des composants individuels d'enroulement. En cas de mesure sur des enroulements complets ou des parties d'enroulement, l'objet soumis à essai doit être débranché de toute source d'alimentation externe, de toute barre omnibus, de tout parafoudre, de tout condensateur de surtension et de tout système d'excitation. Dans la mesure du possible, il convient que le point de contact destiné au raccordement du câble d'essai se situe toujours au niveau des bornes de la machine. Dans tous les cas, il convient de ne jamais effectuer les raccordements au niveau du disjoncteur. Lors de l'ensemble des essais ultérieurs et conformément aux exigences indiquées à l'Article 7, il convient que l'ensemble du circuit d'essai, y compris tous les composants, soit monté de la même manière que celle prévue pour la mesure initiale afin de pouvoir comparer les mesures réalisées. Par ailleurs, il est important de conserver le même système de mesure utilisé conformément à l'Article 5 et la même procédure de normalisation appliquée selon les exigences données à l'Article 8 de manière à obtenir des résultats de mesures comparables, par exemple eu égard à leur évolution. En outre, il convient de bien documenter les conditions effectives d'essai dans le rapport d'essai, conformément à l'Article 11.

9.1.2 Appareillage d'essai et exigences de sécurité

Conformément à l'Article 7, il convient que l'alimentation en tension d'essai utilisée pour l'excitation de l'enroulement soit suffisamment exempte de DP sur la gamme des tensions d'essai applicables. Il convient que la forme d'onde de la tension appliquée corresponde à la formule suivante: $U_{pp}/U_{rms} = 2\sqrt{2}$, $\pm 5\%$. Il convient aussi que l'alimentation électrique dispose d'une puissance apparente nominale suffisante (en kVA) qui permet l'excitation de l'enroulement. A défaut de disponibilité d'une telle source d'alimentation, une certaine forme de compensation de puissance réactive peut être utilisée en parallèle ou en série avec la source d'alimentation d'essai. Une autre solution acceptable consiste à effectuer des essais portant sur les DP à des fréquences inférieures, par exemple en utilisant un appareillage délivrant une puissance à 0,1 Hz, ou à des fréquences supérieures jusqu'à 400 Hz en cas d'utilisation d'un système d'essai de résonance. Dans ce cas, il convient de noter que les résultats obtenus lors d'essais portant sur les DP et réalisés à très basse fréquence peuvent s'écarter sensiblement de ceux correspondant à des essais effectués à fréquence industrielle; de ce fait, une comparaison directe des résultats peut être alors impossible [3]. Quelle que soit la méthode retenue, il convient d'effectuer tout essai ultérieur en utilisant la même alimentation électrique afin de pouvoir suivre l'évolution des résultats des essais dans le temps.

Dans le cadre de l'essai portant sur les DP et impliquant une haute tension, les exigences de sécurité applicables incluent, sans s'y limiter, les éléments suivants:

- le circuit doit disposer d'un relais ou d'un contacteur de protection à maximum de courant et fiable qui coupe l'alimentation en cas de défaillance ou de contournement électrique;
- dans la mesure du raisonnable, il convient que toutes les connexions à haute tension aux bornes des enroulements statoriques soient aussi courtes que possible, et elles doivent disposer de moyens de fixation permettant d'éviter leur débranchement par inadvertance pendant le déroulement de l'essai. Il convient de prévoir une tige de mise à la terre;

In principle, more sophisticated normalization procedures could be performed, which provide information on pulse damping and cross-coupling effects of travelling pulses within the winding. However, these procedures are beyond the scope of this specification.

9 Test procedures

9.1 Acquiring PD measurements on windings and winding components

9.1.1 General

Off-line PD measurements may be obtained on complete windings, individual phases, or individual winding components. In the case of complete or partial windings, the test object shall be disconnected from all external power supplies, bus work, surge arrestors, surge capacitors, and excitation systems. Where possible, the point of test lead contact should always be at the machine terminals. Under no circumstances should the contacts be made at the circuit-breaker. In all subsequent tests, the entire test circuit, including all components in accordance with Clause 7, should be arranged in the same way as for the initial measurement to ensure that measurements can be compared. Furthermore, it is important that the measurement system used in accordance with Clause 5 and the normalization procedure applied in accordance with Clause 8 are always the same to obtain comparable measurement results, for example for trending. In addition, the actual test conditions should be well-documented in the test report in accordance with Clause 11.

9.1.2 Test equipment and safety requirements

The test voltage supply used to energize the winding should be sufficiently PD free, in accordance with Clause 7, over the range of applicable test voltages. The waveform of the applied voltage should have $U_{pp}/U_{rms} = 2\sqrt{2}$, $\pm 5\%$. The voltage supply should also have sufficient apparent power (kVA) rating to energize the winding. If such a unit is not readily available, some form of reactive compensation can be used in parallel or in series with the test source. As an alternative, it is acceptable to perform PD tests at lower frequencies, for example by using equipment that supplies power at 0,1 Hz, or at higher frequencies up to 400 Hz when using a resonance test system. In this case, it should be noted that the PD results obtained from very-low frequency tests might significantly differ from that at power frequency and thus direct comparison might not be possible [3]. Whichever method is chosen, any subsequent tests should be performed using the same power supply to allow trending of the test results over time.

Applicable safety requirements of the high-voltage PD test include, but are not limited to, the following:

- a) the circuit shall be equipped with reliable over-current relay or contactor to disconnect the power supply in the event of failure or flashover;
- b) all high-voltage connections to the stator winding terminals should be as short as can be reasonably achieved, and shall have secure attachments to avoid inadvertent disconnection during the test. A grounding stick should be available;

- c) il convient de signaler clairement la zone périphérique située à proximité immédiate de l'objet soumis à essai en l'entourant de cloisons à haute visibilité;
- d) il convient que deux personnes au moins participent aux opérations de connexions et de mise sous tension.

NOTE Il convient de respecter les règles et les règlements en matière de santé et de sécurité pendant l'essai.

9.1.3 Préparation des objets à soumettre à l'essai

Avant de démarrer l'essai, il convient de s'assurer de l'état de propreté du stator. De plus, une distance suffisante dans l'espace est nécessaire entre connexions de phase adjacentes et entre câbles internes à l'intérieur de l'enroulement. Il convient que les câbles ne se touchent pas et ne soient pas en contact avec toute surface à potentiel électrique différent.

Afin de s'assurer que, pour la réalisation de l'essai, le système d'isolation de l'enroulement offre une rigidité diélectrique suffisante et avant le démarrage de l'essai portant sur les DP, il est recommandé de vérifier la résistance d'isolement, qui devrait généralement être supérieure à 100 MΩ corrigée à 40 °C [4]. La mesure de la résistance d'isolement permettra de se rendre compte si l'enroulement est excessivement encrassé ou non, s'il est chargé d'humidité ou si le système d'isolation est défectueux. En cas de résistance d'isolement insuffisante, il est utile de prendre des mesures électriques après nettoyage et séchage de l'enroulement et/ou après identification de la cause à l'origine de la faible résistance d'isolement. Toutefois, sous réserve d'accord entre la partie chargée de la réalisation de l'essai et l'acheteur, la machine peut être soumise à l'essai portant sur les DP sans autre forme de traitement.

Il convient de préparer avec soin les composants individuels d'enroulement (par exemple bobines, barres ou parties d'enroulement telles que statorettes) avant d'appliquer la haute tension. Il convient que ces éléments soient propres et secs, la protection contre l'effet couronne étant appliquée. Il convient d'éviter les accroissements de champs électriques aux extrémités des composants ; il convient que tous les brins soient convenablement en contact. Il convient que le revêtement d'encoches conducteur soit en contact avec le potentiel à la terre sur toute sa longueur afin de constituer une surface équipotentielle. Un mince fil de cuivre souple, des fils toronnés, des feuilles métalliques ou des modèles d'encoches adaptés sont recommandés.

9.1.4 Stabilisation

Généralement, l'activité des DP décroît pendant les premières minutes après l'application de la tension et un temps de stabilisation assurera alors un comportement plus stable des DP à mesurer dans l'enroulement ou le composant d'enroulement concerné. Pour cette raison, il convient de mettre en condition l'objet soumis à essai immédiatement avant l'essai par une excitation de quelques minutes avant de commencer à recueillir les données relatives aux DP. Afin d'éviter des contraintes excessives au niveau de l'enroulement, il convient de choisir soigneusement la tension à appliquer en tenant compte de l'état de l'enroulement. Pour des enroulements neufs et déjà utilisés, il est recommandé de prévoir une période d'environ 5 min de stabilisation à la tension d'essai maximale (voir 9.1.5). La stabilisation des composants individuels d'enroulement peut également se révéler utile. Après le cycle de stabilisation, la tension peut être appliquée de nouveau afin de commencer les mesures des décharges partielles.

9.1.5 Tensions d'essai

Pour les besoins de l'essai portant sur les DP, l'objet soumis à essai est connecté au circuit selon les dispositions spécifiées à l'Article 7 et l'augmentation de la tension appliquée intervient en escalier et selon des échelons judicieusement définis (par exemple $\Delta U = 0,2 U_{\max}$) ou en rampe et selon une courbe linéaire continue ($\leq 1 \text{ kV/s}$) jusqu'à atteindre la tension d'essai maximale $U_{\max}$.

- c) the area immediately surrounding the test object should be clearly marked off using highly visible barriers;
- d) at least two persons should be in attendance during the process of making connections and applying voltage.

NOTE Health and safety rules and regulations may be applicable during the test.

9.1.3 Preparation of test objects

Before starting the test, the stator should be inspected for cleanliness. Furthermore, sufficient air clearance between adjacent phase connections and between internal cables within the winding are needed. Cables should not touch each other, or any surface at different potential.

To ensure that the winding insulation has sufficient dielectric strength for the test, it is recommended to check the insulation resistance before starting the PD test, which should generally be above 100 M Ω when corrected to 40 °C [4]. Measurement of the insulation resistance will reveal whether or not the winding is excessively dirty, damp or if the insulation is damaged. If the insulation resistance is insufficient, it is advisable to take electrical measurements after the winding has been cleaned and dried and/or the source of the low insulation resistance value has been located. However, subject to agreement between tester and purchaser, the machine may be PD tested without further treatment.

Individual winding components (e.g. coils, bars, or winding sections such as statorettes) should be carefully prepared before any high voltage is applied. They should be clean and dry with the final corona protection applied. Electrical field enhancements at the ends of the components should be avoided, with all strands being in good contact. The conductive slot coating should be in contact with ground potential throughout its whole length to form an equipotential surface. A thin, flexible copper wire, stranded wires, metallic foils or suitable slot models are recommended.

9.1.4 Conditioning

PD will typically decrease during the first minutes of voltage application and thus conditioning will ensure more stable PD behaviour of the winding or winding component to be measured. Therefore, the test object should be conditioned immediately before the test by energizing for several minutes before acquiring PD data. To avoid over-stressing the winding, the applied voltage should be carefully chosen based on the winding condition. For new and used windings, a conditioning period for about 5 min at the maximum test voltage (see 9.1.5) is recommended. Conditioning may be useful also for individual winding components. Following the conditioning cycle, the voltage may then be re-applied to start the partial discharge measurements.

9.1.5 Test voltages

For the PD test, the test object is connected to the circuit in accordance with Clause 7 and the increase in applied voltage is made either in suitably chosen steps (e.g. $\Delta U = 0,2 U_{\max}$) or by a continuous ramping (≤ 1 kV/s) up to the maximum test voltage $U_{\max}$.

En cas de montée de la tension par échelons (voir Figure 8a), un temps de stabilisation d'au moins 10 s à chaque échelon est recommandé afin de pouvoir consigner les paramètres pertinents concernant les DP, y compris le patron des DP à chaque échelon de tension.

En cas de montée en rampe de la tension d'essai, la source d'alimentation électrique doit être suffisamment exempte de DP lors de la régulation de tension.

