

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61986

Première édition
First edition
2002-01

**Machines électriques tournantes –
Charge équivalente et techniques
par superposition –
Essais indirects pour déterminer
l'échauffement**

**Rotating electrical machines –
Equivalent loading and super-position
techniques –
Indirect testing to determine
temperature rise**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61986:2002

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

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

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

- IEC Just Published

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

- Service clients

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

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

Publication numbering

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

Consolidated editions

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

Further information on IEC publications

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

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

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

- IEC Just Published

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

- Customer Service Centre

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

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61986

Première édition
First edition
2002-01

**Machines électriques tournantes –
Charge équivalente et techniques
par superposition –
Essais indirects pour déterminer
l'échauffement**

**Rotating electrical machines –
Equivalent loading and super-position
techniques –
Indirect testing to determine
temperature rise**

© IEC 2002 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

T

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
1 Domaine d'application	6
2 Références normatives	6
3 Symboles et unités	8
4 Exigences générales d'essai	10
5 Principe des essais par superposition	10
5.1 Généralités	10
5.2 Echauffement admissible dans les essais par superposition	12
6 Méthodes par superposition pour les moteurs à induction	14
6.1 Méthode de la tension réduite et du courant assigné	14
6.2 Méthode à tension assignée et à courant réduit	18
6.3 Méthode pour les moteurs à induction à rotor bobiné	20
7 Méthodes par superposition pour machines synchrones	20
7.1 Méthode de circuit ouvert, de court-circuit et d'excitation nulle	20
7.2 Méthode de charge à facteur de puissance nul et à circuit ouvert	22
8 Méthode par superposition pour les machines à courant continu	24
9 Principe d'essais de charge équivalente	24
9.1 Généralités	24
9.2 Echauffement admissible lors des essais de charge équivalente	26
10 Essais de charge équivalente pour les moteurs à induction	26
10.1 Essai de court-circuit direct	26
10.2 Méthode de la fréquence modulée	28
10.3 Injection de courant continu	30
10.4 Méthode de fréquence mixte ou de fréquence double	32
11 Essai de charge équivalente pour machines synchrones – Facteur de puissance nul	34
Figure 1 – Méthode par superposition graphique pour moteurs à induction	38
Figure 2 – Calcul de l'échauffement d'excitation à charge assignée(machines synchrones)	40
Figure 3 – Circuit d'essai pour essai de charge équivalente à injection de courant continu	42
Figure 4 – Essai à fréquence mixte – Génératrices en série	42
Figure 5 – Essai à fréquence mixte – Transformateur en série	44
Figure 6 – Combinaison de couple et de courant au point de fonctionnement dans les essais à fréquence mixte	44
Figure 7 – Méthode d'alimentation rotorique à fréquence mixte	46

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Symbols and units	9
4 General test requirements	11
5 Principle of superposition tests	11
5.1 General.....	11
5.2 Permissible temperature rise at superposition tests	13
6 Superposition methods for induction motors	15
6.1 Method of reduced voltage and rated current.....	15
6.2 Method of rated voltage and reduced current.....	19
6.3 Method for wound-rotor induction motors.....	21
7 Superposition methods for synchronous machines	21
7.1 Method of open circuit, short circuit, zero excitation	21
7.2 Method of zero power factor and open circuit loading	23
8 Superposition method for d.c. machines	25
9 Principle of equivalent load tests	25
9.1 General.....	25
9.2 Permissible temperature rise at equivalent load tests	27
10 Equivalent load tests for induction motors	27
10.1 Forward short-circuit test	27
10.2 Modulated frequency method.....	29
10.3 DC injection.....	31
10.4 Mixed-frequency or bi-frequency method	33
11 Equivalent load test for synchronous machines – Zero power factor	35
Figure 1 – Graphical superposition method for induction motors	39
Figure 2 – Derivation of field temperature rise at rated load (synchronous machines)	41
Figure 3 – Test circuit for d.c.-injection equivalent load test.....	43
Figure 4 – Mixed-frequency test – Generators in series	43
Figure 5 – Mixed-frequency test – Series transformer	45
Figure 6 – Combination of torque and current at the operating point in a mixed-frequency test.....	45
Figure 7 – Rotor-feeding mixed-frequency method	47

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES – CHARGE ÉQUIVALENTE ET TECHNIQUES PAR SUPERPOSITION – ESSAIS INDIRECTS POUR DÉTERMINER L'ÉCHAUFFEMENT

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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 Norme internationale CEI 61986 a été établie par le sous-comité 2G: Méthodes et procédures d'essai, du comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2G/115/FDIS	2G/121/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2006. A cette date, la publication sera

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES – EQUIVALENT LOADING AND SUPER-POSITION TECHNIQUES – INDIRECT TESTING TO DETERMINE TEMPERATURE RISE

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61986 has been prepared by subcommittee 2G: Test methods and procedures, of IEC technical committee 2: Rotating machinery.

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

FDIS	Report on voting
2G/115/FDIS	2G/121/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2006. At this date, the publication will be

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

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES – CHARGE ÉQUIVALENTE ET TECHNIQUES PAR SUPERPOSITION – ESSAIS INDIRECTS POUR DÉTERMINER L'ÉCHAUFFEMENT

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux machines couvertes par la CEI 60034-1 lorsque, pour une raison quelconque, il est impossible de les soumettre à une charge d'une condition spécifique (assignée ou autre). Elle est applicable tant aux moteurs qu'aux génératrices mais ces méthodes ne sont pas appropriées aux machines d'une puissance égale ou inférieure à 1 kW.

