

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

Rotating electrical machines –

Part 24: Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines and of bearing currents – Application guide

Machines électriques tournantes –

Partie 24: Détection et diagnostic en ligne de défaillances potentielles des parties actives de machines électriques tournantes et de courants de palier – Guide d'application



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2009 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

Rotating electrical machines –

Part 24: Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines and of bearing currents – Application guide

Machines électriques tournantes –

Partie 24: Détection et diagnostic en ligne de défaillances potentielles des parties actives de machines électriques tournantes et de courants de palier – Guide d'application

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

S

ICS 29.160

ISBN 2-8318-1060-4

CONTENTS

FOREWORD.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Basis of the diagnosis	7
5 Kinds of electrical signal analysis	10
5.1 General remarks.....	10
5.2 Stator current/voltage analysis	10
5.3 Induced voltages of auxiliary turns embedded into the stator slots or other magnetic sensors sensing the air-gap flux	11
5.4 Induced voltages of search coils collecting axial fluxes.....	14
5.5 Shaft voltage analysis	14
6 Detection of bearing currents.....	14
Bibliography.....	16
Table 1 – Most important magnetic fields in the air-gap of a three-phase cage induction motor with an integral slot stator winding under normal operating and fault conditions	8
Table 2 – Diagnosis of failures at a cage induction motor, equipped with two identical auxiliary coil systems	13

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 24: Online detection and diagnosis of potential failures
at the active parts of rotating electrical machines
and of bearing currents –
Application guide**

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.

IEC 60034-24, 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
2/1537/DTS	2/1553A/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.

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

The committee has decided that the contents of this 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

Progress in design and technology has resulted in an increasing reliability of rotating electrical machines, but failures could not be eliminated completely. Since the demand for a high availability is permanently increasing, it is essential to detect deficiencies at an early stage and to recognize the origin and identify the severity of the fault in order to estimate the risk of a continuation of operation.

It would be advantageous, if the signals which are obtained by the detection methods presented in this guide, were suitable to distinguish the different failures from each other. By this means, the signal analysis can be used as input data of a complete monitoring system.

The aim of this guide is to present possible tools which are available for the intended purpose and to explain their advantages and disadvantages. The minimum requirements which shall be met by the various sensors will be discussed, whereas the detailed design rules are outside the scope of this technical specification.

This guide deals with the detection of failures at the active parts of multi-phase rotating machines (all kinds of winding faults in stator and rotor, cage deficiencies, eccentricities) and of bearing currents.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 24: Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines and of bearing currents – Application guide

1 Scope

This part of IEC 60034 is applicable to the on-line detection and diagnosis of failures at the active parts of multi-phase rotating electrical machines (induction and synchronous machines) and of bearing currents. The failure analysis includes:

- interturn faults;
- phase-to-phase short-circuits;
- double earth faults and single earth faults of motors with earth connection of the star-point;
- static and dynamic eccentricities;
- cage imperfection or defects (e.g. broken bars or end-rings);
- bearing currents.

This can be achieved by tools like search coils or other magnetic sensors or partly by the analysis of the terminal voltages and currents.

The detection of the following effects is excluded from the scope:

- vibration (covered by ISO standards, e.g. ISO 10816 and ISO 7919);
- partial discharge (covered by IEC 60034-27);
- single earth-faults of motors without earth connection of the star-point;
- core imperfection.

Also excluded are special methods applicable for specific applications only (e.g. turbo generators).

2 Normative references

There are no normative references in this technical specification.

3 Terms and definitions

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

3.1

distribution factor

the factor, related to a distributed winding, which takes into account the reduction in the generated voltage due to the phase difference between the voltages generated in the coils in different slots

[IEV 411-38-37]

3.2

chording (pitch) factor

the factor, related to a distributed winding, which takes into account the reduction in the generated voltage, when the winding pitch is not 100 %

[IEV 411-38-38]

3.3

branch factor

the factor, related to a distributed winding, which takes into account the reduction in the generated voltage due to the phase difference between the voltages generated in the series-connected branches

4 Basis of the diagnosis

The ability of electrical machines to operate is based on the existence of a magnetic field in the air-gap, which is looping in a cross-sectional area of the laminations of stator and rotor. Flux components in the end-portions of the machine outside the cores are of a parasitic nature. Therefore available signals suitable for the detection of potential faults originate from the magnetic field in the air-gap, which shall be analyzed in order to distinguish between those components which occur under regular operating conditions and those components which are attributed to a specific failure and which do not exist in a healthy machine.

Since the winding producing the magnetic field consists of coils distributed symmetrically around the circumference and since the sum of the supplying currents is usually zero, the air-gap field forms also a periodic function along the circumference. The wave of the flux density can be considered as the superposition of a sum of sinusoidally distributed waves, which are characterized by the following features:

- amplitude,
- number of pole-pairs,
- angular velocity,
- phase-angle,
- type of wave (rotating or standing).

Table 1 shows the composition of the air-gap field in the case of a three-phase cage induction motor, which is equipped with an integral slot winding. The table can easily be extended to be valid also for fractional slot windings. Similar tables can be developed for slip-ring motors and all kinds of synchronous machines.

Table 1 – Most important magnetic fields in the air-gap of a three-phase cage induction motor with an integral slot stator winding under normal operating and fault conditions

Origin of the field		Stator fields		Rotor fields		Item
Fields under normal operating conditions	winding fields (slot harmonics)	type: rotating frequency: f_1 number of pole pairs: $\nu_1 = p (1 + 6g_1)$ $g_1 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ (slot harmonics: $\nu_1 = p + g_1 Q_s$)	type: rotating frequency: $f_1 \left\{ 1 + \frac{g_2 Q_r}{p} (1-s) \right\}$ $g_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ number of pole pairs: $\nu_2 = \nu_1 + g_2 Q_r$			1
	saturation fields	type: rotating frequency: $3f_1$ number of pole pairs: $\nu_1 = 3p$	type: rotating frequency: $f_1 \left\{ 3 + \frac{g_2 Q_r}{p} (1-s) \right\}$ $g_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ number of pole pairs: $\nu_2 = 3p + g_2 Q_r$			2
Additional fields under fault conditions	interturn faults	type: superposition of reverse rotating fields of different amplitude frequency: f_1 number of pole pairs: $\nu_1 = 1; 2; 3; \dots$	type: superposition of reverse rotating fields of different amplitude frequency: $f_1 \left\{ \pm 1 + \frac{g_2 Q_r}{p} (1-s) \right\}$ $g_2 = \pm 1; \pm 2; \dots$ + positive-sequence fields – negative-sequence fields number of pole pairs: $\nu_2 = \nu_1 + g_2 Q_r$			3
	phase-to-phase faults double earth faults					

Origin of the field		Stator fields		Rotor fields		Item
	eccentricity	type: 2 rotating fields frequency: $f_1 \left\{ 1 \pm \frac{K}{p} (1-s) \right\}$ $K = 0$: static eccentricity $K = 1$: dynamic eccentricity number of pole pairs: $\nu_1 = p \pm 1$		type: 2 rotating fields frequency: $f_1 \left\{ 1 + \left[\pm \frac{K}{p} + \frac{g_2 Q_r}{p} \right] (1-s) \right\}$ number of pole pairs: $\nu_2 = \nu_1 + g_2 Q_r$ $g_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$		4
	rotor asymmetry			type: superposition of reverse rotating fields of the same amplitude frequency: $f_1 \left\{ \pm s + \frac{\nu_2}{p} (1-s) \right\}$ number of pole pairs: $\nu_2 = 1; 2; 3; \dots$		5
Symbols:		f_1 fundamental frequency p number of pole pairs, for which the motor is designed ν number of pole pairs in general	Q_s number of stator slots Q_r number of rotor bars s slip			

5 Kinds of electrical signal analysis

5.1 General

A valuable detection method shall be able to detect failures at an early stage. Therefore signals disclosing a rapid change in the case of small deficiencies, are optimal for the intended purpose. By contrast signals which vary only insignificantly should not be used as the basis of the diagnosis.

The signal processing needs the availability of appropriate electronic equipment. Although the resolution of modern devices is high, signals which do not need excessive precision should be preferred in this respect.

5.2 Stator current/voltage analysis

The analysis of the terminal voltages or currents of a rotating machine allows identification of

- different frequencies,
- positive-, negative-, and zero-sequence components,
- different amplitudes of the components.

In general, all waves of induction in the air-gap field can induce voltages of certain frequencies in the stator winding and can cause currents of the same frequencies. The additional current components which are generated by a specific failure are superimposed to the supply values during undisturbed operation. All details shall be taken from the relevant table, that is Table 1 in the case of three-phase cage induction motors.

Table 1 is worded for one single supply frequency f_1 . However, in case of a converter supplied machine, it is valid for each voltage/frequency component, which is contained in the output spectrum of the converter.

Table 1 shows the components of the air-gap field. Whether a specific component induces a voltage in the stator winding, depends on its winding factor for the number of pole pairs under consideration. The winding factor is the product of the following terms:

- the distribution factor,
- the chording factor,
- the branch factor.