Pour des enroulements et des composants d'enroulement neufs, il convient de choisir la tension d'essai maximale appliquée, $U_{\max}$, parmi les seuils de tension suivants:

$U_1 = U_N / \sqrt{3}$ ou tension de service (phase-terre) du système d'isolation;

$U_2 = 1,2 U_N / \sqrt{3}$, ou 120 % de la tension de service (phase-terre) du système d'isolation;

$U_3 = U_N$, ou tension assignée entre phases du système d'isolation.

Des tensions d'essai plus élevées peuvent permettre d'obtenir des informations supplémentaires.

NOTE Pour des enroulements déjà utilisés, il convient que la partie chargée de la réalisation de l'essai et l'acheteur conviennent de la vitesse de rampe et de la tension d'essai maximale.

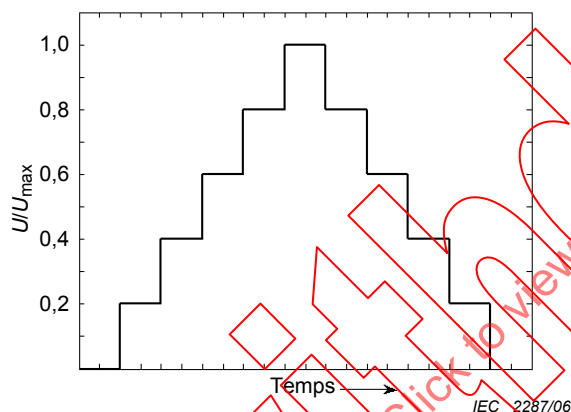


Figure 8a – Mise sous tension par montée progressive et par échelons de $U/U_{\max} = 0,2$

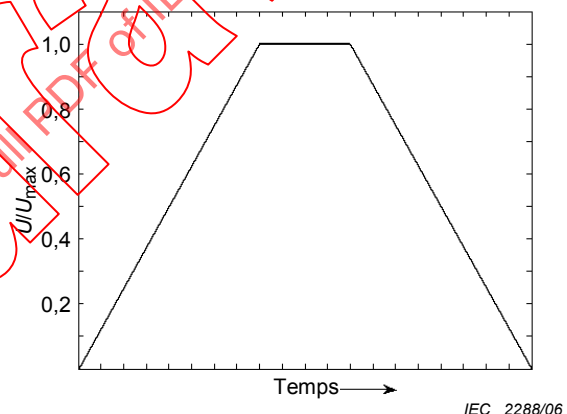


Figure 8b – Mise sous tension par montée en rampe de la tension d'essai

Figure 8 – Tension appliquée à l'objet d'essai durant la mesure des DP

9.1.6 Mode opératoire d'essai portant sur les DP

9.1.6.1 Evaluation du bruit de fond

Avant le démarrage de l'essai portant sur les DP, il convient de vérifier le niveau du bruit de fond inhérent au dispositif de mesure afin de s'assurer que le montage d'essai présente un niveau de bruit et de décharges partielles suffisamment faible jusqu'à la limite de la tension d'essai maximale. Il convient d'effectuer cette vérification après avoir achevé entièrement les opérations préparatoires de mesure des DP pour l'essai, en remplaçant de préférence l'objet à soumettre à l'essai par un condensateur exempt de décharges partielles, ou, à défaut d'un

In the case of a stepped voltage increase (see Figure 8a), a dwell time on each step of at least 10 s is recommended to record the relevant PD parameters including the PD pattern at each voltage step.

In case of a continuously ramped test voltage, the power supply needs to be sufficiently PD free during voltage regulation.

The maximum applied test voltage $U_{\max}$ for new windings and winding components should be selected from the following voltage levels:

$U_1 = U_N / \sqrt{3}$, or operating (line-to-ground) voltage of the insulation system;

$U_2 = 1,2 U_N / \sqrt{3}$, or 120 % of operating (line-to-ground) voltage of the insulation system;

$U_3 = U_N$, or rated line to line voltage of the insulation system.

Higher test voltages may provide additional information.

NOTE For used windings, the ramping rate and maximum test voltage should be agreed between tester and purchaser.

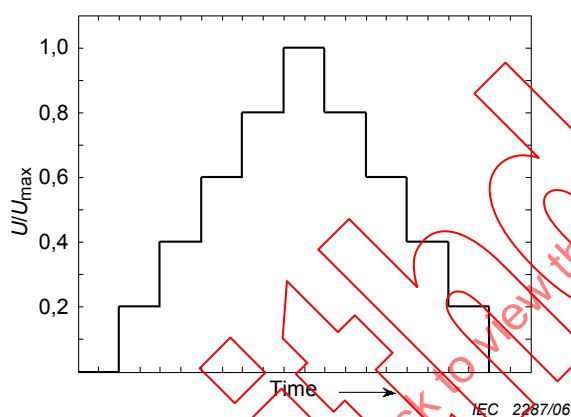


Figure 8a – Gradual stepped power-up in steps of $U/U_{\max} = 0,2$

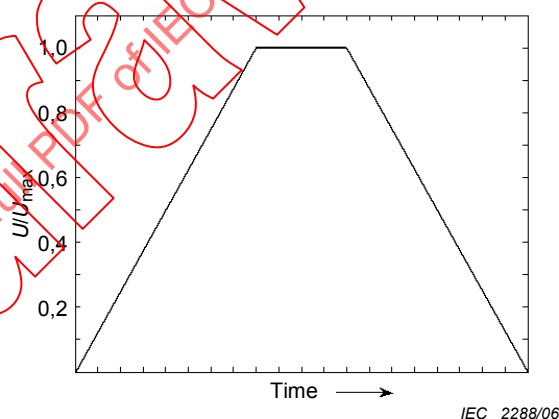


Figure 8b – Continuous power-up with ramped test voltage

Figure 8 – Test voltage applied to the test object during PD measurement

9.1.6 PD test procedure

9.1.6.1 Background noise assessment

Before starting the PD test, the level of background noise associated with the measurement arrangement should be obtained to ensure that the test arrangement has sufficiently low noise and PD up to the maximum test voltage. This should be performed with the PD measuring arrangement fully prepared for the test, preferably by replacing the test object by an appropriate discharge free capacitor, or if such a capacitor is not available by running the entire test arrangement at no-load with power supply, PD coupling unit and PD measurement device and

tel condensateur, en faisant fonctionner à vide l'ensemble du montage d'essai, y compris l'alimentation, l'ensemble de couplage des DP et le dispositif de mesure des DP par application des tensions d'essai jusqu'à leur seuil maximal, sauf l'objet à soumettre à essai qui sera débranché. En cas de réalisation de l'essai à vide, le circuit d'essai doit faire l'objet d'une procédure de normalisation séparée et à vide afin de dégager des valeurs fiables relatives aux DP. En cas d'application des tensions en rampe lors des essais suivants, il convient d'effectuer l'essai à vide en respectant la même pente de montée en tension.

9.1.6.2 Réduction des effets du bruit et des perturbations

Le bruit généré par des sources inhérentes à l'appareillage de mesure ne peut pas être éliminé en pratique, tel que par exemple le bruit thermique, conformément à l'Annexe C (bruit, perturbation et sensibilité). Les perturbations théoriquement générées par des éléments externes peuvent être réduites voire éliminées par des mesures adéquates. Tout d'abord, il est nécessaire de localiser de tels signaux perturbateurs dès leur apparition et de prendre les mesures appropriées permettant leur élimination. Généralement, les recommandations suivantes peuvent contribuer à optimiser les performances du dispositif de mesure:

- utiliser une combinaison éprouvée d'ensemble de couplage des DP et d'appareillage de mesure;
- installer l'ensemble de couplage le plus près possible de l'objet soumis à essai afin de réduire l'effet d'amortissement entre l'objet soumis à essai et le dispositif de couplage;
- raccorder l'alimentation et l'ensemble de couplage des DP aux bornes opposées de l'enroulement, conformément aux dispositions de l'Article 7, afin de garantir un affaiblissement des perturbations générées par l'alimentation dès leur propagation à travers l'enroulement;
- lors de l'essai portant sur un ensemble complet d'enroulements statoriques, s'assurer que les câbles de raccordement des détecteurs de température à résistance (RTD) sont bien fixés à la carcasse statorique reliée à la terre;
- la disposition du transformateur et de l'ensemble de couplage des DP nécessite de faire l'objet d'une procédure de normalisation et d'un essai distinct afin d'obtenir des informations cohérentes sur les amplitudes des signaux perturbateurs;
- avant tout emploi, il est recommandé de soumettre le montage d'essai à une opération de normalisation et de mesure. En fonction des points de mesure et de la durée de celle-ci, la qualité du réseau d'alimentation peut varier et/ou le transformateur peut s'encrasser de plus en plus sur des périodes de temps plus longues. Par ailleurs, le système d'isolation du transformateur peut subir les effets du vieillissement ou être affecté par d'autres phénomènes qui peuvent se produire;
- en général, la mise à la terre de l'objet soumis à essai et du dispositif de mesure doit être convenablement réalisée (grande surface de mise à la terre). Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser le même point de raccordement pour le dispositif de couplage des DP, l'objet soumis à essai et l'appareillage de mesure;
- aménager le montage d'essai de la manière la plus compacte possible. Des câbles de mesure et de mise à la terre de longueur réduite et des circuits de faibles dimensions réduisent l'inductance propre ainsi que tout couplage électromagnétique à l'intérieur du circuit d'essai par effet d'antenne;
- certains câbles de mesure nécessitent une résistance d'adaptation destinée à empêcher les réflexions. Pour les mêmes raisons, il convient de n'utiliser que des câbles dont la fiabilité est reconnue;
- certains appareils électroniques, tels que les ordinateurs et écrans, par exemple, peuvent générer des perturbations qui affectent le dispositif de mesure. Souvent, l'orientation de ces dispositifs vers une autre direction peut permettre de réduire de tels effets sur les mesures.

only the test object being disconnected, up to the maximum test voltage. In the case of the no-load test, the test circuit needs to be normalized separately for the no-load condition to gain reliable PD values. If ramped voltages are to be applied during subsequent testing, the no-load test should be done with the same slope.

9.1.6.2 Reducing the influence of noise and disturbance

Noise resulting from sources inherent in the measuring equipment cannot practically be eliminated, for example thermal noise in accordance with Annex C (noise, disturbance and sensitivity). Disturbances, which are assumed to result from external components, can be reduced or even eliminated by appropriate measures. In a first step, it is necessary to localize such disturbance signals when they appear and to take appropriate measures to minimize them. In general, the following guidelines can be given to optimize the measurement arrangement:

- use a proven combination of PD coupling unit and measuring equipment;
- place the coupling unit as close to the test object as possible, to reduce damping between the test object and the coupler;
- connect the power supply and the PD coupling unit to opposite winding terminals in accordance with Clause 7 to ensure that disturbances from the power supply will be attenuated when propagating through the winding;
- when testing complete stator windings ensure that the leads of all embedded temperature detectors (RTDs) are anchored to the grounded stator frame;
- the arrangement of transformer and PD coupling unit needs to be normalized and tested separately to get meaningful information about the magnitudes of the disturbances;
- normalization and measurement of the test arrangement is recommended before every usage. Depending on the location and time of measurement, the quality of the supply net may change and/or the transformer may get more and more dirty over longer times. Furthermore, the transformer insulation may age, or whatever may happen;
- in general the grounding of the test object and the measuring device has to be good (large area grounding). If possible, the same connection point for the PD coupler, the test object and the measuring equipment should be used;
- build the test arrangement as compact as possible. Short measuring cables, short ground leads and compact circuit dimensions reduce the inductance and also any electromagnetic coupling into the test circuit by antenna effects;
- some measuring cables need a matching resistor to avoid reflection. Only proven cables should be used for the same reason;
- some electronic device, for example computers and monitors, may cause interference to the measuring device. Often positioning these devices into another direction can reduce such influences on the measurement.

9.1.6.3 Essais portant sur les DP

Après avoir préparé entièrement le circuit de mesure des DP en vue de l'essai conformément aux dispositions spécifiées à l'Article 7, la tension d'essai est appliquée à l'objet soumis à l'essai tel que décrit en 9.1.5. A chaque échelon de tension ou lors de l'augmentation en rampe continue de la tension, il convient d'enregistrer et de traiter les données relatives aux DP recommandées à l'Article 6 pour pouvoir les représenter de manière appropriée. Afin de tracer la courbe $Q_m = f(U)$ et de représenter les tensions d'apparition (TADP) et d'extinction (TEDP) des DP conformément à l'Article 6, il convient d'effectuer la mesure en augmentant et en abaissant ensuite la tension d'essai comme illustré à la Figure 8. Il convient d'appliquer le même taux de variation de la tension lors de l'élévation et de l'abaissement de cette dernière.