La présente norme a pour objet de décrire différents essais en charge indirects destinés à déterminer l'échauffement des machines électriques tournantes, y compris les machines à induction à courant alternatif, les machines synchrones à courant alternatif et les machines à courant continu. Dans certains cas, les méthodes d'essai permettent en outre de mesurer ou d'estimer d'autres paramètres tels que les pertes et les vibrations, mais ces méthodes ne sont pas conçues spécifiquement pour fournir de telles données.

Les méthodes d'essai proposées sont considérées comme équivalentes, le choix dépendant uniquement de l'emplacement, des appareils d'essai, du type de machine et de l'exactitude des résultats d'essai.

La présente norme n'est pas destinée à être interprétée comme une exigence de réaliser un ou tous les essais qu'elle décrit sur une quelconque machine donnée. Les essais particuliers à réaliser font l'objet d'accords spéciaux entre le fabricant et l'acheteur.

Etant donné que les méthodes ne reproduisent qu'approximativement les conditions thermiques des machines observées dans les conditions assignées normales, le fabricant et l'acheteur peuvent convenir de prendre les résultats des mesurages de l'échauffement obtenus lors d'essais réalisés selon ces méthodes comme base pour l'évaluation de l'échauffement de la machine conformément à 7.10 de la CEI 60034-1.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60034-1, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

CEI 60034-2, *Machines électriques tournantes – Partie 2: Méthodes pour la détermination des pertes et du rendement des machines électriques tournantes à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)*

ROTATING ELECTRICAL MACHINES – EQUIVALENT LOADING AND SUPER-POSITION TECHNIQUES – INDIRECT TESTING TO DETERMINE TEMPERATURE RISE

1 Scope

This International Standard applies to machines covered by IEC 60034-1 when they cannot be loaded to a specific condition (rated or otherwise) for whatever reason. It is applicable to both motors and generators but the methods are not suitable for machines of and below 1 kW.

The object of this standard is to provide descriptions of various indirect load tests, the purpose of which is to determine the temperature rise of rotating electrical machines, including a.c. induction machines, a.c. synchronous machines and d.c. machines. The test methods in some cases provide, in addition, a means of measuring or estimating other parameters such as losses and vibration, but the methods are not designed specifically to provide such data.

The proposed methods of test are considered equivalent, the choice of them relying only on the location, the testing apparatus and the kind of machine, and the test result accuracy.

It is not intended that this standard be interpreted as requiring the carrying out of any or all of the tests described therein on any given machine. The particular tests to be carried out are subject to a special agreement between the manufacturer and the purchaser.

As the methods reproduce only approximately the thermal conditions of the machines which occur under normal rated condition, temperature-rise measurement results achieved from tests with these methods can be taken as the basis for the evaluation of machine heating according to 7.10 of IEC 60034-1 by agreement between the manufacturer and the purchaser.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60034-1, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-2, *Rotating electrical machines – Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles)*

3 Symboles et unités

$K_{11}, K_{22}, \text{etc.}$	coefficient de pertes thermiques déterminant l'échauffement du composant 1 dû à des pertes dans le composant 1, etc., K/W
$K_{12}, K_{13}, \text{etc.}$	coefficient de pertes thermiques déterminant l'échauffement du composant 1 dû à des pertes dans le composant 2, etc., K/W
$\Delta\theta$	échauffement, K
θ	température, °C
K	facteur d'inclinaison de la ligne droite qui caractérise la variation de l'échauffement en fonction des pertes, K/W
P	perte, W
I	courant, A
R	résistance, Ω
X_L	réactance de fuite statorique, Ω
V	tension, V
f	fréquence, Hz
ω	pulsation, rad/s
$f_{1,2}$	fréquence principale/auxiliaire, Hz
Δt	intervalle de temps, s
λ	rapport de la tension auxiliaire à la tension principale
F	fréquence de modulation, Hz
δ	amplitude de la modulation de fréquence, Hz
T	couple, Nm
J	moment d'inertie, kgm^2
$\cos\phi$	facteur de puissance
γ	exactitude de l'essai, %
σ	facteur de correction
Indices	
m, n, o, p	conditions d'essai
1, 2, 3, etc.	composant de machine (par exemple enroulement statorique, enroulement rotorique, fer statorique, etc.)
t	essai
f	excitation
A	ambiant
s	stator
N	valeur assignée
α	surexcité/circuit ouvert
β	sous-excité/court-circuit.
super	essai par superposition
equiv	essai de charge équivalente

3 Symbols and units

K_{11}, K_{22} , etc.	coefficient of heating losses determining the temperature rise of component 1 due to losses in component 1, etc., K/W
K_{12}, K_{13} , etc.	coefficient of heating losses determining the temperature rise of component 1 due to losses in component 2, etc., K/W
$\Delta\theta$	temperature rise, K
θ	temperature, °C
K	slope factor of the straight line characterizing variation of temperature rise with losses, K/W
P	loss, W
I	current, A
R	resistance, Ω
X_L	stator leakage reactance, Ω
V	voltage, V
f	frequency, Hz
ω	angular frequency, rad/s
$f_{1,2}$	main/auxiliary frequency, Hz
Δt	time interval, s
λ	ratio of auxiliary voltage to main voltage
F	modulation frequency, Hz
δ	amplitude of frequency modulation, Hz
T	torque, Nm
J	moment of inertia, kgm ²
$\cos\phi$	power factor
γ	test accuracy, %
σ	correction factor
Subscripts	
m, n, o, p	test conditions
1, 2, 3, etc.	machine component (for example, stator winding, rotor winding, stator core, etc.)
t	test
f	field
A	ambient
s	stator
N	rated value
α	overexcited/open-circuit
β	underexcited/short-circuit
super	superposition test
equiv	equivalent load test

4 Exigences générales d'essai

Les paramètres électriques doivent être mesurés de la façon suivante.