The branch factor is not generally known amongst engineers, but of fundamental importance for the problem under consideration. Each symmetrical three-phase integral slot winding consists of p (in case of a single-layer winding) or $2p$ (in case of a double-layer winding) identical coil groups (branches), which are distributed symmetrically around the circumference. They can be series-connected or connected to form parallel branches with the maximum number $a = 2p$. The connecting method considerably influences the branch factor of a specific number of pole pairs.

It can be shown that the branch factor is zero for the eccentricity fields $v = p + 1$ and $v = p - 1$ for all windings with series-connection of the coil-groups. *Consequently both types of eccentricity cannot be detected for such machines by stator current analysis.*

The branch factor of the harmonic fields according to item 1 to 4 of Table 1 depends also on the individual configuration and in addition on the number of rotor slots. The design of a given case is selected by the manufacturer of the machine for different reasons (e.g. to suppress unbalanced magnetic pull, to avoid nasty magnetic tones, etc.) and unknown to the user. *It is therefore not advisable to use the harmonic rotor fields of items 3 and 4 as the signal for a stator current analysis.*

The group of winding faults in item 3 marks the most severe deficiencies at the active parts. They all produce magnetic fields of fundamental frequency. *Thus winding faults cannot be detected by a frequency analysis of the stator currents.*

The field waves, produced by winding faults, are of elliptic nature, which means the superposition of two reverse rotating waves, having the same number of poles and the same frequency, but different amplitudes. In principle such failures can be detected by exploring the negative sequence component of the current of fundamental frequency.

Especially in case of the most dangerous failure, an interturn fault of a high-voltage machine, when the high currents flow in only one of many turns per phase, this component is very small. A negative-sequence component of the current may also be caused by an unavoidable small asymmetry of the supply voltages (a negative sequence component of the voltage results in a negative sequence component of the currents, which is 6 to 10-times higher). *Summing up, it is not recommendable to detect winding faults by means of a voltage/current analysis.*

Reliable detection of cage imperfection or defects (e.g. broken bars or end-rings) is possible by use of stator current analysis.

Another disadvantage of the stator current analysis cannot be neglected. Statistics of insurance companies manifest that most of the winding faults occur during transient phenomena such as starting of motors, short-circuits at the terminals, etc., and cause high inrush currents. It is unfeasible to detect failures by current analysis during the interval of the transients.

5.3 Induced voltages of auxiliary turns embedded into the stator slots or other magnetic sensors sensing the air-gap flux

An ideal diagnostic signal would be zero during operation of a healthy machine under steady-state and transient conditions, it would rise with the amount of the deficiency for all kinds of failures according to items 3 to 5 of Table 1 and would be able to distinguish between the failures. Solutions close to the optimum have been developed.

These solutions are based on turns made by insulated wire, the diameter of which can be selected under solely mechanical aspects. Both coil-sides are incorporated in the stator slots of the main winding, usually during manufacturing of the machine between the upper layer of the winding and the slot wedge. The assembly at a later stage is possible. The end-connections are led close to the end of the core.

The same insight into the magnetic field at specific locations at the stator bore can eventually be achieved by other kinds of magnetic sensors instead of measuring turns.

Usually several turns of the same pitch are series-connected and shifted against each other by a predetermined angle. It is aimed to get finally a system of auxiliary measuring coils, for which the resulting winding factor is zero for all air-gap fields, which exist during normal undisturbed operation, and for which the winding factor is maximum for a field with that number of pole pairs, which is intended to be used as the reference field of the diagnosis.

If a system of auxiliary coils can be found which fulfills the condition explained above for a reference field, which is amongst the fields generated by all failures of items 3 to 5, the coil system would be complete. But there is one remaining difficulty: The fields produced by a winding fault according to item 3 of Table 1, are of an elliptic nature. If one of them is chosen as reference field, the induced voltage of the coil system would vary with the location of the fault at the circumference. Such a situation is of course unacceptable.

The problem can be eliminated by use of a second identical coil system, which is shifted against the first one by the angle $\pi/(2v)$, when v is the number of pole pairs of the reference field. Then both coil groups form a symmetrical two-phase system, which easily allows the

calculation of the symmetrical components (SC) of the two measured voltages. The SCs are independent of the fault location.

This guide is the inappropriate place to explain the design rules for the coil system in detail. It is mentioned only that the minimum number of turns per coil system usually varies between 6 and 12 depending on the data of the relevant machine and the claims to the sensibility of the diagnosis.

The reference field is taken from the list of air-gap fields, which are generated by the fault condition and which are zero during normal operation. Therefore the amplitude of the reference field is nearly unchanged during transients. This statement is proven by tests.

The procedure of the diagnosis is executed in Table 2. Winding faults are characterized by the criterion that both (positive and negative sequence) symmetrical components do exist and have mains frequency. The voltages in case of static eccentricity have mains frequency too, but the negative-sequence component U_n is zero. A dynamic eccentricity can be distinguished from other fault conditions by the typical frequencies of the induced voltages. Rotor asymmetries are marked by other typical frequencies; the induced voltages become zero, when the machine is running at synchronous speed ($s = 0$), because then the rotor currents, responsible for the reference field, disappear.

It can be concluded that a professionally designed system of auxiliary coils forms a useful tool for the detection and diagnosis of faults.

For the purpose of completeness it should be mentioned that other types of search coils were proposed in technical articles, which e.g. comprise one stator tooth only. They may be useful to investigate a specific effect, but they are unsuitable to form a complete diagnosis and were therefore not introduced into engineering practice.

Table 2 – Diagnosis of failures at a cage induction motor, equipped with two identical auxiliary coil systems

Kind of faults	Measured quantities				
	f	U_1	U_2	U_p	U_n
Winding fault	$f = f_1$	$U_1 \neq 0$	$U_2 \neq U_1 \neq 0$	$U_p \neq 0$	$U_n \neq 0$
Static eccentricity	$f = f_1$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$	$U_p \neq 0$	$U_n \neq 0$
Dynamic eccentricity	$f = f_1 \left\{ 1 \pm \frac{1}{p}(1-s) \right\}$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$		
Rotor asymmetry	$f = f_1 \left\{ \frac{1}{p}(1-s) \pm s \right\}$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$		
The marks of identification are indicated by a bold frame.					
Symbols:	U_1, U_2	r.m.s. values of the measured voltages of the coil systems 1 and 2			
	$\underline{U}_p = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + j\underline{U}_2)$	positive-sequence component of the measured voltage			
	$\underline{U}_n = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - j\underline{U}_2)$	negative-sequence component of the measured voltage			

5.4 Induced voltages of search coils collecting axial fluxes

Proposals were made to use either toroidal coils, fastened in front of the machine or coils surrounding the shaft of the machine. In both cases the axial flux produced by the machine is intended to be used for the detection of failures. Such approaches are generally not beneficial for the following reasons.

Axial flux components are always parasitic and undesired, because the performance of the machine is based on flux components looping in the cross-sectional area of the laminations. The axial flux is very small because of the high magnetic resistance of air. The axial flux cannot be predicted by analytical methods.

The flux produced by the most important winding faults is of fundamental frequency and the magnitude of its axial component is unforeseeable.

Only for the case of eccentricities in 2-pole machines will the eccentricity field with the number of pole pairs $p - 1$ degenerate to a unipolar flux which successfully can be measured by a ring coil surrounding the stator bore and mounted at one core end.

With this exception the use of search coils collecting axial fluxes is not recommended.

5.5 Shaft voltage analysis

Some authors allege the usefulness of the measurement of the shaft voltage in order to detect any distortion in the internal flux distribution of a machine.

Shaft voltages are induced by a magnetic ring flux looping around the shaft. This ring flux is caused by irregularities of the stator yoke (e.g. clamping notches) and their distribution along the circumference in case of mains supplied machines. A ring flux is generated only, when the integral of the magnetic field strength around the circumference deviates from zero. The fields with number of pole pairs p and $3p$ play the most important role in this respect. This physical background demonstrates that the impact of winding faults on the shaft voltage is purely parasitic and too small to be used as a sensitive detection device.

In the case of converter supplies, the shaft voltage may considerably increase due to ring flux components, which are caused by the common mode voltage of the converter. Consequently these components of the shaft voltage do not relate to the operational flux distribution of the machine and are totally unsuitable for the intended purpose.

Summing up, failures at the active parts cannot reliably be detected by an analysis of the shaft voltage.

6 Bearing currents

Bearing currents can be produced by two sources:

- irregularities of the core yoke,
- common mode currents in case of converter supplied motors.

When the yoke contains irregularities such as ventilation ducts, joints, dove-tailed clamping grooves, etc., their number and distribution along the circumference is decisive for the generation of shaft voltages which may result in bearing currents circulating through both bearings. The bearing currents usually contain predominantly the fundamental frequency, superimposed by a component of three-times the fundamental frequency due to saturation effects. Long-standing experience shows that the bearings are endangered when the shaft voltage exceeds 200 mV to 250 mV (r.m.s.). In this case it is the responsibility of the manufacturer to avoid bearing currents by the insulation of the bearing at the non-drive end (NDE). Several kinds of insulation are common.