Lorsque les valeurs correspondant aux décharges partielles, à l'applications des tensions, sont enregistrées électroniquement et sauvegardées dans des fichiers de valeurs mesurées, il est possible d'établir les diagrammes recommandés à l'Article 6 et de procéder à une évaluation ultérieure, telle que décrite à l'Article 10, afin d'apprécier les résultats de mesure des DP. Il peut s'agir de la distribution des amplitudes d'impulsions, des distributions en phase ou des patrons spécifiques des DP (voir Articles 6 et 10) à différents seuils, lors de l'élévation et de l'abaissement de la tension d'essai.

Il convient de consigner toute remarque ou observation faite lors de l'essai pour consultation ultérieure. En fonction de la machine soumise à l'essai et de l'objet de celui-ci, il convient d'effectuer une séquence adéquate de mesures types et/ou de mesures additionnelles facultatives, conformément aux dispositions de l'Article 7.

9.2 Identification et localisation de la source de décharges partielles

9.2.1 Généralités

La mesure électrique des DP aux bornes de l'objet d'essai permet d'évaluer l'intensité, la fréquence et la polarité des décharges, en cas d'utilisation d'appareils permettant de délivrer les paramètres relatifs aux DP conformément à 6.3. Toutefois, afin de convertir ces paramètres en informations utiles sur l'état de l'enroulement, il est important d'identifier et de localiser la source des décharges partielles.

A priori, l'essai portant sur les DP est effectué généralement sur des phases individuelles alors que les deux autres phases sont raccordées à la terre. Cette configuration permet d'obtenir une distribution caractéristique des DP ou un patron de DP pour chaque phase. Suite à l'essai par phase et en supposant pouvoir disposer d'une alimentation présentant une puissance apparente nominale (kVA) suffisante, la première méthode la plus élémentaire de détermination de l'origine des décharges partielles, dans les conditions d'essai à l'arrêt, consiste à utiliser la source de tension d'essai pour l'excitation simultanée de l'ensemble des trois phases de l'enroulement. Dans ces circonstances, l'effet du gradient de tension entre phases dans la développante est éliminé. Si les trois phases sont excitées simultanément, les décharges partielles associées à l'activité entre phases dans la développante seront éliminées du patron de DP. Les décharges partielles associées à la configuration phase-terre peuvent apparaître de façon manifeste et il convient d'en étudier soigneusement les causes. Une baisse correspondante de l'amplitude des DP et du nombre d'impulsions permet de conclure que la développante contribue au signal obtenu lors de la mesure dans la configuration par phase. Il s'agit d'une méthode utile qui permet de distinguer les DP au niveau de la développante des décharges au niveau de l'encoche.

Afin de localiser la source d'un problème particulier, il peut être utile au processus de diagnostic de subdiviser l'enroulement dans la mesure du possible. Cependant, dans la mesure où les constructeurs de machines mettent en place des cosses de dérivation, des circuits de connexions et des câbles de raccordement à une phase de sorte que ces éléments soient en contact l'un avec l'autre, le fait de relier un circuit à la terre alors que l'autre est excité crée alors une condition anormale permettant d'enregistrer de hauts niveaux de décharges partielles.

9.1.6.3 PD testing

With the PD measuring circuit fully prepared for the test in accordance with Clause 7, the test voltage is applied to the test object as described in 9.1.5. At each voltage step, or during continuous ramping, the PD data recommended in Clause 6 should be recorded and processed to provide appropriate PD data presentations. To provide the $Q_m = f(U)$ curve as well as PD inception (PDIV) and extinction voltages (PDEV) in accordance with Clause 6, the measurement should be performed with increasing and subsequently decreasing test voltage as shown in Figure 8. The same rate of change during voltage increase and decrease should be applied.

If the partial discharge values during voltage application are recorded electronically and stored in files of measured values, the diagrams recommended in Clause 6 can be obtained and further evaluation as described in Clause 10 can be carried out to assess the measured PD results. This may include the distribution of pulse magnitudes, phase resolved distributions or specific PD patterns (see Clauses 6 and 10) at various levels during test voltage increase and decrease.

Any comments or observations during the test should be recorded to benefit future reference. Depending on the machine being tested and the aim of the test, an appropriate sequence of standard measurements and/or optional extended measurements as described in Clause 7 should be taken.

9.2 Identifying and locating the source of partial discharges

9.2.1 General

The electrical measurement of PD at the terminals of the specimen evaluates the intensity, frequency, and polarity of discharges, when using instruments that provide the PD parameters in accordance with 6.3. However, to translate these parameters into useful information about the winding condition, it is important to identify the location of the source of the partial discharges.

Initially, the PD test is generally performed on individual phases while the other two phases are held at ground potential. This will provide a characteristic PD distribution or PD pattern for each phase. Following the per-phase test, and assuming that a power supply of sufficient apparent power (kVA) rating is available, the first and most basic method of determining discharge origin under off-line test conditions is to use the test voltage source to energize simultaneously all three phases of the winding. Under these conditions, the effect of phase-to-phase voltage gradient in the end-winding is removed. If all three phases are energized at once, discharges associated with phase-to-phase activity in the end-winding will be eliminated from the PD signature. Phase-to-ground discharges may still be evident, the causes of which should be thoroughly investigated. A corresponding decrease in PD magnitude and pulse count suggests that the end-winding is contributing to the signal obtained during the per-phase measurement. This is a useful means of segregating end-winding PD from discharges in the slot.

To locate the source of a specific problem, it may be helpful for the diagnostic process to subdivide the winding, if possible. However, since machine manufacturers will run together pole jumpers, circuit rings, and cables from one phase so that these elements are in contact with one another, in this situation, with one circuit grounded while the other is energized, an abnormal condition exists and high PD discharge levels may be recorded.

NOTE Dans les cas nécessitant de soumettre un enroulement subdivisé à l'essai, il convient que l'acheteur et la partie chargée de la réalisation de l'essai consultent le constructeur de la machine pour connaître ses recommandations avant de démarrer l'opération.

Des méthodes d'essai variées et complémentaires ont été élaborées en se fondant sur les différents effets physiques des décharges partielles. Afin de confirmer la présence ou l'absence de décharges partielles au niveau de la développante, une méthode pratique consiste, lors de ces essais, à examiner l'enroulement des deux côtés en utilisant un viseur ou un appareil de prise de vues capable de détecter un effet couronne. Les essais à l'arrêt offrent l'avantage de pouvoir réaliser de tels contrôles après avoir retiré les couvercles et le rotor, si nécessaire.

L'exposé ci-après décrit la méthode électrique très répandue de localisation. Des méthodes non électriques de localisation des sources de DP sont décrites à l'Annexe B.

9.2.2 Sondes électromagnétiques

L'utilisation de sondes électromagnétiques pour la localisation de sources de DP nécessite le balayage des encoches statoriques (après démontage du rotor), des zones extérieures adjacentes aux encoches ou de la zone adjacente à la développante à différentes tensions appliquées. En outre, pour effectuer des mesures à U_1 , il peut être souhaitable de prendre aussi des mesures similaires à des échelons de tension intermédiaires et discrets $< U_1$. Généralement, ces types de sondes trouvent un meilleur domaine d'utilisation lorsqu'il s'agit d'informations qui peuvent être comparées à une base de données existante permettant le classement de la machine soumise à essai.

Il convient de noter que l'activité des DP pourrait ne pas se limiter à la développante de la machine. Des boîtes de dérivation, chemins de câbles, terminaux, isolateurs à montage vertical, etc. peuvent permettre d'activer des DP, et il convient de les prévoir en cas d'utilisation de la méthode d'essai avec une sonde. Il convient de noter que les sondes peuvent perturber le champ électrique et éventuellement provoquer ainsi des décharges parasites intempestives. Pour la détection de DP dans la développante en mettant en œuvre de telles sondes, le personnel requis pour la réalisation des essais doit observer des exigences de sécurité supplémentaires.

10 Interprétation des résultats d'essai

10.1 Généralités

Généralement, les essais en usine portant sur les DP au niveau des enroulements et des composants d'enroulement sont destinés à assurer une qualité de fabrication homogène, alors que les essais réalisés sur site et portant sur les DP dans les enroulements permettent de déterminer le degré de vieillissement imputable aux divers facteurs au cours de la durée de vie en service. Par conséquent, l'interprétation des résultats de ces essais est la dernière étape la plus importante une fois achevées les mesures de DP. En fonction des résultats des essais, il doit être établi si ces derniers révèlent de quelle que manière que ce soit la présence de défauts tout en prévoyant, dans l'affirmative, ce qu'ils impliquent en termes de performances du système d'isolation, et une décision doit intervenir quant à la nécessité d'effectuer des essais complémentaires et à la planification et/ou l'exécution de toute opération fondamentale de maintenance corrective.

Il convient de noter que les machines prises individuellement subissent généralement des contraintes spécifiques en service et qu'il existe une grande variété de caractéristiques nominales de conception, de conditions de production et divers systèmes d'isolation offerts par différents fabricants. Cela explique les variations significatives de l'amplitude des décharges partielles qui dépendent des propriétés individuelles de la machine soumise à essai. En conséquence, une comparaison directe entre différents types de machines, en termes de valeurs absolues, n'est pas possible.

NOTE In cases where it is necessary to test a subdivided winding, the purchaser and tester may consult the machine manufacturer for guidance before starting the operation.

A variety of supplementary test methods has been developed, making use of the different physical effects of partial discharges. To confirm the presence or absence of end-winding discharge, it is a useful practice during these tests to examine the winding from both ends using a viewing scope or camera capable of detecting corona discharge. It is an advantage of off-line tests that such inspections can be performed with covers and rotor removed, if required.

The following description deals with the very popular electrical method of localization. Non-electrical methods of locating PD sources are described in Annex B.

9.2.2 Electromagnetic probes

The use of electromagnetic probes to locate sources of PD requires scanning of stator slots (after removal of the rotor), slot exit areas or end-winding area at different applied voltages. In addition to obtaining measurements at U_1 , it may be desirable also to take similar measurements at discrete intermediate voltage steps $< U_1$. Typically, these types of probes are best utilized when data can be compared to an established database that enables ranking of the machine being tested.

It should be noted that PD activity might not be restricted to the machine end-winding. Conduit boxes, cable routing, termination boards and stand-off insulators, etc. can initiate PD, and should be included when using the probe test method. It should be noted that probes can disrupt the electric field, possibly inducing spurious discharges. For PD detection within the end-winding with such probes, additional safety requirements for the test personnel need to be considered.

10 Interpretation of test results

10.1 General

In general, factory PD testing of windings and winding components is intended to ensure consistent manufacturing quality, whereas on-site PD testing of windings is to determine the degree of ageing due to the various ageing factors during operation. Thus, interpretation of results obtained from these tests is the final, most important step after the PD measurements have been taken. Depending on the test results, it has to be decided whether there are any indications of defects and, if so, what they imply regarding the performance of the insulation system, whether any supplementary tests are needed and the planning and/or implementation of any essential corrective maintenance.

It should be noted that individual machines are usually subjected to specific stress profiles during operation and that there is a great variety of design features, production conditions and various insulation systems from different manufacturers. This usually leads to significant variations in the amounts of partial discharges depending on the individual properties of the machine being tested. As a result, a direct comparison of different types of machine in terms of absolute values is not possible.

Il est tout aussi impossible d'établir toute limite absolue pour des enroulements complets, par exemple, en termes de critères d'acceptation à appliquer en cours de production ou en service. Par conséquent, la présente spécification n'établit aucune limite spécifique applicable à l'évaluation de la qualité.

Pour une meilleure interprétation des données d'essai relatives aux DP au niveau d'enroulements statoriques complets, il convient d'examiner soigneusement les résultats consignés dans des rapports d'inspections antérieures, par exemple suite à des contrôles visuels, et d'en tenir compte lors de l'évaluation de l'état de ces éléments.