- a) La classe d'exactitude des appareils de mesure ne doit pas être supérieure à 0,2, à l'exception des wattmètres avec un facteur $\cos\phi$ inférieur à 0,5 et des fréquencemètres dont la classe d'exactitude peut être de 0,5.
- b) L'étendue de mesure des appareils doit être choisie par rapport à des valeurs mesurées supérieures à 30 % de la pleine échelle. Il n'est pas nécessaire de satisfaire à cette exigence pour le mesurage de courant triphasé réalisé au moyen de deux wattmètres, mais les valeurs des courants et des tensions dans les circuits mesurés doivent être d'au moins 20 % des courants et tensions assignés des wattmètres utilisés. L'étendue de mesure des autres appareils de mesure doit être choisie de manière à ne pas augmenter les erreurs de mesure.
- c) La forme d'onde et l'asymétrie de la tension d'alimentation aux bornes de la machine doivent être conformes aux exigences de 6.1 à 6.5 de la CEI 60034-1.
- d) Chaque courant de ligne doit être mesuré. Si ces courants sont inégaux, la moyenne arithmétique doit être utilisée pour déterminer le point de fonctionnement de la machine.
- e) La puissance absorbée d'une machine triphasée peut être mesurée au moyen de deux wattmètres monophasés montés comme pour la méthode des deux wattmètres ou au moyen d'un wattmètre polyphasé ou de trois wattmètres monophasés. La puissance totale relevée sur un wattmètre doit être réduite de la perte par effet Joule dans les circuits de tension ou dans les circuits de courant des appareils selon leur montage, chaque fois que cette perte est une fraction mesurable de la puissance totale. Pour les appareils de mesure numériques, il n'est pas nécessaire de déduire les pertes par effet Joule de la puissance totale relevée sur le wattmètre.

Toutes les grandeurs électriques à mesurer sont, sauf spécification contraire, des valeurs efficaces.

5 Principe des essais par superposition

5.1 Généralités

Les essais par superposition peuvent être appliqués à toute machine à courant continu ou alternatif. La méthode consiste en une série d'essais réalisés dans des conditions de fonctionnement autres qu'à la charge assignée, par exemple à charge réduite, à vide, en court-circuit, à tension réduite, à charge réactive en avant (sous-excité) ou en retard (surexcité) de phase.

La méthode permet de déduire l'échauffement des différents composants de la machine à pleine charge. Pour chaque composant, la perte doit être connue pour chaque condition d'essai donnée et à pleine charge. Il convient de réaliser les essais avec des conditions de refroidissement identiques aux conditions en fonctionnement à charge assignée. Un essai de rotor bloqué n'est par conséquent pas approprié puisque la répartition et les amplitudes du flux d'air seraient incorrects.

A l'issue des différents essais individuels, une série d'équations est construite, chaque équation étant du type:

$$\Delta\theta_{1m} = K_{11}P_{1m} + K_{12}P_{2m} + K_{13}P_{3m}$$

où

$\Delta\theta_{1m}$ est l'échauffement mesuré du composant 1 pour l'essai m;

P_{1m}, P_{2m} , etc. est la perte dans le composant 1, 2, etc. pour la condition d'essai m;

K_{11}, K_{12} , etc. sont les coefficients de pertes thermiques déterminant l'échauffement du composant 1 dû aux pertes dans le composant 1 et l'échauffement dans le composant 1 dû aux pertes dans le composant 2, etc.

4 General test requirements

Measurement of the electrical parameters shall be made as follows.

- a) The class of accuracy of measuring instruments shall be not greater than 0,2, with the exception of wattmeters with $\cos\phi$ lower than 0,5 and frequency meters, which may have accuracy class 0,5.
- b) The measuring range of the instruments shall be chosen with a view to the measured values being higher than 30 % of the full-scale range. These requirements need not be complied with in the case of the three-phase power measurement by means of two wattmeters, but the currents and voltages in the measured circuits shall be at least 20 % of the rated currents and voltages of the wattmeters being used. The range of the other measuring instruments shall be chosen in such a way that the measuring errors are not increased.
- c) The waveform and dissymmetry of the supply voltage at the machine terminals shall be in accordance with the requirements of 6.1 to 6.5 of IEC 60034-1.
- d) Each line current shall be measured. If these are unequal, the arithmetic average value shall be used to determine the machine operating point.
- e) Power input to a three-phase machine may be measured by two single-phase wattmeters connected as in the two-wattmeter method, or one polyphase wattmeter, or three single-phase wattmeters. The total power read on a wattmeter shall be reduced by the amount of the I^2R loss in the voltage circuits or in the current circuits of the instruments according to their connection whenever this loss is a measurable portion of the total power. There is no need to reduce the total power read on a wattmeter by the amount of the I^2R losses for digital measuring instruments.

All the electrical quantities to be measured are root-mean-square values unless otherwise indicated.

5 Principle of superposition tests

5.1 General

Superposition tests may be applied to any d.c. or a.c. machine. The method comprises a series of tests at operating conditions other than rated load, for example, reduced load, no load, short circuit, reduced voltage, leading (underexcited) or lagging (overexcited) reactive load.

The method allows the full-load temperature rise of various component parts of the machine to be deduced. For each component, the loss shall be known at each particular test condition and at full load. The tests should be undertaken with cooling conditions the same as when operating at rated load. Hence, a locked rotor test will not be suitable as the air-flow distribution and magnitudes will be incorrect.

On completion of the individual tests, a series of equations is constructed, each equation being of the form:

$$\Delta\theta_{1m} = K_{11}P_{1m} + K_{12}P_{2m} + K_{13}P_{3m}$$

where

$\Delta\theta_{1m}$ is the measured temperature rise of component 1 for test m;

P_{1m}, P_{2m} etc. is the loss in component 1, 2, etc. for test condition m;

K_{11}, K_{12} , etc. are the coefficients of heating losses determining the temperature rise of component 1 due to losses in component 1, and the temperature rise of component 1 due to losses in component 2, etc.