When the non-drive end bearing is properly insulated, usually no further protection measure is necessary. However, when bridging of the insulation by inadvertent measures cannot be excluded, monitoring of the voltage across the insulation is advisable.

If the rotating machine is supplied by a converter with an impressed d.c. voltage in the intermediate circuit, the common mode voltage (zero-sequence component) of the converter forms an additional source of bearing currents. Depending on details of the configuration, these currents may pass only one bearing (EDM (Electric Discharge Machining) and earth currents flow back to the converter via the grounding system) or they circulate through both bearings, when they are caused by the capacitive currents between the winding and the laminations.

The common mode currents can be measured, but if they can take different paths from the machine frame to the ground, they cannot be taken as indication of the risk. It is the responsibility of the system designer/supplier to decide if the insulation of one bearing is a sufficient precautionary measure or if both bearings must be insulated.

The selection of the bearing insulation shall take into account that the frequency of the common mode currents is in the kHz range and that the analysis of the EDM breakdowns comprises much higher values. Capacitive currents cannot be suppressed by a thin insulation film in the range of hundred micrometers.

In case a grounding brush is used, the current flowing through this brush can be analysed in order to find the origin of the current.

A breakdown of the bearing insulation or a discharge through the oil film of the bearings can be monitored by measuring the shaft-to-ground voltage using a sensing brush.

For test purposes contact pins can be installed at both sides of the insulation in order to measure the voltage across the insulation or the bearing current when the insulation is bridged by a strap. Such measurements necessitate the use of appropriate instrumentation and cabling with respect to the high frequencies. Currently, monitoring of these quantities is exceptional.

Bibliography

[1]	Frohne, H.	Theorie einer Messeinrichtung zur Überwachung von Luftspaltänderungen in Asynchronmaschinen mit Käfigläufern (English title: Theory of a measuring device for the monitoring of eccentricities in cage induction motors) ETZ-A, 87, 1966, 127 - 132
[2]	Frohne, H.	Messreinrichtung zum Erfassen von Luftspaltänderungen in Drehstrommaschinen mit Ganz- oder Bruchlochwicklungen (English title: Measuring device to detect eccentricities in multi-phase machines with integral-slot or fractional-slot windings) ETZ-A, 87, 1966, 592 - 598
[3]	Frohne, H. Seinsch, H.O.	Praktische Ausführung und experimentelle Prüfung einer Luftspaltüberwachungseinrichtung (English title: Verification and testing of a device to monitor the centrosymmetry of the air gap) E.u.M., 85, 1968, 285 – 280
[4]	Rickson, C.D.	Protecting motors from overload due to asymmetrical fault conditions Electr. Review, 7, 1973, 778 - 780
[5]	Rogge, D. Seinsch, H.O.	Erkennung und Überwachung von elektrischen Läuferunsymmetrien in Käfigläufern (English title: Detection and monitoring of electrical rotor asymmetries in cage induction machines) etz-Archiv, 1981, 339 – 45
[6]	Hargis, C. Gaydon, B.G. Kamash, K.	The Detection of Rotor Defects in Induction Motors IEE Conf. On Electrical Machines, 1982, 216-220
[7]	Kaumann, U. Wolf, B.	Möglichkeiten und Grenzen der Überwachung von elektrischen Läuferunsymmetrien bei Käfigläufermotoren (English title: Options and limits of the monitoring of electrical rotor asymmetries in cage induction motors) Schorch-Berichte, 1984, 13 - 23
[8]	Deleroi, W.	Der Stabbruch im Käfigläufer eines Asynchronmotors (English title: Broken bars in the cage of induction motors) A.f.E., 67, 1984, 91 – 99, 141 - 149
[9]	Williamson, S. Mirzoian, K.	Analysis of cage induction motors with stator winding faults IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.104, no. 7, 1985, 1838-1842
[10]	Thomson, W. T. Rankin, D.	Cases Histories of Rotor Winding Fault Diagnosis in Induction Motors Proceeding of 2 nd Int. Con. on Condition Monitoring, University College of Swansea, 1987, 798-819
[11]	Tavner, P.J. Penman, J.	Condition Monitoring of Electrical Machines J. Wiley & Sons, New York, 1987

[12]	Heinrich, W.	Messtechnische Erfassung von Läuferfehlern aus Klemmengrößen (English title: Detection of rotor failures by means of analysing the terminal voltages and currents) etz-Archiv, 10, 1988, 61 - 64
[13]	Penman, J. Dey, M.N.	Multifunctional monitoring and protection scheme for electrical machines UPEC, 19, 1983, 4 - 12
[14]	Penman, J. Tait, A.J. Smith, J.R. Bryan, W.E.	The development of a machine condition monitoring system for electrical drives Proceedings of the Conference on Drives/Motors/Control, 1985, 123 - 129
[15]	Kaumann, U.	Analytische und experimentelle Behandlung von Induktionsmaschinen mit beliebiger Läuferunsymmetrie (English title: Analytical theory and experimental verification of the performance of induction machines with any rotor asymmetry) Dissertation, Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, Universität Hannover, 1983
[16]	Seinsch, H.O.	Diagnose und Überwachung von anomalen Betriebszuständen und Schäden in Drehstrommaschinen (English title: Diagnosis and monitoring of abnormal operating conditions and failures in multi-phase machines) Schorch-Berichte, 1986, 4 - 12
[17]	Früchtenicht, S. Pittius, E. Seinsch, H.O.	Ein Diagnosesystem für Drehstrom-Asynchronmaschinen (English title: Diagnostic system for multi-phase induction machines) etz-Archiv, 11, 1989, 145 - 153
[18]	Pittius, E.	Analytische und experimentelle Behandlung von Erdschlüssen in Induktionsmaschinen (English title: Analytical theory and experimental verification of earth faults in induction machines) Dissertation, Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, Universität Hannover, 1989
[19]	Früchtenicht, S. Pittius, E. Seinsch, H.O.	Diagnostic system for three-phase asynchronous machines Fourth International IEE Conference on Electrical Machines and Drives, London, 1989, 163 - 171
[20]	Früchtenicht, S.	Analytische und experimentelle Behandlung von Wicklungsschlüssen in Asynchronmaschinen (English title: Analytical theory and experimental verification of winding faults in induction machines) Fortschritt-Berichte VDI Reihe 21, Nr. 56, VDI-Verlag Düsseldorf, 1990

[21]	Ojo, J.O. Consoli, A. Lipo, T.A.	An improved model of saturated induction machines IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 26, no. 2, 1990, 212 - 221
[22]	Slemon, G.R.	An equivalent circuit approach to analysis of synchronous machines with saliency and saturation IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 5, no. 3, 1990
[23]	Toliyat, H.A. Rahimian, M.M. Bhattacharya, S. Lipo, T.A.	Transient analysis of induction machines under internal faults using winding functions Proc. 3 rd Int. Conf. Electrical Rotating Machines – ELROMA'92, 1992, Bombay
[24]	Cardoso, A.J.M. Saraiva, E.S.	Computer-Aided Detection of Air-gap Eccentricity in Operating Three-Phase Induction Motors by Park's Vector Approach IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 5, 1993, 897 - 901
[25]	Gentile, G. Rotondale, N. Martelli, M. Tassoni, C.	Harmonic analysis of induction motors with stator faults Electric Power Components and Systems, vol. 22, no. 2, 1994, 215-231
[26]	Toliyat, H.A. Lipo, T.A.	Transient analysis of cage induction motors under stator, rotor bar end ring faults, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, no. 2, 1995, 241 - 247
[27]	Ponick, B.	Fehlerdiagnose bei Synchronmaschinen (English title: Diagnosis of failures in synchronous machines) Fortschritt-Berichte VDI Reihe 21, Nr. 147, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
[28]	Filippetti, F. Franceschini, G. Tassoni, C. Meo, S. Ometto, A.	A simplified model of induction motor with stator shorted turns oriented to diagnostics Proc. Int. Conf. Elect. Mach., ICEM, 1996, 410-413
[29]	Rust, St. Seinsch, H.O.	Überwachung von Windungsschlüssen im Läufer von Induktionsmotoren mit Schleifringläufer (English title: Monitoring of winding faults in the rotor of slip-ring induction motors) Elektrie, 50, 1996, 347 - 355
[30]	Chen, S. Lipo, T. A.	Circulating type motor bearing currents in inverter drives IEEE IAS Conf., 1996, 162-167
[31]	Chen, S. Lipo, T. A. Fritzgerald, D.	Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters IEEE Trans. Energy Conv., vol. 11, 1996, 25-32
[32]	Erdmann, J. M. Kerkman, R. J. Schlegel, D. W.	Effect of PWM Inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, 1996, 243-252