10.2 Interprétation relative à la TADP, à la TEDP et à Q_m

10.2.1 Interprétation élémentaire

Les résultats fondamentaux permettant l'interprétation de tout résultat d'essai et de mesure à l'arrêt de DP au niveau des enroulements et composants d'enroulement sont ceux qui concernent la tension d'apparition des DP (TADP), la tension d'extinction des DP (TEDP) et l'amplitude de la plus grande DP répétitive des DP désignée par Q_m , mesurée à une tension d'essai croissante et décroissante, conformément à 6.2.

Même si l'emplacement d'apparition des DP affichant la plus forte amplitude ne se situe pas nécessairement au niveau de l'enroulement présentant le plus haut risque, la détection et l'interprétation de l'amplitude des DP en fonction de la tension d'essai fournissent un moyen simple et efficace de détermination des caractéristiques des principales sources typiques des décharges partielles.

Pour des enroulements statoriques complets, l'interprétation est toujours d'ordre comparatif. En d'autres termes, il n'est généralement pas possible de spécifier un seuil acceptable de Q_m ou un seuil de Q_m présentant un haut risque de défaillance du système d'isolation. Comme décrit à l'Article 8, cela concerne les natures inductive, capacitive et de la ligne de transmission d'un enroulement statorique ainsi que le fait que les DP ne sont souvent qu'un signe révélateur du processus d'évolution d'une défaillance, et non une cause directe. Toutefois, une interprétation cohérente et judicieuse portant sur des enroulements complets peut intervenir à la lumière

- de l'évolution de Q_m observée dans le temps sur le même stator, en utilisant la même méthode et le même appareillage d'essai ainsi que les mêmes caractéristiques techniques;
- de la comparaison de Q_m réalisée entre un certain nombre de stators de même conception, en utilisant la même méthode et le même appareillage d'essai ainsi que les mêmes caractéristiques techniques;
- de la comparaison de Q_m réalisée entre différentes phases au niveau d'un seul stator, en utilisant la même méthode et le même appareillage d'essai ainsi que les mêmes caractéristiques techniques.

Les résultats de mesure des DP effectuées sur des bobines ou barres individuelles sont exprimés en pC, et les amplitudes de DP correspondent à des valeurs absolues. Cela permet une comparaison des amplitudes de DP entre différentes bobines ou barres et, en réalité, entre résultats de mesures délivrés par différents appareillages d'essai. Sur des composants individuels d'enroulement, les tensions d'apparition et d'extinction de décharges partielles, respectivement (TADP) et (TEDP), sont mesurées, avec un bruit de fond maximal spécifié en pC.

En général, plus les tensions TADP et TEDP sont élevées, mieux l'enroulement ou les composants d'enroulement de même conception sont imprégnés et moins les défauts du système d'isolation sont présents.

Neither is it possible to establish any absolute limits for complete windings, for example as acceptance criteria for use during production or operation. Therefore, no specific limits that can be used for quality assessment will be given in this specification.

To improve the interpretation of PD test data obtained on complete stator windings, the results from previous inspection reports, for example from visual inspections, should be carefully examined and considered for condition assessment.

10.2 Interpretation of PDIV, PDEV and Q_m

10.2.1 Basic interpretation

The basic results to interpret from any off-line PD test on windings and winding components are the PD inception voltage (PDIV), the PD extinction voltage (PDEV) and the largest repeatedly occurring PD magnitude referred to as Q_m , measured at increasing and decreasing test voltage, in accordance with 6.2.

Even if the PD site, which produces the highest PD magnitude is not necessarily the location in the winding being at most risk, detection and interpretation of PD magnitude as a function of test voltage provides a simple and effective means of characterizing typical dominating PD sources.

Interpretation is always comparative for complete stator windings. That is, it is not generally possible to specify an acceptable level of Q_m , or a level of Q_m where there is a high risk of insulation failure. As described in Clause 8, this is related to the inductive, capacitive and transmission-line nature of a stator winding, as well as the fact that PD is often only a symptom of the failure process, not a direct cause. However, meaningful interpretation for complete windings can occur by

- trending Q_m on the same stator over time, using the same test method and equipment with the same technical characteristics;
- comparing Q_m from several stators with the same design, using the same test method and equipment with the same technical characteristics;
- comparing Q_m between different phases of one stator, using the same test method and equipment with the same technical characteristics.

PD results on individual coils or bars are measured in pC, and the PD magnitudes are absolute. This allows comparison of the PD magnitudes between different coils or bars, and indeed measurements from different test apparatus. On individual winding components, the discharge inception voltage (PDIV) and discharge extinction voltage (PDEV) are measured with a maximum specified noise background in pC.

In general, the higher the PDIV and PDEV the better impregnated the winding or winding components are for the same design and the less insulation deficiencies are present.

10.2.2 Evolution dans le temps des DP au niveau d'une machine

C'est le moyen le plus probant pour l'interprétation des données relatives aux amplitudes des DP au niveau des enroulements statoriques complets, quelle que soit la méthode de détection utilisée. Il s'agit tout d'abord d'obtenir une signature initiale à l'arrêt, de l'activité des DP. Cette signature initiale est meilleure lorsque l'essai est réalisé sur un enroulement neuf. En cas de détérioration de l'enroulement due au fonctionnement opérationnel, Q_m croît généralement avec le temps. Par exemple, le doublement de Q_m sur une année peut être un signe révélateur de l'occurrence d'une détérioration importante. Des essais à l'arrêt, une recherche des DP par sonde ou un contrôle visuel peuvent alors se justifier.

En matière d'évolution des DP dans le temps, une certaine prudence s'impose, à savoir:

- un stator neuf peut connaître une activité relativement importante de DP qui décroît au bout des premières 5 000 à 10 000 h de fonctionnement équivalentes;
- pour que cette évolution ait un sens, il convient que les courbes de tendance n'affichent que les données recueillies à la même tension, à la même température, dans des conditions d'humidité similaires et en utilisant le même détecteur de DP. Dans la mesure du possible, il convient qu'entre les essais, la tension d'essai varie dans la limite de $\pm 2,5\%$ et que la température de l'objet soumis à essai varie dans une plage de $\pm 10^\circ\text{C}$. Pour les machines à refroidissement par hydrogène, il est recommandé d'effectuer les mesures à la pression atmosphérique de l'air, mais en tout état de cause dans les mêmes conditions gazeuses et à la même pression que l'essai précédent;
- les variations de Q_m selon un certain pourcentage, par exemple, de $\pm 25\%$, sont normales et elles sont dues à des changements inévitables des conditions d'essai et plus ou moins au comportement statistique des processus d'évolution des DP.

En cas d'évolution importante dans le temps ou lorsque les valeurs d'affichage individuelles sont élevées en comparaison avec des enroulements ou bobines statoriques similaires, les données relatives aux DP peuvent parfois faire l'objet d'une analyse complémentaire afin de déterminer la cause probable d'une telle activité importante des DP. L'identification des sources de DP mettra alors à profit l'analyse des patrons de DP résolus en phase (Figure 4), selon 10.3.

10.2.3 Comparaisons entre composants d'enroulement ou entre enroulements

Un autre moyen efficace permet de déterminer si un enroulement ou un composant d'enroulement diffère d'un autre; il consiste à comparer les grandeurs relatives aux DP entre des composants d'enroulement ou entre des enroulements. Différents types de comparaisons sont possibles.

a) Essais en usine relatifs à des composants d'enroulements

Des comparaisons peuvent être directement effectuées au niveau de la TADP, de la TEDP et Q_m , lorsque les mesures sont réalisées conformément aux procédures spécifiées dans la CEI 60270, quelle que soit la conception du composant ou quel que soit l'appareillage de mesure. Les résultats obtenus à partir de ces essais peuvent être exploités pour déterminer si un changement est intervenu sur le traitement ou les matériaux isolants utilisés dans le composant concerné. Généralement, un faible pourcentage de composants d'enroulement fait l'objet d'essais relatifs aux DP.

b) Essais en usine relatifs à des enroulements

En confrontant les résultats relatifs aux DP entre machines semblables, la comparaison la plus fiable est celle concernant des stators tous identiques, y compris du point de vue du système d'isolation, et lorsque les essais sont réalisés à la même tension et à une température et dans des conditions d'humidité similaires, conformément à 10.2.2. Par ailleurs, les essais doivent être effectués en utilisant le même appareillage d'essai des DP mis en œuvre dans la même gamme de fréquences et avec le même montage d'essai. A l'instar de l'évolution dans le temps (10.2.2), les variations de Q_m selon un certain pourcentage, par exemple $\pm 25\%$ entre machines, n'est pas significatif. Le but de tels

10.2.2 Trend in PD in a machine over time

This is the most powerful means of interpreting PD magnitude data on complete stator windings, no matter which detection method is used. One should first obtain an initial fingerprint of the off-line PD activity. The initial fingerprint is best when the winding is new. If the winding deteriorates due to operation in service, then Q_m will usually increase over time. For example, doubling of Q_m over one year may be an indication that significant deterioration has occurred. Additional off-line tests, PD probe tests or a visual inspection of the winding may then be warranted.

Some cautions with regard to PD trending over time are:

- a new stator may have relatively high PD that decreases after the first 5 000 to 10 000 equivalent operating hours;
- for the trend to be meaningful, the trend plots should only show data collected at the same voltage, temperature and similar humidity conditions, using the same PD detector. As far as possible, between tests, the test voltage should be within $\pm 2,5\%$, the temperature of test object should be within $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. For hydrogen cooled machines, it is recommended to perform the measurement under atmospheric air conditions, but in any case under the same gas and pressure conditions as the previous test;
- variations of Q_m of a certain percentage, for example $\pm 25\%$, are normal, due to unavoidable changes in test conditions and more or less statistical behaviour of PD processes.

If the trend over time is high, or the individual reading is high in comparison with similar stator windings or coils, then the PD data can sometimes be further analysed to determine the probable cause for the high PD activity. In this case, the analysis of phase resolved PD patterns (Figure 4) in accordance with 10.3 is useful for identifying the PD sources.

10.2.3 Comparisons between winding components or between windings

Another effective way to determine if one winding or winding component is different from another is to compare the PD quantities between winding components or between windings. Different comparisons are possible.

a) *Factory tests on winding components*

Direct comparisons can be made in the PDIV, PDEV and Q_m when the measurements are made in accordance with the procedures in IEC 60270, irrespective of the component design or measuring equipment. The results of such tests can be used to determine if there has been a change in processing or insulating materials used in the component. Usually, only a small percentage of winding components are subjected to PD tests.

b) *Factory tests on windings*

When comparing PD results between similar machines, the most reliable comparison occurs when all the stators are identical including having the same insulation system, and the tests are done at the same voltage, with similar temperature and humidity conditions in accordance with 10.2.2. The tests shall also be performed with the same PD test equipment operating at the same frequency range using the same test arrangement. As for trending over time (10.2.2), variations in Q_m of a certain percentage, for example $\pm 25\%$ between machines is not significant. The purpose of such comparison tests in the factory

essais comparatifs en usine est d'établir la qualité relative des matériaux et le traitement utilisé pour la fabrication de l'enroulement. Les clients souhaitant acquérir des enroulements peuvent obtenir des constructeurs l'assurance qu'un nouveau enroulement a été fabriqué selon le niveau de qualité normal offert dans le passé par le constructeur. En d'autres termes et pour l'enroulement, la valeur de Q_m , à la tension d'essai spécifiée, est par exemple inférieure à 95 % des amplitudes moyennes Q_m dans les mêmes enroulements précédemment produits par le fabricant.

Dans certains cas, le constructeur peut comparer les grandeurs relatives aux DP entre un nouvel enroulement et des enroulements similaires précédemment fabriqués. Dans ce contexte, le constructeur peut disposer d'antécédents indiquant qu'un groupe de différentes conceptions affiche la même distribution statistique des grandeurs relatives aux DP. Généralement, des machines similaires sont de conception identique, appartiennent au même type de machine (moteur, turboalternateur, etc.) et ont la même tension assignée.