Les composants 1, 2 et 3 peuvent par exemple être l'enroulement statorique, le fer statorique et l'enroulement rotorique.

Dans certaines conditions d'essai, des pertes peuvent être égales à zéro et le terme associé disparaît par conséquent dans l'équation. Pour une machine synchrone par exemple, $K_{11} P_1 = 0$ à vide et $K_{12} P_2 = 0$ en court-circuit.

La méthode est fondée sur le principe selon lequel les coefficients K restent invariables d'un essai à l'autre, en d'autres termes que les conditions de refroidissement restent invariables entre les essais, ce qui implique la même vitesse pour chaque essai. La méthode est également fondée sur le principe de conditions thermiques linéaires de manière à pouvoir additionner les échauffements d'un cas à ceux d'un autre cas. Cette méthode nécessite de connaître pour chaque cas, par calcul ou par mesurage, les pertes dans les composants correspondants avec suffisamment d'exactitude.

Lorsque les essais sont terminés et les équations compilées, les coefficients K peuvent être calculés par simples calculs arithmétiques. Ces coefficients sont ensuite utilisés dans une équation finale avec les pertes pour les conditions à charge assignée afin de calculer l'échauffement du composant 1. Les échauffements à charge assignée des composants 2 et 3 peuvent être calculés de la même manière.

Si l'une quelconque des pertes dépend de la température (par exemple la perte dans le cuivre statorique), la procédure de calcul doit être répétée en utilisant les valeurs de pertes corrigées par rapport à l'échauffement estimé. Il est probablement suffisant de réaliser cette itération une seule fois.

La méthode peut être utilisée pour déterminer l'échauffement de tout composant à n'importe quelle charge si les pertes à cette charge sont connues. Les coefficients de transmission de chaleur (K_{12} , etc.) peuvent être utiles pour d'autres études de modélisation thermique, par exemple pour analyser la réponse au déséquilibre d'alimentation, la réduction de tension, etc.

Pour tous les essais par superposition, des corrections sont nécessaires pour compenser les variations des caractéristiques de fonctionnement de l'échangeur thermique (lorsque la machine en est équipée), dans la mesure où la résistance thermique de l'échangeur dépend entre autres de la perte totale dans chaque essai.

5.2 Echauffement admissible dans les essais par superposition

Lors de la détermination des échauffements des pièces constitutives de la machine au moyen d'essais par superposition, les écarts par rapport aux résultats obtenus lors des essais à charge assignée sont toujours disponibles (voir la présente norme). Dans le cas d'une erreur négative (voir 6.1, 6.2, 7.1, 7.2 et l'article 8), les échauffements admissibles spécifiés dans la CEI 60034-1 doivent être corrigés.

Si l'exactitude γ % pour les résultats obtenus lors des essais par superposition est une valeur négative, les échauffements possibles en fonctionnement à charge assignée sont généralement égaux à:

$$\Delta \theta_N = \Delta \theta_{N_{\text{super}}} + \Delta \theta_{N_{\text{super}}} \frac{|\gamma|}{100}$$

Pour les erreurs négatives, les échauffements admissibles spécifiés dans la CEI 60034-1 doivent par conséquent être multipliés par le facteur de correction σ suivant:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{|\gamma|}{100}}$$

Components 1, 2, and 3 might be, for example, the stator winding, the stator iron, and the rotor winding.

In some test conditions, certain losses may be equal to zero, and hence the related term in the equation disappears. For example, a synchronous machine has $K_{11} P_1 = 0$ at no load and $K_{12} P_2 = 0$ at short circuit.

The method is based on the principle that the coefficients K do not change from test to test, i.e. that the cooling conditions are invariable between tests, which requires the speed to be the same in each test. The method is also based on the principle of the linear thermal conditions so that temperature rises in one case can be added to those for another case. It requires the losses in the relevant component parts to be known sufficiently accurately for each case, either by calculation or measurement.

When the tests have been completed and the equations compiled, then by simple arithmetic the coefficients K can be derived. These are then used in a final equation with the losses for the rated load condition in order to calculate the temperature rise of component 1. By similar means, the temperature rises at rated load of components 2 and 3 can be derived.

If any component loss is temperature dependent (for example, stator copper loss), then the calculation procedure has to be repeated using values for the loss corrected for the estimated temperature rise. It is probably necessary to do this iteration once only.

The method may be used to determine the temperature rise of any component at any load if the losses at that load are known. The heat transfer coefficients (K_{12} , etc.) may be useful in other thermal modelling studies, for example, in analysing the response to supply unbalance, voltage reduction, etc.

In all superposition tests, correction needs to be made for variation in heat exchanger performance (if one is fitted to the machine), as the thermal performance of the heat exchanger will partly depend on the total loss in each test.

5.2 Permissible temperature rise at superposition tests

When determining the temperature rises of the machine design parts at superposition tests, the variations from the results obtained at the rated load test are always available (see this standard). In the case of negative error (see 6.1, 6.2, 7.1, 7.2 and clause 8), the permissible temperature rises given in IEC 60034-1 shall be corrected.