	Skibinski, G.	
[33]	Bradley, K.J. Tami, A.	Reluctance mesh modelling of induction motors with healthy and faulty rotors Proc. 31 st IAS Ann. Meeting, 1996, 625 - 632
[34]	Dorrell, D. G. Thomson, W. T. Roach, S.	Analysis of air gap flux, current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air gap eccentricity in 3-phase induction motors IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 33, no. 1, 1997, 24-34
[35]	Chen, S. Lipo, T. A.	Bearing currents and shaft voltages of an induction motor under hard and soft switching inverter excitation IEEE IAS Annual Meeting, 1997, 1-7
[36]	Filippetti, F. Franceschini, G. Tassoni, C. Vas, P.	AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 1, 1998, 98-108
[37]	Ostovic, V.	A simplified approach to magnetic equivalent-circuit modeling of induction machines IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 24, no. 2, 1998, 308 - 316
[38]	Cardoso, Aj.J.M. Cruz, S.M.A. Fonseca, D.S.B.	Inter-Turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Park's Vector Approach IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, 1999, 595 - 598
[39]	Benbouzid, M.E.H.	Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, 1999, 1065 - 1074
[40]	Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, G. Tassoni, C.	Closed-loop control impact on the diagnosis of induction motors faults IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 5, 2000, 1318-1329
[41]	Hausberg, V. Seinsch, H. O.	Kapazitive Lagerspannungen und –ströme bei umrichter gespeisten Induktionsmaschinen (English title: Capacitively coupled bearing voltages and bearing currents of converter-fed induction machines) Electrical Engineering, vol. 82, no. 3-4, 2000, 153-162
[42]	Hausberg, V. Seinsch, H. O.	Wellenspannungen und zirkulierende Lagerströme bei umrichter gespeisten Induktionsmaschinen (English title: Shaft voltages and circulating bearing currents of converter-fed induction machines) Electrical Engineering, vol. 82, 2000, 313-326
[43]	Hausberg, V. Seinsch, H. O.	Schutzmaßnahmen gegen Lagerschäden umrichter gespeister Motoren (English title: Protective provisions against bearing faults of converter-fed motors) Electrical Engineering, vol. 82, 2000, 339-345

[44]	Joksimovic, G.M. Penman, J.	The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 5, 2000, 1078 - 1084
[45]	Cruz, S.M.A. Cardoso, A.J.M.	Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach Electric Machines and Power Systems, vol. 28, no. 4, 2000, 289 - 299
[46]	Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, G. Tassoni, C. Kliman, G. B.	Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, 2001, 1248-1255
[47]	Cruz, S.M.A. Cardoso, A.J.M.	Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors by the Extended Park's Vector Approach IEEE Transactions on Industry Applications, vol 37, no. 5, 2001, 1227 - 1233
[48]	Stavrou, A. Sedding, H.G. Penman, J.	Current monitoring for detecting intern-turn short circuits in induction motors IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 16, no. 1, 2001, 32 - 37
[49]	Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, G. Tassoni, C. Passaglia, R. Saottini, M. Tontini, G. Giovannini, M. Rossi, A.	On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 4, 2002, 1045-1053
[50]	Kohler, J. L. Sottile, J. Trutt, F. C.	Condition monitoring of stator windings in induction motors. I. experimental investigation of the effective negative-sequence impedance detector IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 5, 2002, 1447-1453
[51]	Sottile, J. Trutt, F. C. Kohler, J. L.	Condition monitoring of stator windings in induction motors. II. experimental investigation of voltage mismatch detectors IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 5, 2002, 1454-1459
[52]	Cruz, M.A. Cardoso, A.J.M.	Diagnosis of stator interturn short circuits in DTC induction motor drives Proc. 38 th IAS Conf., Salt Lake City, 2002
[53]	Lee, S. B. Tallam, R. M. Habetler, T. G.	A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 3, 2003,

		865-872
[54]	Kral, C. Habetler, T. G. Harley, R. G. Pirker, F. Pascoli, G. Oberguggenberger, H. Fenz, C. J. M.	A Comparison of Rotor Fault Detection Techniques with Respect to the Assessment of Fault Severity SDEMPED'03, Atlanta, USA, 2003, 265-270
[55]	Cruz, M.A. Cardoso, A.J.M. Toliyat, H.A.	New developments in the diagnosis of faults in line-connected and direct torque controlled induction motors Proc. 29 th Annual IECON '03, 2003
[56]	Meshgin-Kelk, H. Milimonfared, J. Toliyat, H.A.	Interbar currents and axial fluxes in healthy and faulty induction motors IEEE Trans. Ind. Applicat., vol 40, no. 1, 2004, 392 - 398
[57]	Bellini, F. Concari, C. Franceschini, G. Lorenzani, E. Tassoni, C.	Induction drives diagnosis by signal injection technique: Effectiveness and severity classification IEEE IEMDC'05, International Electric Machines and Drives Conference, San Antonio, TX, USA, 2005
[58]	Cruz, S. M. A. Cardoso, A. J. M.	Multiple reference frames theory: A new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 3, 2005, 611-619
[59]	Nandi, S. Toliyat, H. A. Li, X.	Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, 2005, 719-729
[60]	Garcia, P. Briz, F. Degner, M. W. Diez, A. B.	Induction machine diagnostics using the zero sequence voltage IEEE-IAS, 2005
[61]	Oumaamar, M. E. K. Babaa, F. Khezzar, A. Boucherma, M.	Diagnostics of broken rotor bars in induction machines using the neutral voltage ICEM'06, Chania, Greece, 2006
[62]	Gerads, G. Bradley, K. J. Summer, M. Weeiler, P. Pikering, S. Clare, J. Whitley, C.	The results do mesh IEEE Industry Application Magazine, vol. 13, no. 2, 2007, 62-72

	Towers, G.	
[63]	Tallam, R. M. Lee, S. B. Stone, G. C. Kliman, G. B. Yoo, J. Habetler, T. G. Harley, R. G.	A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 4, 2007, 920-933

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	25
INTRODUCTION.....	27
1 Domaine d'application	28
2 Références normatives.....	28
3 Termes et définitions	28
4 Fondements du diagnostic.....	29
5 Types d'analyses de signaux électriques	32
5.1 Généralités.....	32
5.2 Analyse des courants/tensions d'un stator	32
5.3 Tensions induites de spires auxiliaires incorporées dans les encoches du stator ou autres capteurs magnétiques détectant le flux de l'entrefer	33
5.4 Tensions induites de bobines de recherche recueillant des flux axiaux	36
5.5 Analyse de tension électrique de l'arbre	36
6 Courants de palier	36
Bibliographie.....	38
Tableau 1 – Champs magnétiques les plus importants dans l'entrefer d'un moteur triphasé à induction à cage avec un enroulement de stator à nombre entier d'encoches dans des conditions normales de fonctionnement et dans les conditions de défaut	30
Tableau 2 – Diagnostic des défaillances d'un moteur à induction à cage équipé de deux systèmes identiques de bobines auxiliaires	35

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

**Partie 24: Détection et diagnostic en ligne de défaillances
potentielles des parties actives de machines
électriques tournantes et de courants de palier –
Guide d'application**

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'il n'est pas possible d'obtenir le support requis pour la publication d'une Norme internationale, malgré des efforts répétés, ou
- lorsque le sujet est toujours en cours d'élaboration technique ou lorsque, pour toute autre raison, il existe une possibilité future mais non immédiate d'accord sur une Norme internationale.

Les spécifications techniques font l'objet d'un examen dans les trois années de leur publication afin de décider si elles peuvent être transformées en Normes internationales.

La CEI 60034-24, 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
2/1537/DTS	2/1553A/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.

NOTE Un tableau des correspondances de toutes les publications du comité d'études 2 de la CEI peut être trouvé sur le site web de la CEI, à la page d'accueil de ce comité.

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.

INTRODUCTION

Une conséquence des progrès réalisés dans la conception et la technologie est un accroissement de la fiabilité des machines électriques tournantes, mais il n'a pas été possible d'éliminer complètement les défaillances. Du fait d'une demande toujours croissante d'une grande disponibilité, il est essentiel de détecter les anomalies à une étape précoce et de comprendre l'origine d'un défaut et d'en identifier la sévérité, afin d'estimer le risque encouru à poursuivre l'exploitation.

Il serait bénéfique que les signaux obtenus par les méthodes de détection présentées dans ce guide conviennent pour distinguer les différentes défaillances les unes des autres. Par ces moyens, on peut utiliser l'analyse des signaux en tant que données d'entrée d'un système de surveillance complet.

Le but de ce guide est de présenter les outils possibles disponibles pour le but visé, et d'expliquer leurs avantages et inconvénients. Les exigences minimales auxquelles doivent satisfaire les divers capteurs sont expliquées, mais leurs règles de conception détaillées sont hors du domaine d'application de la présente spécification technique.

Ce guide traite de la détection des défaillances des parties actives des machines tournantes polyphasées (tous types de défauts des enroulements dans le stator et le rotor, anomalies des cages, excentricités) et des courants de palier.

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 24: Détection et diagnostic en ligne de défaillances potentielles des parties actives de machines électriques tournantes et de courants de palier – Guide d'application

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60034 est applicable à la détection et au diagnostic en ligne de défaillances des parties actives de machines électriques tournantes polyphasées (machines à induction et machines synchrones) et des courants de palier. L'analyse des défaillances comprend:

- les défauts entre spires;
- les courts-circuits entre phases;
- les défauts de terre doubles et les défauts de terre simples des moteurs avec connexion à la terre du point étoile;
- les excentricités statiques et dynamiques;
- les imperfections ou les défauts des cages (par exemple, barres ou bagues d'extrémité brisées);
- les courants de palier.