En raison des différences de traitement et de matériaux ainsi que des différences vraisemblables entre méthodes d'essai portant sur les DP, il convient qu'en termes de grandeurs relatives aux DP au niveau d'enroulements complets, les comparaisons ne soient pas effectuées entre enroulements ayant des systèmes d'isolation de différentes conceptions ou produits par différents constructeurs.

c) Essai sur site relatif à des enroulements

Des comparaisons peuvent être réalisées entre enroulements de même conception, produits par la même usine et présentant les mêmes caractéristiques nominales, afin d'apprécier quel enroulement peut avoir subi le plus important degré de vieillissement en service. Les enroulements affichant la plus haute valeur de Q_m , à la même tension d'essai, ou la plus faible TADP et TEDP, sont ceux qui auront subi le plus de détériorations. Les enroulements doivent faire l'objet d'essais mettant en oeuvre le même appareillage d'essai et utilisant la même gamme de fréquences.

10.3 Identification des patrons de DP

10.3.1 Généralités

Si les données relatives aux DP selon 6.3, sont enregistrées pour chaque événement impliquant les DP pendant la durée des mesures, il est possible d'adopter une autre méthode d'interprétation de l'activité des DP lors de mesures à l'arrêt. A cet effet, des patrons $\phi-q-n$ conformes à la Figure 4 sont utilisés. Dans la mesure où le degré de détérioration, et donc le risque de défaillance du système d'isolation, dépend dans une large mesure du type spécifique de décharges partielles, il est primordial d'obtenir des informations sûres concernant la source de toute activité de DP, c'est-à-dire des détails sur le type et l'emplacement possible dans l'enroulement statorique ou l'élément d'enroulement.

L'utilisation des patrons $\phi-q-n$ peut permettre de distinguer diverses sources de DP les unes des autres afin d'évaluer le risque associé et de suivre leur évolution de manière séparée. En identifiant le processus physique qui favorise ces sources distinctes ou leur emplacement, il est également possible d'apprécier séparément le risque qu'elles induisent. Il convient de les identifier dans la mesure où il n'existe pas de relation importante entre les amplitudes des DP et le processus de vieillissement révélé par ces patrons de DP.

A titre d'exemple, il peut arriver que deux sous-patrons apparaissant dans un même affichage de DP puissent mettre en valeur des amplitudes similaires de DP: l'une ayant pour origine, par exemple, des délaminations dans l'isolation principale de la section des encoches et l'autre due, par exemple, à des effets superficiels quelque part au niveau de la développante. Bien que ces deux phénomènes génèrent des DP pouvant afficher des amplitudes similaires, la délamination due aux décharges partielles dans la section des encoches est le signe d'un état plus critique du système d'isolation, consécutif à une surchauffe et/ou un cycle thermique, comparé à celui affecté par des DP superficielles dans la zone de la développante, dues par exemple à une contamination ou à un degré d'humidité élevé.

is to establish the relative quality of the materials and processing used to manufacture the winding. Purchasers of windings can seek from manufacturers assurance that a new winding was made with the normal quality level that the manufacturer has achieved in the past. That is, for example, Q_m for the winding at the specified test voltage is lower than 95 % of the mean Q_m magnitudes achieved by the manufacturer on the same windings they have made in the past.

In some cases, the manufacturer may compare the PD quantities from a new winding to similar windings they have made in the past. In this context, the manufacturer may have experience that indicates that a group of different designs have the same statistical distribution as the PD quantities. Generally, similar machines will be of the same design, be the same type of machine (motor, turbogenerator, etc.) and have the same voltage rating.

Due to differences in processing and materials, as well as likely differences in PD test methods, comparisons in PD quantities on complete windings should not be made between different winding insulation system designs or different manufacturers.

c) *On-site test on windings*

Comparisons can be made between windings of the same design, manufacture and ratings, to estimate which winding may have been subjected to the most in-service ageing. Windings with higher Q_m at the same test voltage, or lower PDIV and PDEV, in general will be more deteriorated. The windings shall be tested with the same test equipment using the same frequency range.

10.3 PD pattern recognition

10.3.1 General

If the PD data in accordance with 6.3 are recorded for each PD event during the measuring time, an alternative way to interpret the PD activity during off-line measurements can be utilized. For this, ϕ - q - n -patterns in accordance with Figure 4 are used. 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 PD activity, i.e. on the type and possible location within the stator winding or winding element.

When using the ϕ - q - n patterns, it may be possible to separate various PD sources from each other, to assess the related risk and to trend them separately. When knowing the physical process behind – or the location of these separated sources – it is also possible to weight their risk separately. This should be done, because there is little correlation between the PD magnitudes and the ageing process these PD patterns indicate.

For example, it may happen that two sub-patterns, appearing in one PD reading, may reach similar PD magnitudes: one caused, for example by delaminations within the main insulation of the slot section, the other caused, for example by surface effects somewhere in the end-winding. Although both phenomena generate PD that may reach similar magnitudes, the delamination PD in the slot section indicate a more critical insulation condition, caused by overheating and/or thermal cycling, than the surface PD in the end-winding area, for example caused by contamination or elevated humidity.

10.3.2 Interprétation fondamentale

L'organigramme de la Figure 9 présente une procédure fondamentale qui peut être appliquée en vue de l'identification et de la localisation des sources types de DP dans les enroulements en utilisant des patrons de DP résolus en phase. Chaque sous-patron qui peut être séparé de l'affichage global des DP peut être classé de cette manière.

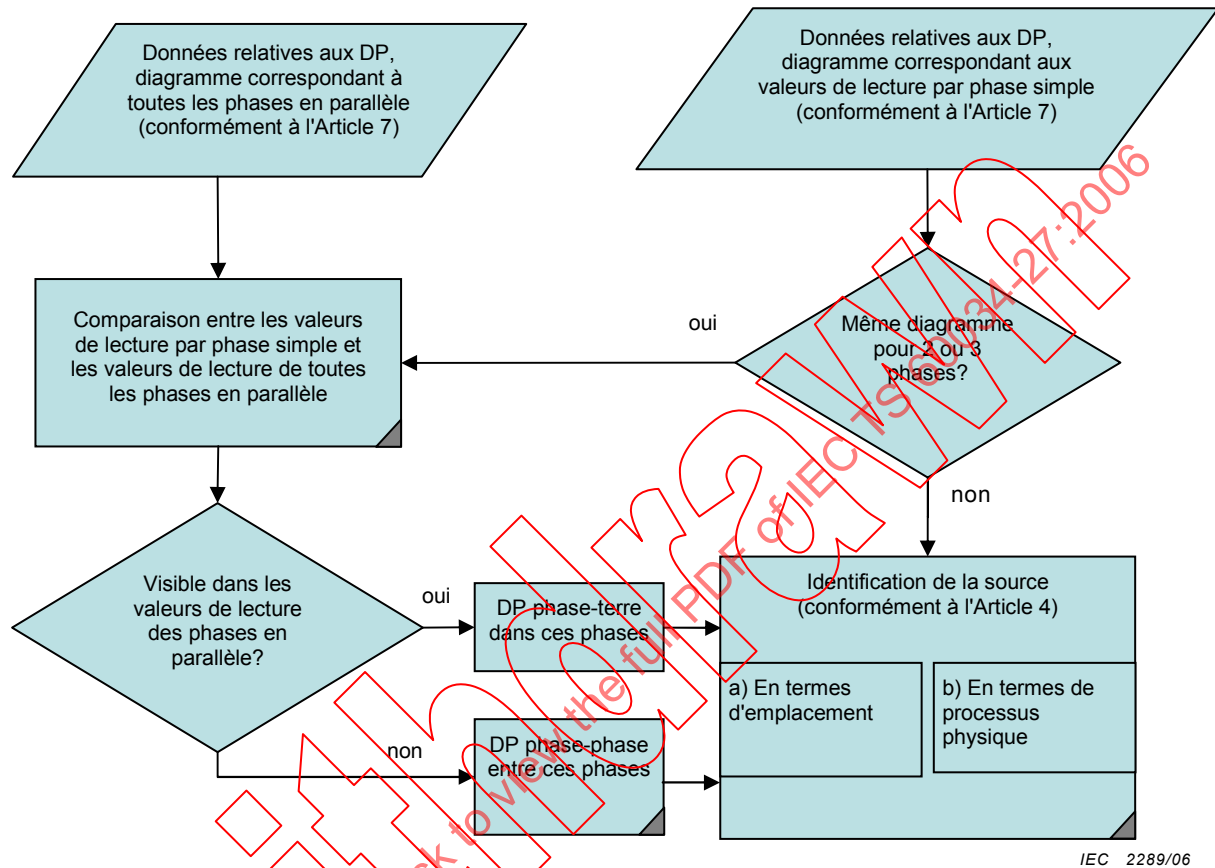


Figure 9 – Exemple pour l'identification et la localisation de sources de DP

Le but de l'interprétation du patron de DP est de séparer les DP de diverses sources au niveau de l'objet soumis à essai. A la lumière de ces informations, il est possible (voir Annexe E)

- d'observer l'évolution et le comportement de chaque source de DP;
- de localiser les divers phénomènes de DP;
- de fournir des informations approximatives relatives à l'emplacement à repérer;
- d'évaluer l'état du système d'isolation en fonction de la source de décharges partielles et de leur emplacement.

Lors de l'analyse de patrons de DP résolus en phase, l'interprétation la plus pertinente peut encore une fois être effectuée

- en suivant l'évolution dans le temps des patrons de DP au niveau du même stator, en utilisant la même méthode et un même appareillage d'essai ainsi que les mêmes caractéristiques techniques;
- en comparant les patrons de DP concernant un certain nombre de stators de conception identique, en utilisant la même méthode et le même appareillage d'essai ainsi que les mêmes caractéristiques techniques;

10.3.2 Basic interpretation

A basic procedure that can be applied for the identification and localization of typical PD sources in windings, by using phase resolved PD patterns, is shown in Figure 9. Each sub-pattern that can be separated from the complete PD reading can be classified in this way.

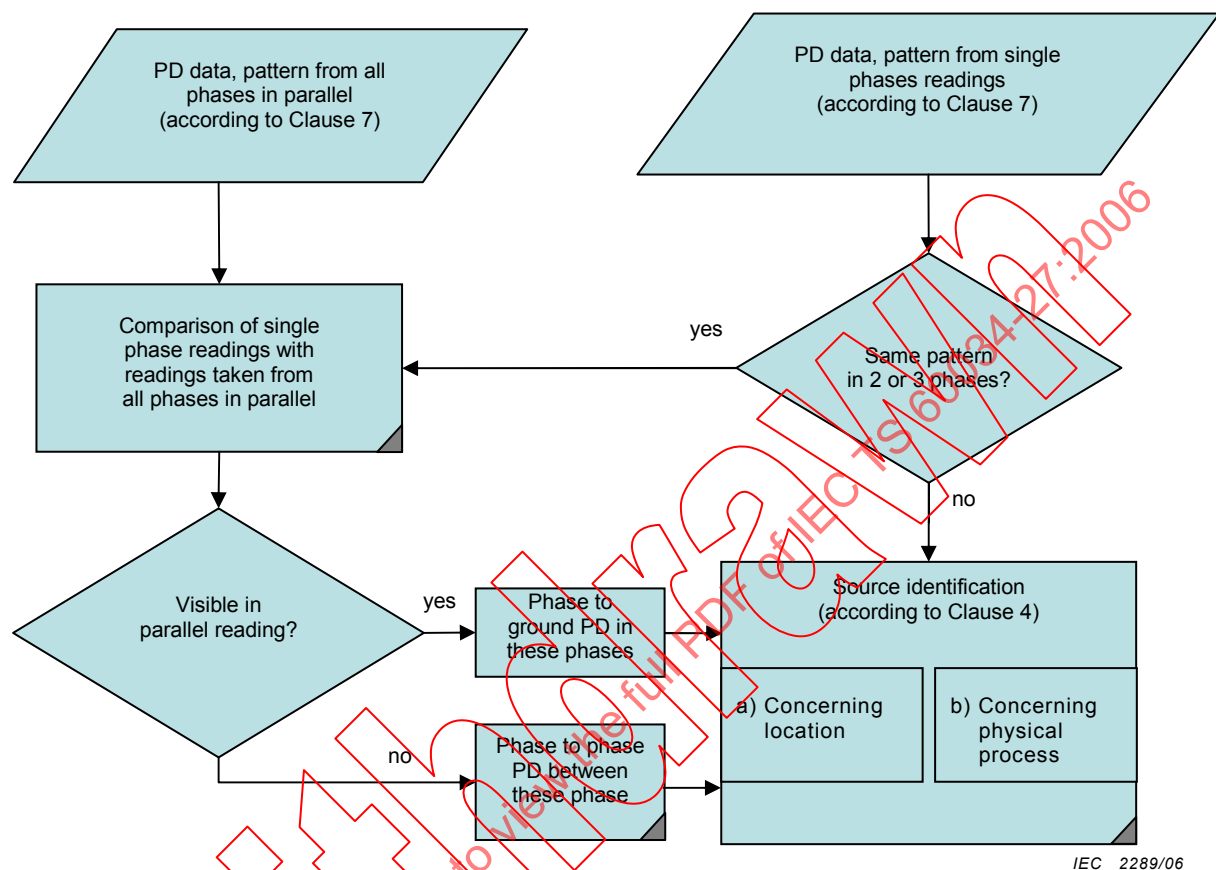


Figure 9 – Example for identification and localization of PD sources

The aim of PD pattern interpretation is to separate PD resulting from various PD sources within the test object. With this information, it is possible to (see Annex E)

- observe the trend behaviour of each PD source;
- localize the various PD phenomena;
- provide rough information concerning location for pinpointing;
- assess the insulation condition, depending on PD source and PD location.