If the accuracy γ % for the results obtained at the superposition tests is a negative value, the possible temperature rises during the operation at the rated load should be equal to:

$$\Delta \theta_N = \Delta \theta_{N_{\text{super}}} + \Delta \theta_{N_{\text{super}}} \frac{|\gamma|}{100}$$

Consequently, for negative errors, the permissible temperature rises given in IEC 60034-1 shall be multiplied by the correction factor σ , which is as follows:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{|\gamma|}{100}}$$

6 Méthodes par superposition pour les moteurs à induction

6.1 Méthode de la tension réduite et du courant assigné

Cette méthode consiste en une série de trois essais. Une alimentation à tension variable à la fréquence assignée et une génératrice de charge ou un dispositif de freinage de caractéristiques assignées sensiblement inférieures aux caractéristiques assignées du moteur soumis à l'essai sont nécessaires pour cette méthode. Pour chaque condition, la tension, le courant, les pertes de l'enroulement statorique et l'échauffement de l'enroulement statorique sont mesurés. Les conditions d'essai sont les suivantes.

Essai m: tension réduite en chargeant le moteur au courant assigné, donnant V_m , I_m , P_{1m} et $\Delta\theta_{1m}$

Essai n: même tension réduite mais à vide, donnant V_n , I_n , P_{1n} et $\Delta\theta_{1n}$

Essai o: tension assignée et à vide, donnant V_o , I_o , P_{1o} et $\Delta\theta_{1o}$

Dans ces essais

$\Delta\theta_{1m}$ est l'échauffement de l'enroulement statorique dû au courant assigné statorique, au courant quasi assigné rotorique et à la perte de tension réduite et à vide dans le fer ainsi qu'aux pertes par frottement et par ventilation;

$\Delta\theta_{1n}$ est l'échauffement de l'enroulement statorique dû au courant réduit statorique et à la perte de tension réduite dans le fer ainsi qu'aux pertes par frottement et par ventilation;

$\Delta\theta_{1o}$ est l'échauffement de l'enroulement statorique dû au courant de tension assignée et à vide dans le stator et à la perte de tension assignée dans le fer ainsi qu'aux pertes par frottement et par ventilation.

Il convient de noter que pour les grands moteurs à induction il peut y avoir des cas où l'essai m est impossible à réaliser avec un glissement inférieur au glissement de décrochage; dans ces cas, le fonctionnement au-dessus du glissement de décrochage est une alternative. Pour mesurer l'échauffement de l'enroulement statorique par variation de résistance lorsque la machine est à vide, il convient d'utiliser un moyen pour arrêter rapidement le moteur ou de mesurer la résistance directement sous charge.

Cette méthode suppose que le refroidissement reste inchangé pour chaque essai, ce qui implique que la vitesse reste également virtuellement inchangée.

Il est possible de déterminer la grandeur $\Delta\theta_{1n}$ avec une exactitude suffisante en utilisant l'équation suivante:

$$\Delta\theta_{1n} = \Delta\theta_{1o} P_{1n} / P_{1o}$$

L'application de cette relation permet d'économiser un essai thermique complet à tension réduite et à vide comme pour les conditions d'essai n. Il convient, pour des raisons pratiques, d'envisager cette alternative.

L'exactitude de la détermination des échauffements est entre $\gamma = -10$ et $\gamma = +6$ % pour tous les types et toutes les caractéristiques assignées des machines. Il est préférable d'utiliser cette méthode pour les moteurs à induction à cage pour lesquels l'exactitude peut être estimée à $\gamma = \pm 3$ %.

Les résultats peuvent être analysés au moyen de calculs ou graphiquement de la manière décrite ci-dessous.

6 Superposition methods for induction motors

6.1 Method of reduced voltage and rated current

This method comprises a series of three tests. The method requires a variable-voltage supply at rated frequency and either a loading generator, or braking equipment with the rating much less than the rating of the test motor. For each condition, the voltage, current, stator winding losses, and stator winding temperature rise are measured. The test conditions are as follows:

Test m: reduced voltage, with the motor loaded to give rated current, giving V_m , I_m , P_{1m} and $\Delta\theta_{1m}$

Test n: the same reduced voltage, but on no load, giving V_n , I_n , P_{1n} and $\Delta\theta_{1n}$

Test o: rated voltage on no load, giving V_o , I_o , P_{1o} and $\Delta\theta_{1o}$

In these tests

$\Delta\theta_{1m}$ is the stator winding temperature rise due to rated stator current, quasi rated rotor current and reduced-voltage no-load iron loss and friction and windage losses;

$\Delta\theta_{1n}$ is the stator winding temperature rise due to reduced stator current and reduced-voltage iron loss and friction and windage losses;

$\Delta\theta_{1o}$ is the stator winding temperature rise due to rated-voltage no-load stator current and rated-voltage iron loss and friction and windage losses

It should be noted that with large induction motors there may be cases when test m is not practicable with a slip below the pull-out slip; in such cases, operation above the pull-out slip is an alternative. To measure the stator winding temperature rise by resistance when the machine is on no load, some means of rapidly stopping the motor should be employed when shutting down the motor, or resistance should be measured direct under load.

The method assumes that the cooling is unchanged for each test, which implies that the speed is also virtually unchanged.

The quantity $\Delta\theta_{1n}$ can be determined with sufficient accuracy by using the following equation:

$$\Delta\theta_{1n} = \Delta\theta_{1o} P_{1n} / P_{1o}$$

By applying this relation a complete thermal test at reduced voltage, no load, as for test condition n, can be saved. This should be taken up as an alternative for practical reasons.

The accuracy of determining temperature rises is within $\gamma = -10\%$ and $\gamma = +6\%$ for all types and ratings of machines. The method is preferable for squirrel-cage induction motors where the accuracy can be estimated within $\gamma = \pm 3\%$.

The results can be analysed either by means of calculation or by the use of a graph, as described below.