Cette analyse peut être réalisée au moyen d'outils tels que des bobines de recherche ou d'autres capteurs magnétiques, ou partiellement par l'analyse des tensions et des courants aux bornes de la machine.

La détection des effets suivants est exclue du domaine d'application:

- les vibrations (couvertes par les normes ISO, par exemple l'ISO 10816 et l'ISO 7919);
- les décharges partielles (couvertes par la CEI 60034-27);
- des défauts de terre simples de moteurs sans connexion à la terre du point étoile;
- une imperfection du noyau.

Les méthodes particulières applicables uniquement à des applications spécifiques (par exemple, des turbogénérateurs) sont également exclues.

2 Références normatives

La présente spécification technique ne contient pas de références normatives.

3 Termes et définitions

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

3.1

facteur de distribution

facteur, relatif à un enroulement réparti, qui tient compte de la réduction de la tension induite due à la différence de phase entre les tensions induites dans les bobines logées dans des encoches différentes

[VEI 411-38-37]

3.2

facteur de raccourcissement ou d'allongement

facteur, relatif à un enroulement réparti, qui tient compte de la réduction de la tension induite lorsque le pas de bobinage rapporté au pas polaire est différent de 100 %

[VEI 411-38-38]

3.3

facteur de branche

facteur, associé à un enroulement réparti, qui tient compte de la réduction de la tension induite due à la différence de phase entre les tensions induites dans les branches connectées en série

4 Fondements du diagnostic

Le fonctionnement des machines électriques est basé sur la présence d'un champ magnétique dans l'entrefer, décrivant une boucle dans une section transversale des tôles du stator et du rotor. Les composantes du flux dans les parties d'extrémité de la machine qui sont à l'extérieur des noyaux sont de nature parasite. En conséquence, les signaux disponibles appropriés à la détection de défauts potentiels proviennent du champ magnétique dans l'entrefer, qui doit être analysé pour faire la distinction entre les composantes qui apparaissent dans des conditions normales de fonctionnement et les composantes que l'on attribue à une défaillance spécifique et qui n'existent pas dans une machine saine.

Puisque l'enroulement qui produit le champ magnétique consiste en des bobines réparties symétriquement autour de la circonférence et puisque la somme des courants d'alimentation est habituellement nulle, le champ de l'entrefer constitue également une fonction périodique le long de la circonférence. On peut considérer l'onde de la densité de flux comme la superposition d'une somme d'ondes réparties de façon sinusoïdale, qui sont caractérisées par les propriétés suivantes:

- amplitude,
- nombre de paires de pôles,
- vitesse angulaire,
- angle de phase,
- type d'onde (tournante ou fixe).

Le Tableau 1 indique la composition du champ de l'entrefer dans le cas d'un moteur triphasé à induction à cage, qui est équipé d'un enroulement à nombre entier d'encoches. On peut facilement compléter le tableau pour qu'il soit également valable pour des enroulements à nombre fractionnaire d'encoches. On peut réaliser des tableaux similaires pour des moteurs à bagues et pour tous les types de machines synchrones.

Tableau 1 – Champs magnétiques les plus importants dans l'entrefer d'un moteur triphasé à induction à cage avec un enroulement de stator à nombre entier d'encoches dans des conditions normales de fonctionnement et dans les conditions de défaut

Origine du champ		Champs de stator		Champs de rotor		Point
Champs dans les conditions normales de fonctionnement	enroulements de champs (harmoniques des encoches)	type: tournant fréquence: f_1 nombre de paires de pôles: $\nu_1 = p (1 + 6g_1)$ $g_1 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ (harmoniques des encoches: $\nu_1 = p + g_1 Q_s$)	type: tournant fréquence: $f_1 \left\{ 1 + \frac{g_2 Q_r}{p} (1-s) \right\}$ $g_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ nombre de paires de pôles: $\nu_2 = \nu_1 + g_2 Q_r$			1
	champs de saturation	type: tournant fréquence: $3f_1$ nombre de paires de pôles: $\nu_1 = 3p$	type: tournant fréquence: $f_1 \left\{ 3 + \frac{g_2 Q_r}{p} (1-s) \right\}$ $g_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ nombre de paires de pôles: $\nu_2 = 3p + g_2 Q_r$			2
Champs additionnels dans des conditions de défaut	défauts entre spires défauts entre phases doubles défauts de terre	type: superposition de champs tournant en sens inverse d'amplitudes différentes fréquence: f_1 nombre de paires de pôles: $\nu_1 = 1; 2; 3; \dots$	type: superposition de champs tournant en sens inverse d'amplitudes différentes fréquence: $f_1 \left\{ \pm 1 + \frac{g_2 Q_r}{p} (1-s) \right\}$ $g_2 = \pm 1; \pm 2; \dots$ + champs de séquence positive - champs de séquence négative			3
			nombre de paires de pôles: $\nu_2 = \nu_1 + g_2 Q_r$			

Origine du champ		Champs de stator	Champs de rotor	Point
	excentricité	type: 2 champs tournants fréquence: $f_1 \left\{ 1 \pm \frac{K}{p} (1 - s) \right\}$ $K = 0$: excentricité statique $K = 1$: excentricité dynamique nombre de paires de pôles: $\nu_1 = p \pm 1$	type: 2 champs tournants fréquence: $f_1 \left\{ 1 + \left[\pm \frac{K}{p} + \frac{g_2 Q_r}{p} \right] (1 - s) \right\}$ nombre de paires de pôles: $\nu_2 = \nu_1 + g_2 Q_r$ $g_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$	4
	rotor asymétrique		type: superposition de champs tournant en sens inverse de même amplitude fréquence: $f_1 \left\{ \pm s + \frac{\nu_2}{p} (1 - s) \right\}$ nombre de paires de pôles: $\nu_2 = 1; 2; 3; \dots$	5
Symboles:				
f_1	fréquence fondamentale	Q_s	nombre d'encoches de stator	
p	nombre de paires de pôles, pour lequel le moteur est conçu	Q_r s	nombre de barres de rotor glissement	
ν	nombre de paires de pôles en général			

5 Types d'analyses de signaux électriques

5.1 Généralités

Une méthode de détection significative doit pouvoir détecter des défaillances à une étape précoce. En conséquence, des signaux présentant une variation rapide dans le cas de faibles anomalies, sont optimaux pour le but visé. Inversement, il convient de ne pas utiliser comme base du diagnostic les signaux qui ne varient que de façon insignifiante.

Le traitement de signal nécessite la disponibilité d'un matériel électronique approprié. Bien que la résolution des dispositifs modernes soit importante, il convient de préférer à cet égard des signaux ne nécessitant pas une précision excessive.

5.2 Analyse des courants/tensions d'un stator

L'analyse des tensions ou des courants aux bornes d'une machine tournante permet d'identifier:

- des fréquences différentes,
- des composantes de séquences positives, négatives et nulles,
- des amplitudes différentes des composantes.

Toutes les ondes d'induction dans le champ de l'entrefer peuvent généralement induire des tensions à certaines fréquences dans l'enroulement du stator, et peuvent produire des courants ayant les mêmes fréquences. Les composantes de courant additionnelles qui sont générées par une défaillance spécifique sont superposées aux valeurs d'alimentation durant un fonctionnement non perturbé. Tous les détails doivent être extraits du tableau approprié, c'est-à-dire le Tableau 1, dans le cas de moteurs triphasés à induction à cage.

Le Tableau 1 est donné pour une fréquence d'alimentation unique f_1 . Toutefois, dans le cas d'une machine alimentée par un convertisseur, il reste valable pour chaque composante de tension/fréquence contenue dans le spectre de sortie du convertisseur.

Le Tableau 1 indique les composantes du champ de l'entrefer. Le fait qu'une composante spécifique induise une tension dans l'enroulement du stator dépend de son facteur d'enroulement pour le nombre de paires de pôles considéré. Le facteur d'enroulement est le produit des termes suivants:

- le facteur de distribution,
- le facteur de raccourcissement ou d'allongement,
- le facteur de branche.

Les ingénieurs ne connaissent généralement pas le facteur de branche, mais celui-ci est d'une importance fondamentale pour le problème à l'étude. Chaque enroulement symétrique triphasé à nombre entier d'encoches consiste en p (dans le cas d'un enroulement à une seule couche) ou $2p$ (dans le cas d'un enroulement double couche) groupes de bobines identiques (branches), qui sont répartis symétriquement autour de la circonférence. Ceux-ci peuvent être connectés en série ou connectés de manière à former des branches parallèles au nombre maximum de $a = 2p$. La méthode de connexion influe considérablement sur le facteur de branche d'un nombre spécifique de paires de pôles.