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

- trending the PD pattern on the same stator over time, using the same test method and equipment with the same technical characteristics;
- comparing PD patterns from several stators with the same design, using the same test method and equipment with the same technical characteristics;

- en comparant les patrons de DP relatifs à différentes phases d'un seul stator, en utilisant la même méthode et le même appareillage d'essai ainsi que les mêmes caractéristiques techniques.

Pour faciliter la comparaison des résultats d'essai, il convient d'utiliser une base de données adaptée portant sur les mesures des DP. Il convient théoriquement que cette base de données contienne un historique complet du comportement des DP et des informations sur le fonctionnement et la maintenance de chaque machine soumise à l'essai.

En outre, il est judicieux que la base de données utilisée intègre les résultats des essais portant sur les DP et qui peuvent être visualisés conformément à l'Article 6 de manière à pouvoir comparer directement des patrons types de DP à ceux issus de nouvelles mesures. En mettant en œuvre une telle base de données, les résultats des essais portant sur les DP, exprimés selon les dispositions données à l'Article 6, peuvent être attribués à des sources spécifiques de DP.

La relation spécifique entre la source de DP, son comportement typique ainsi que ses implications en termes de risque de défaillance du système d'isolation est généralement fondée sur l'expérience passée, vérifiée dans la pratique. En outre, la base de données peut également être utilisée pour les besoins de la comparaison directe des résultats relatifs aux DP avec ceux concernant les machines de conception similaire et à système d'isolation similaire et qui fournit des informations utiles.

11 Rapport d'essai

Il convient que le rapport d'essai contienne toutes les données nécessaires à une analyse ultérieure des tendances, outre des recommandations claires à l'attention de l'opérateur et concernant l'état de la machine.

Il convient que le rapport d'essai contienne les éléments suivants.

- Données d'identification de la machine
 - constructeur
 - type et numéro de série
 - année de fabrication
 - enroulement d'origine/date de changement d'enroulement
 - tension assignée
 - courant assigné
 - puissance apparente assignée
 - facteur de puissance assignée
 - fréquence assignée
 - classe d'isolement/température d'enroulement maximale autorisée
 - système d'isolation
 - système de refroidissement du stator/fluides de refroidissement
 - indirectement par air/hydrogène/dioxyde de carbone
 - refroidissement direct par air/hydrogène/eau
- Données d'identification du propriétaire
 - propriétaire
 - lieu
 - unité

- comparing PD patterns between different phases of one stator, using the same test method and equipment with the same technical characteristics.

To facilitate comparison between test results 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.

Furthermore, it is advisable for the database being used to incorporate PD test results that can be visualized in accordance with Clause 6 so that typical PD patterns can be compared directly with those obtained from new measurements. When using such a database, the PD test results, quantified in accordance with Clause 6, may be assigned to specific sources of PD.

The specific relationship between the source of the PD, its typical behaviour and also its implications for the risk of insulation failure, is usually based on past experience verified in practice. In addition, the database can also be utilized for the direct comparison of PD results with those of machines of similar design and insulation system, which provides further useful information.

11 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.

The test report should contain the following items.

- Machine data
 - manufacturer
 - type and serial number
 - year of manufacture
 - original winding/date of rewind
 - rated voltage
 - rated current
 - rated apparent power
 - rated power factor
 - rated frequency
 - insulation class/maximum permitted winding temperature
 - insulation system
 - stator cooling system/media
 - indirect air/hydrogen/carbon dioxide
 - direct cooled/air/hydrogen/water
- Owner's data
 - owner
 - location
 - unit

- Caractéristiques de fonctionnement ²⁾
 - mode de fonctionnement (continu/intermittent)
 - commandé par convertisseur
 - nombre total d'heures de fonctionnement et/ou d'heures de fonctionnement équivalentes à ce jour
 - nombre total de démarrages à ce jour, et le cas échéant, avec suréchauffement, à chaud et à froid, selon le cas
 - nombre de déclenchements à ce jour
 - température d'enroulement maximale et conditions
 - température d'enroulement moyenne
 - événements importants à ce jour
- Circuit d'essai et appareillage
 - description du circuit d'essai
 - appareillage d'essai utilisé
 - constructeur
 - type
 - numéro de série
 - date d'étalonnage et numéro de certificat d'étalonnage
 - capacité électrique du condensateur de couplage (le cas échéant)
 - bande passante du système de mesure des DP
- Conditions de déroulement des essais
 - personne chargée de la réalisation des essais
 - date
 - température ambiante
 - température d'enroulement statorique
 - humidité relative
 - pression atmosphérique de l'air ambiant
 - état de la machine/enroulement statorique (agent de refroidissement normal/sous pression ou en milieu ouvert dans les conditions ambiantes)
- Résultats d'essai
 - résistance d'isolement
 - réglages des appareils
 - seuils de tension d'essai/vitesse de rampe
 - processus de stabilisation
 - normalisation/facteur d'étalonnage par connexion, le cas échéant
 - niveau de bruit
 - sources de perturbations ambiantes, si elles sont connues
 - TADP, TEDP, $Q_m = f(U)$
 - valeur de seuil pour la TADP et la TEDP
 - taux de répétition des impulsions pour Q_m , le cas échéant
 - distribution du nombre de décharges par phase, le cas échéant
 - distribution phase-amplitude des décharges, le cas échéant

²⁾ Données recommandées pour une meilleure interprétation des résultats d'essai portant sur les DP

- Operational data ²⁾
 - operation mode (continuous/intermittent)
 - inverter driven
 - total and/or equivalent operating hours to date
 - total starts to date, if available categorized in hot, warm and cold starts
 - number of trips to date
 - maximum winding temperature and conditions
 - average winding temperature
 - important events to date
- Test circuit and equipment
 - description of the test circuit
 - test equipment used
 - manufacturer
 - type
 - serial number
 - calibration date and certificate number
 - capacitance of the coupling capacitor (if used)
 - measuring bandwidth of the PD measuring system
- Test conditions
 - test specialist
 - date
 - ambient temperature
 - stator winding temperature
 - relative humidity
 - ambient air pressure
 - state of the machine/stator winding (normal cooling medium/pressure, or open at ambient condition)
- Test results
 - insulation resistance
 - instrument settings
 - test voltage levels /ramping rate
 - conditioning process
 - normalization/calibration factor per connection if relevant
 - noise level
 - sources of ambient disturbances if known
 - PDIV, PDEV, $Q_m=f(U)$
 - threshold value for PDIV and PDEV
 - pulse repetition rate for Q_m if available
 - phase-resolved discharge number distribution if available
 - phase-resolved discharge height distribution if available

²⁾ Recommended data to improve interpretation of PD test results

- oscillogrammes des trains d'impulsions, le cas échéant
- patrons de décharges partielles résolus en phase, le cas échéant
- Diagnostic et recommandations
 - fondés sur:
 - résultats des mesures
 - comparaison avec d'autres résultats de mesure, le cas échéant
 - observations faites lors des mesures
 - le cas échéant, une base de donnée de référence peut être utilisée pour la détermination de la nature des décharges mesurées

NOTE Il est recommandé de sauvegarder les résultats des mesures sous le format de données original pour consultation ultérieure.

- oscillogrammes of pulse trains if available
- phase-resolved partial discharge patterns if available
- Diagnosis and recommendations
 - based on
 - measurement results
 - comparison with earlier measurements if available
 - observations made during the measurement
 - if available, a reference database may be used for determination of the nature of the discharges measured

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

Annexe A (informative)

Mesures en fonctionnement des décharges partielles

Les essais en fonctionnement portant sur les DP font référence à des mesures effectuées pendant le fonctionnement normal de l'alternateur ou du moteur. De tels essais peuvent être réalisés en utilisant des dispositifs de couplage installés provisoirement ou à demeure. De telles techniques font partie d'une gamme développée par un certain nombre d'organismes, dont certaines sont disponibles sur le marché. L'IEEE 1434-2000 [1], fournit des éléments de détail sur toutes les méthodes jugées importantes pour l'industrie. Ce document propose une large discussion et des descriptions poussées de l'origine, des conséquences et de la détection des DP par des méthodes en fonctionnement et autonomes.

Le principal avantage des mesures en fonctionnement est que les mesures sont enregistrées alors que la machine tournante est exposée à toutes les contraintes qui s'appliquent en cours de fonctionnement; il s'agit des contraintes thermiques, électriques, environnementales et mécaniques. Par conséquent, lorsque la mesure est effectuée correctement, cette méthode offre le plus haut degré de probabilité d'appréciation de la capacité de la machine à continuer à fonctionner de manière fiable. Les essais en fonctionnement et portant sur les DP ont les avantages suivants:

- répartition correcte des tensions à travers l'enroulement;
- mesures réalisées à la température de fonctionnement;
- présence de forces mécaniques normales.

Le premier avantage permet de réduire le risque d'obtenir des résultats exagérément pessimistes en matière de DP et concernant la machine, puisque la mesure privilégie alors les zones les plus exposées aux contraintes électriques dans l'enroulement. Le second avantage est aussi d'une importance extrême dans la mesure où les DP dépendent de la température dans les machines tournantes ainsi que dans d'autres systèmes d'isolation. Outre l'influence de la température sur les caractéristiques des vides, la variation de la température est réputée avoir des effets profonds sur le comportement des DP au travers de tels mécanismes, comme, par exemple:

- dilatation axiale différentielle thermique induite entre les conducteurs en cuivre et l'isolation,
- dilatation radiale de l'isolation en cas de systèmes d'isolation thermoplastiques.

Par conséquent, il est important de s'assurer que les conditions de fonctionnement de la machine sont maintenues dans une large mesure pendant les essais. Cependant, dans des cas particuliers, il est très utile à l'analyse des données relatives aux DP que les essais portant sur les décharges partielles soient réalisés à divers points de charge et différentes températures et qu'ils permettent ainsi de distinguer les différents effets de la température et des vibrations dus aux forces électromagnétiques agissant sur l'enroulement. Les principaux paramètres de fonctionnement pertinents sont:

- la tension aux bornes;
- la puissance active et réactive;
- la pression d'hydrogène, le cas échéant;
- la température statorique, et
- le courant de stator.

Annex A (informative)

On-line partial discharge measurements

On-line PD tests refer to measurements performed while the generator or motor is operating normally. Such tests can be performed using coupling devices that are temporarily or permanently installed. A range of such techniques has been developed by a number of organizations, some of which are commercially available. Details of all of the industrially important methods are provided in IEEE 1434-2000 [1]. This document contains extensive discussion and descriptions of the origin, consequences and detection of PD using on- and off-line techniques.