6.1.1 Détermination de l'échauffement par la méthode de calcul

La méthode de calcul suppose que l'échauffement de l'enroulement statorique, dans le cas de conducteurs en cuivre, au courant assigné pour toute charge, est une fonction linéaire de la manière suivante:

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_{1p} + K_{11}^* P_1$$

où

$\Delta\theta_{1p}$ est l'échauffement théorique du stator qui serait observé à la tension assignée et avec un courant statorique nul (en d'autres termes, l'échauffement dû uniquement à la perte dans le fer et aux pertes par frottement et par ventilation);

P_1 est la perte dans l'enroulement statorique à la charge donnée;

K_{11}^* est le coefficient de transfert de chaleur du stator dû à la perte dans l'enroulement statorique, la perte dans l'enroulement rotorique et la perte supplémentaire (voir 8.3 de la CEI 60034-2).

Le coefficient K_{11}^* peut être déterminé à partir des essais normaux de 6.1 ci-dessus en utilisant l'expression

$$K_{11}^* = \frac{\Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1n}}{P_{1m} - P_{1n}}$$

en d'autres termes, le rapport de l'augmentation de l'échauffement statorique dû à la variation du courant statorique entre les essais m et n (avec des pertes constantes dans le fer) à l'augmentation des pertes dans le stator dans les deux essais.

L'échauffement théorique du stator dû à la perte dans le fer et aux pertes par frottement et par ventilation $\Delta\theta_{1p}$ peut être déterminé par l'expression:

$$\Delta\theta_{1p} = \Delta\theta_{10} - K_{11}^* P_{10}$$

en d'autres termes, l'échauffement dû à la perte dans l'enroulement statorique et à la perte dans le fer moins l'échauffement dû à la perte dans l'enroulement statorique.

L'échauffement de l'enroulement statorique, dans le cas de conducteurs en cuivre, au courant assigné et à la tension assignée peut être déterminé de la manière suivante:

$$\Delta\theta_{1N} = \frac{\Delta\theta_{10} - K_{11}^* P_{10} + K_{11}^* P_{1N} (\theta_A) (235 + \theta_{AN}) / (235 + \theta_A)}{1 - K_{11}^* P_{1N} (\theta_A) / (235 + \theta_A)}$$

où

θ_A est la température ambiante à la détermination de $P_{1N}(\theta_A)$;

θ_{AN} est la température ambiante de référence;

235 est le coefficient de température pour les conducteurs en cuivre.

Les échauffements de l'enroulement rotorique et du fer statorique peuvent être déterminés de manière semblable en utilisant les valeurs mesurées des pertes et des échauffements de ces composants pour chaque essai.

6.1.1 Determination of temperature rise by calculation method

The calculation method assumes that the stator winding temperature rise, in the case of copper conductors, at rated current for any load is linearly dependent as follows:

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_{1p} + K_{11}^* P_1$$

where

$\Delta\theta_{1p}$ is the theoretical stator temperature rise that would occur at rated voltage and zero stator current (i.e. the rise due to the iron loss and friction and windage loss alone);

P_1 is the stator winding loss at the particular load;

K_{11}^* is the coefficient of stator heat transfer due to stator winding loss, rotor winding loss and additional loss (see 8.3 of IEC 60034-2).

The coefficient K_{11}^* can be found from the normal tests in 6.1 using the expression

$$K_{11}^* = \frac{\Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1n}}{P_{1m} - P_{1n}}$$

i.e. the ratio of the increase in stator temperature rise due to the change in stator current between tests m and n (with constant iron losses), to the increase in stator losses in the two tests.

The theoretical stator temperature rise due to iron loss and friction and windage loss $\Delta\theta_{1p}$ can be found from the expression:

$$\Delta\theta_{1p} = \Delta\theta_{10} - K_{11}^* P_{10}$$

i.e. the rise due to stator winding loss and iron loss minus the rise due to the stator winding loss.

The stator winding temperature rise, in the case of copper conductors, at rated current and rated voltage can then be determined as follows:

$$\Delta\theta_{1N} = \frac{\Delta\theta_{10} - K_{11}^* P_{10} + K_{11}^* P_{1N} (\theta_A)(235 + \theta_{AN}) / (235 + \theta_A)}{1 - K_{11}^* P_{1N} (\theta_A) / (235 + \theta_A)}$$

where

θ_A is the ambient temperature at the determination of $P_{1N}(\theta_A)$;

θ_{AN} is the reference ambient temperature;

235 is the temperature coefficient for the conductor material being copper.

The temperature rises of the rotor winding and the stator core can be found in a similar manner, using measured values of losses and temperature rises for these components for each test.

6.1.2 Détermination de l'échauffement par la méthode graphique

La méthode graphique est fondée sur les suppositions suivantes.

- a) Les pertes en charge dépendent uniquement du courant et les pertes à vide dépendent uniquement de la tension.
- b) Les échauffements peuvent être additionnés, c'est-à-dire que les effets du rayonnement sont négligeables et que les coefficients de transfert de chaleur sont indépendants de la température.
- c) La perte en charge vagabonde en fonction de la charge dépend uniquement du courant. Dans la pratique, ces pertes dépendent en partie également de la tension.

Ces suppositions sont fondamentalement les mêmes que celles de la méthode de calcul décrite en 6.1.1 ci-dessus. Un graphique des échauffements mesurés dans les trois essais de 6.1 peut être tracé en fonction du carré du courant statorique comme illustré à la figure 1. Une ligne passant par les deux points à la tension réduite ($\Delta\theta_{1m}$ et $\Delta\theta_{1n}$) et une ligne parallèle passant par $\Delta\theta_{10}$ peuvent être tracées. L'échauffement à la charge assignée $\Delta\theta_{1N}$ est obtenu comme illustré à la figure 1.