On peut montrer que le facteur de branche est nul pour les champs d'excentricité $v = p + 1$ et $v = p - 1$ pour tous les enroulements avec une connexion en série de groupes de bobines. *En conséquence, on ne peut pas détecter les deux types d'excentricité pour de telles machines par une analyse du courant du stator.*

Le facteur de branche des champs harmoniques selon les points 1 à 4 du Tableau 1 dépend également de la configuration individuelle et, de plus, du nombre d'encoches du rotor. La conception d'un cas donné est choisie par le fabricant de la machine pour des raisons différentes (par exemple, pour supprimer une traction magnétique déséquilibrée, pour éviter des tonalités magnétiques indésirables, etc.), et elle est inconnue de l'utilisateur. *Il n'est en conséquence pas recommandé d'utiliser les champs de rotor harmoniques des points 3 et 4 en tant que signal pour une analyse du courant du stator.*

Le groupe de défauts d'enroulement du point 3 indique les anomalies les plus graves des parties actives. Elles produisent toutes des champs magnétiques à la fréquence fondamentale. *Ainsi, il n'est pas possible de détecter des défauts d'enroulement par une analyse fréquentielle des courants du stator.*

Les ondes de champ produites par des défauts d'enroulement sont de nature elliptique, ce qui signifie la superposition de deux ondes tournant en sens inverse, ayant le même nombre de pôles et la même fréquence, mais des amplitudes différentes. On peut en principe détecter de telles défaillances en examinant la composante de séquence négative du courant de la fréquence fondamentale.

En particulier, dans le cas de la défaillance la plus dangereuse, un défaut entre spires d'une machine à haute tension, lorsque les courants forts circulent dans une seule parmi un grand nombre de spires par phase, cette composante est très faible. Une composante de séquence négative du courant peut également être provoquée par une faible asymétrie inévitable des tensions d'alimentation (une composante de séquence négative de la tension produit une composante de séquence négative des courants, qui est de 6 à 10 fois plus grande). *En résumé, il n'est pas conseillé de détecter des défauts d'enroulement au moyen d'une analyse de tension/courant.*

Une détection fiable des imperfections ou des défauts des cages (par exemple barres ou bagues d'extrémité brisées) est possible par une analyse du courant du stator.

Un autre inconvénient de l'analyse de courant du stator ne peut pas être négligé. Les statistiques des compagnies d'assurance montrent que la majeure partie des défauts d'enroulement apparaissent durant des phénomènes transitoires tels que le démarrage des moteurs, des courts-circuits aux bornes, etc., et produisent des appels de courants élevés. Il est impossible de détecter des défaillances par une analyse de courant durant l'intervalle des transitoires.

5.3 Tensions induites de spires auxiliaires incorporées dans les encoches du stator ou autres capteurs magnétiques détectant le flux de l'entrefer

Un signal de diagnostic idéal est nul durant le fonctionnement d'une machine saine dans des conditions en régime permanent et transitoire, il augmente avec l'importance de l'anomalie pour tous les types de défaillances, selon les points 3 à 5 du Tableau 1, et il est capable de faire la distinction entre les défaillances. Des solutions proches de l'optimum ont été mises au point.

Ces solutions sont basées sur des spires réalisées avec un fil isolant, dont le diamètre peut être choisi selon des critères uniquement mécaniques. Les deux côtés d'une bobine sont incorporés dans les encoches du stator de l'enroulement principal, généralement durant la fabrication de la machine, entre la couche supérieure de l'enroulement et la cale d'encoche. L'assemblage est possible à une étape ultérieure. Les connexions d'extrémité sont disposées à proximité de l'extrémité du noyau.

On peut finalement obtenir le même aperçu du champ magnétique à des emplacements spécifiques sur l'alésage du stator à l'aide d'autres types de capteurs magnétiques, au lieu de mesurer des spires.

Habituellement, plusieurs spires ayant le même pas sont connectées en série et décalées les unes des autres d'un angle prédéterminé. Ceci a pour but d'obtenir finalement un système de bobines de mesure auxiliaires, pour lequel le facteur d'enroulement résultant est nul pour les champs de tous les entrefers qui existent durant un fonctionnement normal non perturbé, et pour lequel le facteur d'enroulement est maximum pour un champ ayant ce nombre de paires de pôles, destiné à être utilisé en tant que champ de référence du diagnostic.

Si l'on peut trouver un système de bobines auxiliaires satisfaisant à la condition expliquée ci-dessus pour un champ de référence, faisant partie des champs générés par toutes les défaillances des points 3 à 5, le système de bobine serait complet. Cependant, une difficulté subsiste: les champs produits par un défaut d'enroulement selon le point 3 du Tableau 1, sont de nature elliptique. Si l'on choisit l'un d'entre eux en tant que champ de référence, la tension induite du système de bobines varie avec l'emplacement du défaut sur la circonférence. Naturellement, une telle situation est inacceptable.

On peut résoudre le problème en utilisant un deuxième système de bobines identique, qui est décalé par rapport au premier de l'angle $\pi/(2v)$, v étant le nombre de paires de pôles du champ de référence. Les deux groupes de bobines forment alors un système biphasé symétrique permettant de calculer facilement les composantes symétriques (SC, en anglais *symmetrical components*) des deux tensions mesurées. Les SC sont indépendantes de l'emplacement du défaut.

Ce guide n'est pas le lieu approprié pour expliquer en détail les règles de conception du système de bobines. Il est simplement mentionné que le nombre minimum de spires par système de bobines varie habituellement entre 6 et 12 en fonction des données de la machine concernée et des exigences du critère vis-à-vis de la sensibilité du diagnostic.

Le champ de référence est extrait de la liste de champs d'entrefer qui sont générés par l'état de défaut et qui sont nuls durant un fonctionnement normal. En conséquence, l'amplitude du champ de référence est pratiquement inchangée durant les transitoires. Cette affirmation est prouvée par des essais.

La procédure du diagnostic est exécutée dans le Tableau 2. Les défauts d'enroulement sont caractérisés par le critère selon lequel les deux composantes symétriques (de séquences positive et négative) existent et sont à la fréquence du réseau. Dans le cas d'une excentricité statique, les tensions sont également à la fréquence du réseau, mais la composante de séquence négative U_n est nulle. On peut distinguer une excentricité dynamique des autres conditions de défaut par les fréquences typiques des tensions induites. Les asymétries du rotor sont marquées par d'autres fréquences typiques; les tensions induites deviennent nulles, lorsque la machine fonctionne à une vitesse synchrone ($s = 0$), car les courants du rotor responsables du champ de référence disparaissent alors.

On peut en conclure qu'un système de bobines auxiliaires conçu professionnellement constitue un outil utile pour la détection et le diagnostic des défauts.

Pour être complet, il convient de mentionner que d'autres types de bobines de recherche ont été proposés dans des articles techniques, comprenant par exemple une seule dent de stator. Elles peuvent être utiles pour rechercher un effet spécifique, mais elles ne conviennent pas pour réaliser un diagnostic complet et en conséquence, n'ont pas été introduites dans les pratiques de l'ingénierie.

Tableau 2 – Diagnostic des défaillances d'un moteur à induction à cage équipé de deux systèmes identiques de bobines auxiliaires

Type de défauts	Grandeurs mesurées				
	f	U_1	U_2	U_p	U_n
Défaut d'enroulement	$f = f_1$	$U_1 \neq 0$	$U_2 \neq U_1 \neq 0$	$U_p \neq 0$	$U_n \neq 0$
Excentricité statique	$f = f_1$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$	$U_p \neq 0$	$U_n \neq 0$
Excentricité dynamique	$f = f_1 \left\{ 1 \pm \frac{1}{p} (1-s) \right\}$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$		
Rotor asymétrique	$f = f_1 \left\{ \frac{1}{p} (1-s) \pm s \right\}$	$U_1 \neq 0$	$U_2 = U_1$		
Les marquages d'identification sont encadrés en gras.					
Symboles:	U_1, U_2	valeurs efficaces des tensions mesurées des systèmes de bobine 1 et 2			
	$\underline{U}_p = \frac{1}{2} (\underline{U}_1 + j \underline{U}_2)$	composante de séquence positive de la tension mesurée			
	$\underline{U}_n = \frac{1}{2} (\underline{U}_1 - j \underline{U}_2)$	composante de séquence négative de la tension mesurée			

5.4 Tensions induites de bobines de recherche recueillant des flux axiaux

Des propositions ont été faites pour utiliser soit des bobines toroïdales, fixées à l'avant de la machine, soit des bobines entourant l'arbre de la machine. Dans les deux cas, il est prévu d'utiliser le flux axial produit par la machine pour la détection des défaillances. Ces approches ne sont généralement pas avantageuses pour les raisons suivantes.

Les composantes de flux axial sont toujours parasites et non désirées, car les performances de la machine sont basées sur des composantes de flux décrivant une boucle dans la section transversale des tôles. Le flux axial est très faible en raison de la grande résistance magnétique de l'air. On ne peut pas prédire le flux axial par des méthodes analytiques.

Le flux produit par les défauts d'enroulement les plus importants est à la fréquence fondamentale et l'amplitude de sa composante axiale est imprévisible.

Dans le seul cas des excentricités dans les machines à 2 pôles, le champ d'excentricité avec un nombre de paires de pôles de $p - 1$ dégénérera en un flux unipolaire que l'on peut réussir à mesurer au moyen d'une bobine annulaire entourant l'alésage du stator et montée à une extrémité du noyau.