The main advantage of on-line measurements is that they are recorded with the rotating machine experiencing all of the operating stresses; thermal, electrical, environmental and mechanical. Consequently, if the measurement is performed properly, this method affords the highest probability of assessing the ability of the machine to continue to operate reliably. On-line PD testing has the following advantages:

- the voltage distribution across the winding is correct;
- the measurements are made at operating temperature;
- normal mechanical forces are present.

The first condition reduces the risk of obtaining overly pessimistic PD results on the machine as it renders the measurement preferentially sensitive to the more highly electrical stressed areas of the winding. The second advantage is also extremely important because of the temperature dependence of PD in rotating machines as well as other insulating systems. In addition to the influence of temperature on void characteristics, temperature fluctuation is also known to have profound effects on PD behaviour through such mechanisms as:

- thermally induced differential axial expansion between the copper conductors and the insulation,
- radial expansion of the insulation in the case of thermoplastic insulation systems.

Consequently, it is important to ensure that the machine operating conditions remain substantially the same when tests are performed. However, in special cases it is very helpful for the analysis of the measured PD data to perform PD tests at various load points and temperatures, thereby being able to separate the different influences of temperature and vibrations due to electromagnetic forces acting on the winding. The principle operating parameters of relevance are:

- terminal voltage;
- real and reactive power;
- hydrogen pressure, if applicable;
- stator temperature, and
- stator current.

L'IEEE 1434-2000 fournit des recommandations relatives aux tolérances prévues pour ces paramètres. Les techniques en fonctionnement, comparées aux méthodes à l'arrêt, offrent principalement l'avantage de permettre la réalisation des essais portant sur les DP en présence des contraintes de fonctionnement. Bien que les essais à l'arrêt, lorsqu'ils sont correctement réalisés, analysés et interprétés, puissent permettre d'avoir un aperçu fort utile sur l'état de l'isolation, il demeure cependant une part d'incertitude dans la mesure où la température est généralement sensiblement différente et en raison de l'absence de forces électromagnétiques au niveau des barres. Pour cette dernière raison, les essais à l'arrêt portant sur les DP ne permettent pas d'établir si l'enroulement est desserré, à moins d'une abrasion très grave de l'armure semi-conductrice consécutive aux mouvements relatifs entre la surface des bobines/barres et le fer.

Les techniques de mesure des DP en fonctionnement présentent toutefois certains inconvénients, à savoir:

- les perturbations électriques;
- la quantité de données, et
- l'interprétation.

Le premier de ces inconvénients, soit le problème posé par le bruit électrique, a été discuté plus haut. La quantité de données peut devenir un problème pour les constructeurs et les utilisateurs ayant à surveiller un grand nombre de machines, même dans des situations où les essais sont espacés de plusieurs mois. Ce problème est encore plus grave en cas d'utilisation de techniques en fonctionnement continu. La solution évidente consiste à utiliser une certaine forme de compression des données ou de traitement d'alarmes, dérivée des procédures de suivi de l'évolution des données spécifiques aux DP de manière à ce que seuls les écarts par rapport à la normale sont considérés mériter une plus grande attention. Des techniques telles que les réseaux de neurones artificiels et les systèmes experts sont en principe adaptées à cette tâche. Malheureusement, dans l'état actuel des connaissances qui permettent de comprendre les causes de DP, leurs mécanismes et leurs effets, il est difficile de définir entièrement tous les points de décision nécessaires à une telle automatisation. En d'autres termes, il est nécessaire de déployer davantage d'efforts dans ce domaine avant de pouvoir espérer disposer de systèmes fiables. Les mêmes remarques s'appliquent à l'interprétation des données. En effet, il existe certaines règles d'interprétation fondamentales qui ont été également suggérées dans les ouvrages consacrés à ce sujet, et des efforts conjugués dans le cadre du CIGRE ont permis de produire un document, le Bulletin technique CIGRE 226 [2], qui formalise ces règles, mais on est encore très loin d'une compréhension parfaite de la signification et de l'importance de certains types de comportements observés des DP. En dépit du succès revendiqué en matière de post-traitement statistique des données relatives aux DP, une interprétation automatisée susceptible d'atteindre le même niveau de confiance que l'observateur averti et expérimenté n'est toujours pas une réalité.

Guidance with respect to the tolerances expected of these parameters is provided in IEEE 1434-2000. The ability to perform PD tests in the presence of the operating stresses is the major advantage of on-line techniques over their off-line counterparts. While off-line tests, when properly performed, analysed and interpreted can provide valuable insight into insulation condition, some uncertainty remains because generally the temperature is significantly different and there are no electromagnetic bar forces. For this latter reason, off-line PD testing cannot determine whether the winding is loose, unless the abrasion of the semiconductive armour resulting from the relative movement between coil/bar surface and core iron is very severe.

There are however, some disadvantages to on-line PD measurement techniques. These are:

- electrical interference;
- volume of data, and
- interpretation.

The first of these disadvantages, the problem of electrical noise, has been discussed extensively elsewhere. Volume of data can become a problem for manufacturers and users monitoring large numbers of machines, even in situations in which the testing intervals are several months apart. This problem is further aggravated when using continuous on-line techniques. The obvious answer is to use some form of data compression or alarm processing, which is derived from specific PD data trending procedures, so that only deviations from the norm are considered worthy of further attention. Techniques such as artificial neural networks and expert systems are, in principle, suited to this task. Unfortunately, with the present understanding of the causes, mechanisms and effects of PD, it is difficult to fully define the decision points necessary for such automation. Clearly, further work is required in this area before reliable systems can be expected. Similar comments apply to data interpretation. While, there are some basic interpretation rules, which have also appeared in the literature, and a concerted CIGRE effort, has resulted in a document, CIGRE Technical Brochure 226 [2], that formalizes these rules, complete understanding of the significance of certain types of observed PD behaviour is still far away. Despite claims of success for statistical post-processing of PD data, automated interpretation that can provide the same level of confidence as the skilled and experienced observer is not yet a reality.

Annexe B (informative)

Méthodes non électriques de détection des DP et méthodes de localisation de celles-ci

Les méthodes qui sont données ci-dessous sont non comparables et non quantifiables.

a) Détection visuelle

Essai en chambre noire (occultation totale) avec tension alternative (c.a.): méthode permettant d'établir la présence de décharges superficielles et de les localiser.

b) Détection optique

Appareillage de détection à ultraviolets: Voir a).

c) Détection acoustique

Essai de tensions c.a. dans un environnement silencieux: localisation auditive ou par l'intermédiaire d'un guide d'ondes acoustiques (avec protection anti-contournement), par exemple stéthoscope isolé. Il est à noter qu'en règle générale, il n'est pas possible de détecter l'activité des DP dans l'isolation mise à la terre par des méthodes acoustiques, à moins d'une activité particulièrement importante.

d) Détection par ultrasons

Appareillage de détection à ultrasons: Voir c).

e) Détection fondée sur la présence d'ozone

La présence de décharges superficielles provoque des réactions chimiques. L'un des sous-produits des réactions chimiques est l'ozone qui dégage une odeur caractéristique.

Annex B (informative)

Non-electrical methods of PD detection and methods for localization

The following given methods are non-comparable and non-quantifiable.

a) Visual detection

Dark room (black-out) test with a.c. voltage: a method of determining the presence and location of surface discharges.

b) Optical detection

Ultraviolet detection equipment: See a).

c) Acoustic detection

AC voltage test in silent environment: location by the naked ear or an acoustical wave-guide (with flashover protection) for example insulated stethoscope. Note that it is not normally possible to detect PD activity in the groundwall insulation with acoustical methods unless the activity is especially great.

d) Ultrasonic detection

Ultrasonic detection equipment: See c).

e) Ozone detection

The presence of surface discharges causes chemical reactions. One of the by-products of the chemical reactions is ozone that has a characteristic smell.

Annexe C (informative)

Bruit d'origine externe, perturbations et sensibilité

C.1 Généralités

Le bruit et les perturbations peuvent être définis comme toute partie indésirable du signal électrique observé. La nature des mesures de DP nécessite de distinguer le bruit propre dans les appareils de mesure et celui provoqué par des perturbations externes. Les perturbations externes dues à des signaux d'ondes entretenues ou à des signaux d'impulsions perturbatrices peuvent se produire sous la forme de signaux transmis par conduction ou rayonnement. Il existe une relation étroite entre sensibilité, bruit et perturbations. Par conséquent, il est impossible de discuter de l'un de ces sujets sans aborder dans le même temps les deux autres. Dans la mesure où la personne chargée d'effectuer des essais à l'arrêt sur site ou dans le cadre d'essais en usine utilise à cet effet un dispositif de mesure donné, l'exposé ci-après abordera exclusivement les problèmes essentiels et la manière de les traiter.

C.2 Sensibilité

La sensibilité d'un dispositif de mesure des DP peut être approximativement définie par le quotient de l'énergie réelle des DP, à l'emplacement des DP, à l'énergie recueillie par le détecteur de DP, la mesure étant effectuée à ce point.

Au moment de l'occurrence des DP, le montage d'essai dans son ensemble (Figure C.1), avec ses éléments capacitifs, y compris le transformateur (i_{PDt}), les lignes d'énergie électrique (i_{PDI}), l'ensemble de couplage des DP (i_{PDC}) et l'échantillon d'essai (i_{PDS}) lui-même, reconstitue cet emplacement des DP. Visiblement, la somme de toutes ces composantes du courant est égale au courant résultant à l'emplacement des DP: $i_{PD} = i_{PDt} + i_{PDI} + i_{PDS} + i_{PDC}$.

Par conséquent, le quotient de $i_{PDC}/(i_{PDt} + i_{PDI} + i_{PDS})$, c'est-à-dire le déplacement des charges sur le condensateur de couplage, traduit la sensibilité de mesure et donc, plus la capacité électrique de l'ensemble de couplage des DP est élevée, et par voie de conséquence, le quotient de la capacité de couplage à la capacité électrique de l'objet soumis à essai, plus la sensibilité de mesure est importante.

Par conséquent, en cas de liberté de choix du condensateur de couplage, un condensateur de couplage à forte capacité peut permettre d'espérer la sensibilité la plus élevée. Au moins, le condensateur de couplage doit être bien adapté aux caractéristiques de la bande passante de l'appareil de mesure et à l'impédance de mesure Z_m .

Annex C (informative)

External noise, disturbance and sensitivity

C.1 General

Noise and disturbances may be defined as any part of the observed electrical signal that is unwanted. The nature of PD measurements requires that noise be classified as inherent noise in the measuring instruments and that which is due to external disturbances. External disturbances due to constant wave signals or pulsed interference signals can occur either as conducted or irradiated signals. There is a close link between sensitivity, noise and disturbances. Therefore, it is impossible to discuss one of these topics without dealing with the other two topics at the same time. Since the person who has to perform off-line tests on site or during factory tests has usually a given measuring device, the following clauses will be limited to basic problems and how to deal with them.