Si les courants statoriques des essais n et o sont suffisamment faibles (et pas trop différents) par rapport au courant assigné, l'échauffement statorique à tension et charge assignées est donné par

$$\Delta\theta_{1N} = \Delta\theta_{1m} + \Delta\theta_{10} - \Delta\theta_{1n}$$

6.2 Méthode à tension assignée et à courant réduit

Cette méthode consiste en une série de deux essais. Une génératrice de charge ou un dispositif de freinage de caractéristiques assignées inférieures aux caractéristiques assignées du moteur soumis à l'essai est nécessaire pour cette méthode. La méthode de charge peut être la méthode de charge réelle ou une méthode de charge équivalente.

Les échauffements et les courants statoriques sont mesurés dans deux conditions d'essai de la manière suivante.

Essai p: Le moteur est entraîné à une charge réduite et à tension et fréquence assignées et l'échauffement de l'enroulement statorique $\Delta\theta'_{1m}$ et le courant statorique I_1' sont mesurés. Il est souhaitable que I_1' ne soit pas inférieur à 70 % du courant assigné statorique.

Essai o: Le moteur est entraîné à vide à tension et fréquence assignées et l'échauffement $\Delta\theta_{10}$ et le courant statorique I_0 sont mesurés.

L'échauffement à pleine charge est calculé par l'équation:

$$\Delta\theta_{1N} = \frac{\frac{\Delta\theta'_{1m} - \Delta\theta_{10}}{I_1'^2 - I_0^2} \times (I_N^2 \times \frac{235 + \theta_{AN}}{235 + \theta_m} - I_1'^2) + \Delta\theta'_{1m}}{1 - \frac{\Delta\theta'_{1m} - \Delta\theta_{10}}{I_1'^2 - I_0^2} \times \frac{I_N^2}{235 + \theta_m}}$$

où I_N est le courant assigné statorique.

L'exactitude de la détermination des échauffements est de $\gamma = (-5 \pm 6) \%$ pour tous les types et toutes les caractéristiques assignées des machines. Il est préférable d'utiliser cette méthode pour les moteurs à induction à rotor bobiné haute tension pour lesquels l'exactitude peut être estimée à $\gamma = \pm 1 \%$.

6.1.2 Determination of temperature rise by graphical method

The graphical method is based on the following assumptions.

- The load losses are dependent solely on current, and the no-load losses are dependent solely on voltage.
- The temperature rises can be added, i.e. the effect of radiation is negligible, and the heat transfer coefficients are independent of temperature.
- The load-dependent stray-load loss depends on the current only. In practice, these losses are also partly voltage dependent.

These assumptions are fundamentally the same as those in the calculation method described in 6.1.1 above. A graph can be drawn of the measured temperature rises from the three tests in 6.1 plotted against the square of the stator current as shown in figure 1. A line can be drawn through the two points at the reduced voltage ($\Delta\theta_{1m}$ and $\Delta\theta_{1n}$) and a line parallel to this can be drawn through $\Delta\theta_{10}$. The temperature rise at rated load $\Delta\theta_{1N}$ is obtained as shown in figure 1.

If the stator currents for tests n and o are sufficiently small (and not too dissimilar) compared with the rated current, then the stator temperature rise at rated voltage rated load is given by

$$\Delta\theta_{1N} = \Delta\theta_{1m} + \Delta\theta_{10} - \Delta\theta_{1n}$$

6.2 Method of rated voltage and reduced current

This method comprises a series of two tests. The method requires a loading generator or a braking equipment with a rating less than the rating of the test motor. The loading method may be either the actual loading method or equivalent loading method.

Temperature rises and stator currents are measured at two test conditions as follows.

Test p: The motor is driven at a reduced load at rated voltage and frequency and the temperature rise of the stator winding $\Delta\theta'_{1m}$ and stator current I'_1 are measured. It is preferable that I'_1 is not less than 70 % of rated stator current.

Test o: The motor is driven at no-load rated voltage and frequency, and the temperature rise $\Delta\theta_{10}$ and the stator current I_0 are measured.

The full-load temperature rise is calculated from the equation:

$$\Delta\theta_{1N} = \frac{\frac{\Delta\theta'_{1m} - \Delta\theta_{10}}{I'^2_1 - I^2_0} \times (I_N^2 \times \frac{235 + \theta_{AN}}{235 + \theta_m} - I'^2_1) + \Delta\theta'_{1m}}{1 - \frac{\Delta\theta'_{1m} - \Delta\theta_{10}}{I'^2_1 - I^2_0} \times \frac{I_N^2}{235 + \theta_m}}$$

where I_N is the rated stator current.

The accuracy of determining temperature rises is $\gamma = (-5 \pm 6) \%$ for all types and ratings of machines. The method is preferable for high-voltage wound rotor induction motors where the accuracy can be estimated within $\gamma = \pm 1 \%$.

6.3 Méthode pour les moteurs à induction à rotor bobiné

La méthode consiste en deux essais réalisés de la manière suivante.

- Essai a: Court-circuiter le rotor et faire fonctionner le moteur à vide et à la tension assignée. L'échauffement statorique est principalement déterminé par la perte assignée dans le fer et la perte assignée par frottement et par ventilation.
- Essai b: Exciter le rotor, court-circuiter les bornes du stator, faire fonctionner le moteur à la vitesse assignée et corriger le courant rotorique pour obtenir le courant assigné statorique. L'échauffement du stator est principalement déterminé par la perte assignée par effet Joule statorique. La perte dans le fer est faible puisque l'enroulement statorique est court-circuité et que la tension est faible. La perte par frottement et par ventilation est normale.

Les deux échauffements mesurés du stator sont additionnés pour donner l'échauffement qui serait observé à la tension assignée et au courant assigné. L'échauffement calculé du stator sera supérieur à la valeur vraie en raison des faibles effets sur le stator de la perte à vide dans le cuivre dans le premier essai et de la perte par frottement et par ventilation dans le second essai.