A cette exception près, l'utilisation de bobines de recherche recueillant des flux axiaux n'est pas recommandée.

5.5 Analyse de tension électrique de l'arbre

Certains auteurs prétendent que la mesure de la tension électrique de l'arbre est utile pour détecter toute distorsion dans la distribution de flux interne d'une machine.

Les tensions électriques de l'arbre sont induites par un flux magnétique annulaire décrivant une boucle autour de l'arbre. Ce flux annulaire est provoqué par des irrégularités de la culasse du stator (par exemple, des barrettes crans de serrage) et leur distribution le long de la circonférence dans le cas de machines alimentées par le réseau. Un flux annulaire est généré uniquement lorsque l'intégrale de la force du champ magnétique autour de la circonférence s'écarte de zéro. À cet égard, les champs ayant un nombre de paires de pôles de p et $3p$ jouent le rôle le plus important. Ce contexte physique démontre que l'impact des défauts d'enroulement sur la tension électrique de l'arbre est purement parasite et qu'il est trop faible pour être utilisé en tant que dispositif de détection sensible.

Dans le cas d'alimentations par convertisseurs, la tension électrique de l'arbre peut considérablement augmenter en raison des composantes de flux annulaire qui sont provoquées par la tension en mode commun du convertisseur. En conséquence, ces composantes de la tension électrique de l'arbre ne sont pas liées à la distribution du flux de fonctionnement de la machine et elles sont totalement inadaptées au but visé.

En résumé, on ne peut pas détecter de manière fiable les défaillances sur les parties actives par une analyse de la tension électrique de l'arbre.

6 Courants de palier

Les courants de palier peuvent avoir deux origines:

- les irrégularités de la culasse du noyau,
- les courants en mode commun dans le cas de moteurs alimentés par des convertisseurs.

Lorsque la culasse contient des irrégularités telles que des conduits de ventilation, des joints, des rainures de serrage en queue d'aronde, etc., leur nombre et leur distribution le long de la circonférence sont décisifs pour la génération des tensions électriques d'arbres pouvant produire des courants de palier circulant à travers les deux paliers. Les courants de palier

contiennent habituellement de façon prédominante la fréquence fondamentale à laquelle se superpose une composante égale à trois fois la fréquence fondamentale, due aux effets de saturation. Une expérience de longue date montre que les paliers sont mis en danger lorsque la tension électrique de l'arbre dépasse 200 mV à 250 mV (efficaces). Dans ce cas, il est de la responsabilité du fabricant d'éviter les courants de palier au moyen de l'isolation du palier du côté opposé à la commande (NDE, en anglais *non-drive end*). Plusieurs types d'isolations sont courants.

Lorsque le palier opposé à l'accouplement de la machine entraînée est convenablement isolé, aucune mesure complémentaire de protection n'est habituellement nécessaire. Toutefois, dans le cas où on ne peut pas exclure un pontage de l'isolation par des mesures commises par inadvertance, il est conseillé de surveiller la tension de part et d'autre de l'isolation.

Si la machine tournante est alimentée par un convertisseur avec une tension continue appliquée dans le circuit intermédiaire, la tension en mode commun (composante de séquence nulle) du convertisseur constitue une source supplémentaire de courants de palier. En fonction des détails de la configuration, ces courants peuvent ne passer que par un palier (courants de décharges électriques d'EDM (en anglais *Electric Discharge Machining*) et de terre revenant au convertisseur par l'intermédiaire du système de mise à la masse), ou ils peuvent circuler à travers les deux paliers, lorsqu'ils sont provoqués par les courants capacitifs entre l'enroulement et les tôles.

On peut mesurer les courants en mode commun mais, s'ils peuvent suivre des chemins différents du châssis de la machine jusqu'à la masse, on ne peut pas les considérer comme une indication du risque. La décision du fait que l'isolation d'un palier est une mesure de précaution suffisante ou du fait qu'il faut isoler les deux paliers, est de la responsabilité du concepteur/fournisseur du système.

Le choix de l'isolation des paliers doit tenir compte du fait que la fréquence des courants en mode commun est de l'ordre du kilohertz et que l'analyse des claquages d'EDM comprend des valeurs beaucoup plus grandes. On ne peut pas supprimer les courants capacitifs par un film mince d'isolation de l'ordre d'une centaine de micromètres.

Dans le cas où l'on utilise un balai de mise à la masse, on peut analyser le courant circulant à travers ce balai pour rechercher l'origine du courant.

On peut surveiller un claquage de l'isolation des paliers ou une décharge à travers le film d'huile des paliers, en mesurant la tension entre l'arbre et la masse à l'aide d'un balai de détection.

Pour les essais, des broches de contact peuvent être installées des deux côtés de l'isolation pour mesurer la tension de part et d'autre de l'isolation ou le courant de palier, lorsque l'isolation est pontée par un cavalier. Ces mesures nécessitent l'utilisation d'instruments et d'un câblage appropriés aux fréquences élevées. La surveillance de ces grandeurs est actuellement exceptionnelle.

Bibliographie

[1]	Frohne, H.	Theorie einer Messeinrichtung zur Überwachung von Luftspaltänderungen in Asynchronmaschinen mit Käfigläufern (Titre en anglais: Theory of a measuring device for the monitoring of eccentricities in cage induction motors) ETZ-A, 87, 1966, 127 - 132
[2]	Frohne, H.	Messreinrichtung zum Erfassen von Luftspaltänderungen in Drehstrommaschinen mit Ganz- oder Bruchlochwicklungen (Titre en anglais: Measuring device to detect eccentricities in multi-phase machines with integral-slot or fractional-slot windings) ETZ-A, 87, 1966, 592 - 598
[3]	Frohne, H. Seinsch, H.O.	Praktische Ausführung und experimentelle Prüfung einer Luftspaltüberwachungseinrichtung (Titre en anglais: Verification and testing of a device to monitor the centrosymmetry of the air gap) E.u.M., 85, 1968, 285 – 280
[4]	Rickson, C.D.	Protecting motors from overload due to asymmetrical fault conditions Electr. Review, 7, 1973, 778 - 780
[5]	Rogge, D. Seinsch, H.O.	Erkennung und Überwachung von elektrischen Läuferunsymmetrien in Käfigläufern (Titre en anglais: Detection and monitoring of electrical rotor asymmetries in cage induction machines) etz-Archiv, 1981, 339 – 45
[6]	Hargis, C. Gaydon, B.G. Kamash, K.	The Detection of Rotor Defects in Induction Motors IEE Conf. On Electrical Machines, 1982, 216-220
[7]	Kaumann, U. Wolf, B.	Möglichkeiten und Grenzen der Überwachung von elektrischen Läuferunsymmetrien bei Käfigläufermotoren (Titre en anglais: Options and limits of the monitoring of electrical rotor asymmetries in cage induction motors) Schorch-Berichte, 1984, 13 - 23
[8]	Deleroi, W.	Der Stabbruch im Käfigläufer eines Asynchronmotors (Titre en anglais: Broken bars in the cage of induction motors) A.f.E., 67, 1984, 91 – 99, 141 - 149
[9]	Williamson, S. Mirzoian, K.	Analysis of cage induction motors with stator winding faults IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.104, no. 7, 1985, 1838-1842
[10]	Thomson, W. T. Rankin, D.	Cases Histories of Rotor Winding Fault Diagnosis in Induction Motors Proceeding of 2 nd Int. Con. on Condition Monitoring, University College of Swansea, 1987, 798-819
[11]	Tavner, P.J. Penman, J.	Condition Monitoring of Electrical Machines J. Wiley & Sons, New York, 1987

[12]	Heinrich, W.	Messtechnische Erfassung von Läuferfehlern aus Klemmengrößen (Titre en anglais: Detection of rotor failures by means of analysing the terminal voltages and currents) etz-Archiv, 10, 1988, 61 - 64
[13]	Penman, J. Dey, M.N.	Multifunctional monitoring and protection scheme for electrical machines UPEC, 19, 1983, 4 - 12
[14]	Penman, J. Tait, A.J. Smith, J.R. Bryan, W.E.	The development of a machine condition monitoring system for electrical drives Proceedings of the Conference on Drives/Motors/Control, 1985, 123 - 129
[15]	Kaumann, U.	Analytische und experimentelle Behandlung von Induktionsmaschinen mit beliebiger Läuferunsymmetrie (Titre en anglais: Analytical theory and experimental verification of the performance of induction machines with any rotor asymmetry) Dissertation, Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, Universität Hannover, 1983
[16]	Seinsch, H.O.	Diagnose und Überwachung von anomalen Betriebszuständen und Schäden in Drehstrommaschinen (Titre en anglais: Diagnosis and monitoring of abnormal operating conditions and failures in multi-phase machines) Schorch-Berichte, 1986, 4 - 12
[17]	Früchtenicht, S. Pittius, E. Seinsch, H.O.	Ein Diagnosesystem für Drehstrom-Asynchronmaschinen (Titre en anglais: Diagnostic system for multi-phase induction machines) etz-Archiv, 11, 1989, 145 - 153
[18]	Pittius, E.	Analytische und experimentelle Behandlung von Erdschlüssen in Induktionsmaschinen (Titre en anglais: Analytical theory and experimental verification of earth faults in induction machines) Dissertation, Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, Universität Hannover, 1989
[19]	Früchtenicht, S. Pittius, E. Seinsch, H.O.	Diagnostic system for three-phase asynchronous machines Fourth International IEE Conference on Electrical Machines and Drives, London, 1989, 163 - 171
[20]	Früchtenicht, S.	Analytische und experimentelle Behandlung von Wicklungsschlüssen in Asynchronmaschinen (Titre en anglais: Analytical theory and experimental verification of winding faults in induction machines) Fortschritt-Berichte VDI Reihe 21, Nr. 56, VDI-Verlag Düsseldorf, 1990