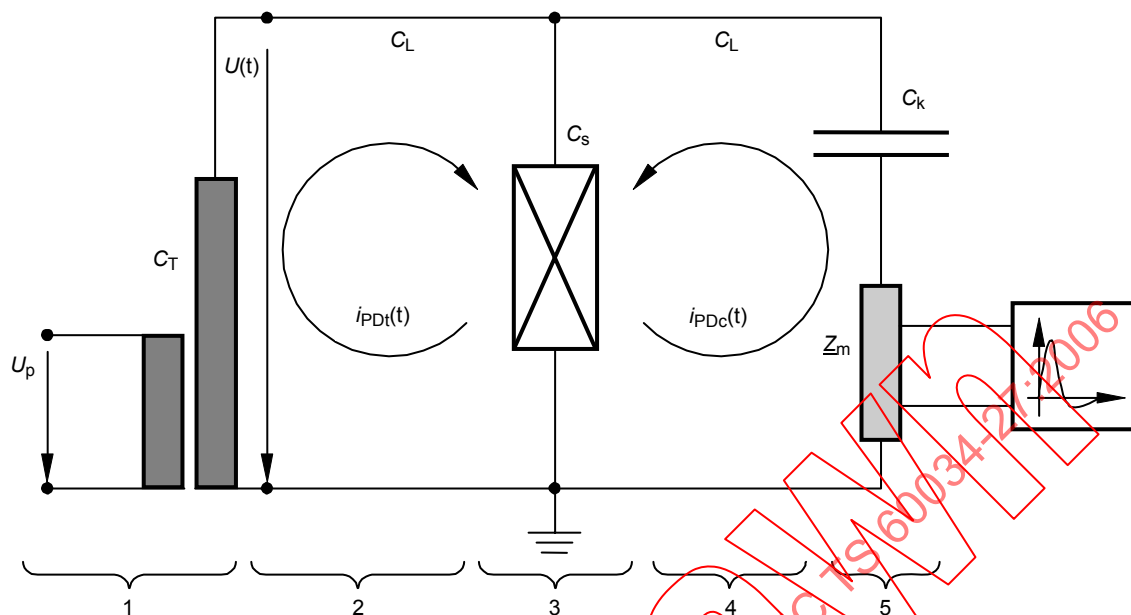
C.2 Sensitivity

The sensitivity of a PD measuring device can roughly be defined by the ratio of the real PD energy, at the PD location, to the energy that reaches the PD detector and is measured there.

At the time a PD occurs, the whole test arrangement (Figure C.1) with its capacitances including transformer (i_{PDt}), power lines (i_{PDI}), the PD coupling unit (i_{PDC}) and the test sample (i_{PDS}) itself, recharges this PD location. Obviously, the sum of all of these current components is equal to the resulting current at the PD location: $i_{PD} = i_{PDt} + i_{PDI} + i_{PDS} + i_{PDC}$.

Consequently, the ratio $i_{PDC}/(i_{PDt} + i_{PDI} + i_{PDS})$, i.e. the charge displacement on the coupling capacitor, reflects the sensitivity of the measurement and thus, the higher the capacitance of the PD coupling unit and thus the ratio of coupling capacitance to the test object capacitance, the higher is the sensitivity of the measurement.

Therefore, if one is free to choose the coupling capacitor, the highest sensitivity can be expected with a coupling capacitor having a large capacitance. At least, the coupling capacitor needs to fit well to the band pass characteristic of the measuring equipment and to the measuring impedance Z_m .



IEC 2290/06

Légende

- 1 auxiliaires de transformateur
- 2 ligne
- 3 échantillon
- 4 ligne
- 5 dispositif de couplage

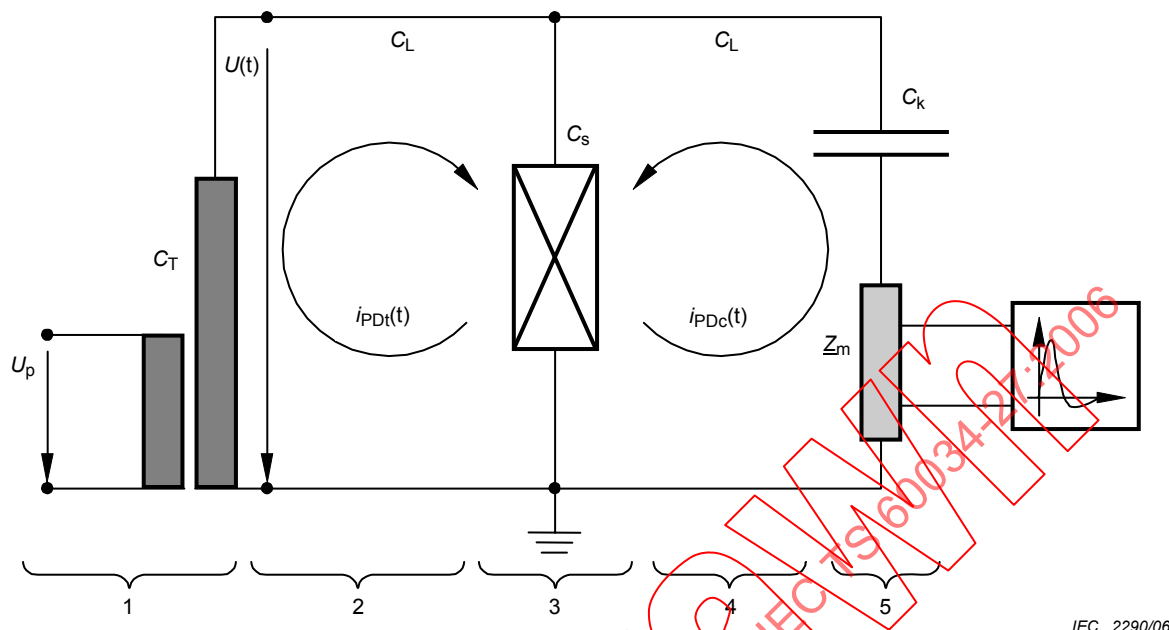
- $U(t)$ tension d'essai (tension du secondaire du transformateur)
- U_p tension du primaire du transformateur
- C_L capacité parasite de l'alimentation de puissance
- C_s capacité de l'échantillon
- C_T capacité parasite du transformateur
- $i_{PDt}(t)$ courant de DP transitoire dans le circuit du transformateur
- $i_{PDc}(t)$ courant de DP transitoire dans le circuit de l'ensemble de couplage des DP

Figure C.1 – Mise en charge de l'objet soumis à essai par diverses composantes de courant

C.3 Bruit et rapport signal/bruit

Le bruit total dans un système électronique résulte de deux types de bruit distinct: le bruit fondamental et le bruit en excès. Le bruit fondamental est dû au mouvement de charges discrètes dans les circuits électriques et ne peut être totalement éliminé. Le bruit en excès a pour origine une instrumentation imparfaite ou un comportement non idéal des composants; il peut en principe être réduit à des niveaux insignifiants. En théorie, les deux types de bruit présentent des amplitudes indépendantes de la fréquence. Le bruit en excès étant principalement influencé par la conception des appareils, il ne peut être affecté ni réduit par des mesures de DP et par conséquent, il n'est pas discuté outre mesure.

Le principal bruit fondamental est le bruit thermique (bruit de Johnson) qui est dû au mouvement thermique de charges discrètes. Dans une résistance, ces fluctuations thermiques des porteurs de charge entraînent une chute de tension qui apparaît comme un bruit extérieur sur ces composants. De toute évidence, le niveau de bruit augmente en fonction de la température (mouvement thermique rapide) et de la résistance (chute de tension plus élevée).



IEC 2290/06

Key

- 1 transformer, auxiliaries
- 2 line
- 3 sample
- 4 line
- 5 coupling device

$U(t)$	test voltage (transformer secondary voltage)
U_p	transformer primary voltage
C_L	power line stray capacitance
C_s	sample capacitance
C_T	transformer stray capacitance
$i_{PD(t)}$	transient PD current over transformer path
$i_{PDc(t)}$	transient PD current over the coupling unit path

Figure C.1 – Recharging of the test object by various current components

C.3 Noise and signal-to-noise ratio

The total noise in an electronic system results from two distinct types of noise: fundamental noise and excess noise. Fundamental noise arises from the motion of discrete charges in electrical circuits and cannot be completely eliminated. Excess noise arises from imperfect instrumentation or non-ideal component behaviour and can in principle be reduced to insignificant levels. Both types of noise, in principle, display frequency independent magnitudes. Since the excess noise is mainly influenced by instrument design, it can only poorly be influenced and reduced by personnel taking PD measurements and is therefore not further discussed.

The main fundamental noise is the thermal noise (Johnson noise) that is caused by thermal movement of discrete charges. Across a resistance these thermal fluctuations of the charge carriers lead to a voltage drop that appears as external noise across such components. Obviously, the noise level increases with temperature (faster thermal movement) and with the resistance (higher voltage drop).

Etant donné que tous les systèmes de mesure des DP, conformes à la CEI 60270, fonctionnent théoriquement avec des filtres quasi-intégrateurs, la bande passante du dispositif de mesure donne lieu au même comportement pour le signal et pour le bruit: plus les largeurs de bandes sont importantes et plus la quantité d'énergie du signal détectée sera élevée. Par conséquent, le signal de sortie d'un tel intégrateur augmentera en fonction de la bande passante, donnant lieu à des signaux de sortie plus élevés pour le signal DP requis ainsi que pour le signal de bruit. Cependant, contrairement au spectre de fréquence d'amplitude du signal DP requis, qui est constant jusqu'à des fréquences très élevées, le spectre de bruit thermique décroît au fur et à mesure que la fréquence augmente.

Le signal de sortie d'un filtre passe bande étant proportionnel à la bande passante pour une impulsion de DP et proportionnel à la racine carrée de la bande passante pour le bruit thermique, le rapport signal/bruit RSB augmente abruptement en fonction de la racine carrée de la bande passante – plus les largeurs de bandes sont élevées et plus le RSB est élevé.

Les relations décrites dans le dernier paragraphe sont valables pour un dispositif de couplage DP donné par résistance de mesure résistive et fixe. Une telle configuration à une fréquence de coupure inférieure fixe et par conséquent elle est valable pour une disposition particulière donnée. Pour réduire la fréquence de coupure inférieure, il est nécessaire d'augmenter la capacité du dispositif de couplage. Des dispositifs de couplage de telles dimensions donnent lieu, à travers le détecteur, à des courants plus importants et par conséquent à des signaux de sortie plus élevés. Par conséquent, des dispositifs fonctionnant dans des gammes de fréquences basses à bande passante étroite peuvent avoir le même RSB que des dispositifs de mesure fonctionnant dans des gammes de fréquences hautes à bandes passantes larges. Il doit au moins y avoir correspondance entre condensateur de couplage, impédance de couplage et dispositif de mesure.

C.4 Perturbations

De par leur nature, il est fait une distinction entre perturbations et bruits. Les perturbations apparaissent de manière sporadique ou périodique et proviennent de sources externes comme par exemple les convertisseurs, les creux de tension ou des effets de couronne à haute tension se produisant à proximité. Pendant l'installation du dispositif de mesure à l'arrêt, un certain nombre de mesures doivent être prises pour réduire l'effet négatif de ces perturbations. Pour les mesures à l'arrêt, certains de ces signaux extérieurs sont moins dominants que pour des mesures en fonctionnement. Le paragraphe 9.1.6.2 donne quelques règles générales permettant de réduire les effets de ces signaux perturbateurs externes.

Since all PD measuring systems, compliant with IEC 60270, work in principle with quasi-integration-filters, the bandwidth of the measuring device leads to the same behaviour for signal and noise: the larger the bandwidths, the more signal energy will be detected. Therefore the output signal of such an integrator will increase with increasing bandwidth, resulting in higher output signals for the wanted PD signal and the noise signal as well. However, in contrast to the amplitude frequency spectrum of the wanted PD signal, which is constant up to very high frequencies, the thermal noise spectrum decreases with increasing frequency.

Since the output signal of a band pass filter is proportional to bandwidth for a PD pulse and proportional to the square root of the bandwidth for thermal noise, the signal-to-noise ratio SNR rises roughly with the square root of the bandwidth – the higher the bandwidths, the higher the SNR.

The relations described in the last paragraph are valid for a given PD coupler with a fixed resistive measuring resistance. Such a configuration leads to fixed lower cut-off frequency and is therefore valid for one special arrangement. To reduce the lower cut-off frequency, it is necessary to increase the coupling capacitance. Such larger couplers lead to larger currents through the sensor and therefore to higher output signals. Therefore, devices operating in low frequency ranges with low bandwidths may have the same SNR as measuring devices operating in high frequency range with large bandwidths. At least the measuring device consisting of coupling capacitor, coupling impedance and the measuring device have to fit together.

C.4 Disturbances

We here distinguish between disturbances and noise by their nature. Disturbances appear sporadically or periodically and are from external sources, for example converters, voltage dips or nearby high voltage corona. During installation of the off-line measuring device, some measures have to be taken to reduce the negative effect of such disturbances. For off-line measurements some of these external signals are less dominant than for on-line measurements. Some general rules to reduce the influence of such external disturbance signals are given in 9.1.6.2.