[21]	Ojo, J.O. Consoli, A. Lipo, T.A.	An improved model of saturated induction machines IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 26, no. 2, 1990, 212 - 221
[22]	Slemon, G.R.	An equivalent circuit approach to analysis of synchronous machines with saliency and saturation IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 5, no. 3, 1990
[23]	Toliyat, H.A. Rahimian, M.M. Bhattacharya, S. Lipo, T.A.	Transient analysis of induction machines under internal faults using winding functions Proc. 3 rd Int. Conf. Electrical Rotating Machines – ELROMA'92, 1992, Bombay
[24]	Cardoso, A.J.M. Saraiva, E.S.	Computer-Aided Detection of Air-gap Eccentricity in Operating Three-Phase Induction Motors by Park's Vector Approach IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 5, 1993, 897 - 901
[25]	Gentile, G. Rotondale, N. Martelli, M. Tassoni, C.	Harmonic analysis of induction motors with stator faults Electric Power Components and Systems, vol. 22, no. 2, 1994, 215-231
[26]	Toliyat, H.A. Lipo, T.A.	Transient analysis of cage induction motors under stator, rotor bar end ring faults, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, no. 2, 1995, 241 - 247
[27]	Ponick, B.	Fehlerdiagnose bei Synchronmaschinen (Titre en anglais: Diagnosis of failures in synchronous machines) Fortschritt-Berichte VDI Reihe 21, Nr. 147, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
[28]	Filippetti, F. Franceschini, G. Tassoni, C. Meo, S. Ometto, A.	A simplified model of induction motor with stator shorted turns oriented to diagnostics Proc. Int. Conf. Elect. Mach., ICEM, 1996, 410-413
[29]	Rust, St. Seinsch, H.O.	Überwachung von Windungsschlüssen im Läufer von Induktionsmotoren mit Schleifringläufer (Titre en anglais: Monitoring of winding faults in the rotor of slip-ring induction motors) Elektrie, 50, 1996, 347 - 355
[30]	Chen, S. Lipo, T. A.	Circulating type motor bearing currents in inverter drives IEEE IAS Conf., 1996, 162-167
[31]	Chen, S. Lipo, T. A. Fitzgerald, D.	Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters IEEE Trans. Energy Conv., vol. 11, 1996, 25-32

[32]	Erdmann, J. M. Kerkman, R. J. Schlegel, D. W. Skibinski, G.	Effect of PWM Inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, 1996, 243-252
[33]	Bradley, K.J. Tami, A.	Reluctance mesh modelling of induction motors with healthy and faulty rotors Proc. 31 st IAS Ann. Meeting, 1996, 625 - 632
[34]	Dorrell, D. G. Thomson, W. T. Roach, S.	Analysis of air gap flux, current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air gap eccentricity in 3-phase induction motors IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 33, no. 1, 1997, 24-34
[35]	Chen, S. Lipo, T. A.	Bearing currents and shaft voltages of an induction motor under hard and soft switching inverter excitation IEEE IAS Annual Meeting, 1997, 1-7
[36]	Filippetti, F. Franceschini, G. Tassoni, C. Vas, P.	AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 1, 1998, 98-108
[37]	Ostovic, V.	A simplified approach to magnetic equivalent-circuit modeling of induction machines IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 24, no. 2, 1998, 308 - 316
[38]	Cardoso, Aj.J.M. Cruz, S.M.A. Fonseca, D.S.B.	Inter-Turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Park's Vector Approach IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, 1999, 595 - 598
[39]	Benbouzid, M.E.H.	Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, 1999, 1065 - 1074
[40]	Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, G. Tassoni, C.	Closed-loop control impact on the diagnosis of induction motors faults IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 5, 2000, 1318-1329
[41]	Hausberg, V. Seinsch, H. O.	Kapazitive Lagerspannungen und –ströme bei umrichter gespeisten Induktionsmaschinen (Titre en anglais: Capacitively coupled bearing voltages and bearing currents of converter-fed induction machines) Electrical Engineering, vol. 82, no. 3-4, 2000, 153-162
[42]	Hausberg, V. Seinsch, H. O.	Wellenspannungen und zirkulierende Lagerströme bei umrichter gespeisten Induktionsmaschinen (Titre en anglais: Shaft voltages and circulating bearing currents of converter-fed induction machines) Electrical Engineering, vol. 82, 2000, 313-326

[43]	Hausberg, V. Seinsch, H. O.	Schutzmaßnahmen gegen Lagerschäden umrichter gespeister Motoren (Titre en anglais: Protective provisions against bearing faults of converter-fed motors) Electrical Engineering, vol. 82, 2000, 339-345
[44]	Joksimovic, G.M. Penman, J.	The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 5, 2000, 1078 - 1084
[45]	Cruz, S.M.A. Cardoso, A.J.M.	Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach Electric Machines and Power Systems, vol. 28, no. 4, 2000, 289 - 299
[46]	Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, G. Tassoni, C. Kliman, G. B.	Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, 2001, 1248-1255
[47]	Cruz, S.M.A. Cardoso, A.J.M.	Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors by the Extended Park's Vector Approach IEEE Transactions on Industry Applications, vol 37, no. 5, 2001, 1227 - 1233
[48]	Stavrou, A. Sedding, H.G. Penman, J.	Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 16, no. 1, 2001, 32 - 37
[49]	Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, G. Tassoni, C. Passaglia, R. Saottini, M. Tontini, G. Giovannini, M. Rossi, A.	On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 4, 2002, 1045-1053
[50]	Kohler, J. L. Sottile, J. Trutt, F. C.	Condition monitoring of stator windings in induction motors. I. experimental investigation of the effective negative-sequence impedance detector IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 5, 2002, 1447-1453
[51]	Sottile, J. Trutt, F. C. Kohler, J. L.	Condition monitoring of stator windings in induction motors. II. experimental investigation of voltage mismatch detectors IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 5, 2002, 1454-1459

[52]	Cruz, M.A. Cardoso, A.J.M.	Diagnosis of stator interturn short circuits in DTC induction motor drives Proc. 38 th IAS Conf., Salt Lake City, 2002
[53]	Lee, S. B. Tallam, R. M. Habetler, T. G.	A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 3, 2003, 865-872
[54]	Kral, C. Habetler, T. G. Harley, R. G. Pirker, F. Pascoli, G. Oberguggenberger, H. Fenz, C. J. M.	A Comparison of Rotor Fault Detection Techniques with Respect to the Assessment of Fault Severity SDEMPED'03, Atlanta, USA, 2003, 265-270
[55]	Cruz, M.A. Cardoso, A.J.M. Toliyat, H.A.	New developments in the diagnosis of faults in line-connected and direct torque controlled induction motors Proc. 29 th Annual IECON '03, 2003
[56]	Meshgin-Kelk, H. Milimonfared, J. Toliyat, H.A.	Interbar currents and axial fluxes in healthy and faulty induction motors IEEE Trans. Ind. Applicat., vol 40, no. 1, 2004, 392 - 398
[57]	Bellini, F. Concari, C. Franceschini, G. Lorenzani, E. Tassoni, C.	Induction drives diagnosis by signal injection technique: Effectiveness and severity classification IEEE IEMDC'05, International Electric Machines and Drives Conference, San Antonio, TX, USA, 2005
[58]	Cruz, S. M. A. Cardoso, A. J. M.	Multiple reference frames theory: A new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 3, 2005, 611-619
[59]	Nandi, S. Toliyat, H. A. Li, X.	Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, 2005, 719-729
[60]	Garcia, P. Briz, F. Degner, M. W. Diez, A. B.	Induction machine diagnostics using the zero sequence voltage IEEE-IAS, 2005
[61]	Oumaamar, M. E. K. Babaa, F. Khezzar, A. Boucherma, M.	Diagnostics of broken rotor bars in induction machines using the neutral voltage ICEM'06, Chania, Greece, 2006

[62]	Gerads, G. Bradley, K. J. Summer, M. Weeiler, P. Pikering, S. Clare, J. Whitley, C. Towers, G.	The results do mesh IEEE Industry Application Magazine, vol. 13, no. 2, 2007, 62-72
[63]	Tallam, R. M. Lee, S. B. Stone, G. C. Kliman, G. B. Yoo, J. Habetler, T. G. Harley, R. G.	A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 4, 2007, 920-933

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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