Les données d'essai de comparaison destinées à déterminer les échauffements selon cette méthode sont inconnues. Les experts estiment que l'exactitude de cette méthode est de l'ordre de $\gamma = \pm 10 \%$.

7 Méthodes par superposition pour machines synchrones

7.1 Méthode de circuit ouvert, de court-circuit et d'excitation nulle

Dans cette méthode, un moteur auxiliaire entraîne la machine synchrone à la vitesse assignée. Les essais sont réalisés aux points de fonctionnement suivants:

- Essai m: enroulement d'induit en court-circuit, courant d'excitation réglé pour donner le courant assigné d'induit;
- Essai n: enroulement d'induit en circuit ouvert et courant d'excitation réglé pour donner la tension d'induit assignée;
- Essai o: enroulement d'induit en circuit ouvert et courant d'excitation nul.

Pour chaque condition, l'échauffement de l'enroulement statorique est déterminé pour donner les valeurs $\Delta\theta_{1m}$, $\Delta\theta_{1n}$ et $\Delta\theta_{1o}$. L'échauffement à la vitesse assignée, à la tension assignée et au courant assigné est déterminé par l'expression

$$\Delta\theta_{1N} = (\Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1o}) + (\theta_{1n} - \Delta\theta_{1o}) + \Delta\theta_{1o}$$

(c'est-à-dire $(\Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1o})$ est l'échauffement dû à la perte par effet Joule; $(\theta_{1n} - \Delta\theta_{1o})$ est l'échauffement dû à la perte dans le fer; $\Delta\theta_{1o}$ est l'échauffement dû aux pertes par frottement et par ventilation).

L'exactitude des échauffements de l'enroulement d'induit des machines synchrones, à l'exception des grands turbo-générateurs synchrones de puissance, est d'environ $\gamma = -10 \%$ des valeurs réelles.

Il est en même temps possible de déterminer l'échauffement de l'enroulement d'excitation dans les conditions assignées si l'échauffement d'excitation est mesuré pour chacune des trois conditions d'essai. Les échauffements peuvent être déterminés en mesurant la résistance de champ lors de l'arrêt de la machine après chaque essai. Il est possible d'augmenter l'exactitude de cette méthode pour l'excitation en réalisant un quatrième essai soit avec l'enroulement statorique en circuit ouvert et le courant d'excitation réglé sur la valeur assignée donnant une surtension statorique ou avec l'enroulement statorique en court-circuit et le courant d'induit supérieur au courant assigné. L'échauffement mesuré de l'un de ces essais remplace l'échauffement de l'essai n ou de l'essai m. Il convient d'obtenir l'accord du fabricant pour réaliser cet essai car l'enroulement d'induit peut être endommagé.

6.3 Method for wound-rotor induction motors

The method comprises two tests as follows.

Test a: The rotor is short-circuited and the motor is run on no load at rated voltage. The stator temperature rise is primarily determined by the rated iron loss and rated friction and windage loss.

Test b: The rotor is excited, the stator terminals are short-circuited, the motor is driven at rated speed, and the rotor current is adjusted to obtain rated stator current. The stator temperature rise is primarily determined by the rated stator I^2R loss. The iron loss is low as the stator winding is short-circuited and the voltage is low. The friction and windage loss is normal.

The two measured stator temperature rises are added together to give the rise that would occur with rated voltage and rated current. The deduced stator temperature rise will be higher than the true value, due to the small effects on the stator of the no-load stator copper loss in the first test and the friction and windage loss in the second test.

The comparative test data for determining temperature rises by this method are unknown. The experts estimate the accuracy of this method to be within $\gamma = \pm 10\%$.

7 Superposition methods for synchronous machines

7.1 Method of open circuit, short circuit, zero excitation

In this method, the synchronous machine is driven at rated speed by an auxiliary motor. Tests are undertaken at the following operating points:

Test m: armature winding short-circuited, and field current set to give rated armature current;

Test n: armature winding open-circuited, and field current set to give rated armature voltage;

Test o: armature winding open-circuited, and zero field current.

For each condition, the temperature rise of the stator winding is determined to give values $\Delta\theta_{1m}$, $\Delta\theta_{1n}$ and $\Delta\theta_{1o}$. The temperature rise at rated speed, voltage and current is determined from the expression

$$\Delta\theta_{1N} = (\Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1o}) + (\Delta\theta_{1n} - \Delta\theta_{1o}) + \Delta\theta_{1o}$$

(i.e. $(\Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1o})$ is the rise due to I^2R loss; $(\Delta\theta_{1n} - \Delta\theta_{1o})$ is the rise due to iron loss; $\Delta\theta_{1o}$ is the rise due to friction and windage loss).

The accuracy of temperature rises of the armature winding of synchronous machines, except large power synchronous turbo-generators, are about $\gamma = -10\%$ of the actual ones.

At the same time, the temperature rise of the field winding at rated conditions can be determined if the field temperature rise is measured for each of the three test conditions. The temperature rises can be determined by measuring the field resistance on shutdown of the machine after each test. The accuracy of this method for the field is increased if a fourth test is made either with the stator winding open-circuited and the field current set to the rated value giving a stator over-voltage or with the stator winding short-circuited and the armature current greater than the rated current. The measured temperature rise from one of these tests would replace that from test n or from test m respectively. The manufacturer's approval should be obtained for this test as armature winding damage could result.

Il est également possible d'utiliser la machine comme compensateur synchrone au courant assigné d'excitation et à un courant statorique intermédiaire jusqu'à ce que la tension d'excitation soit constante. Le rapport de la tension d'excitation (ajustée par rapport aux effets de contact par balai) au courant d'excitation donne la résistance de champ chaud à partir de laquelle il est possible de calculer l'échauffement d'excitation.

Il est possible d'utiliser une méthode graphique pour obtenir l'échauffement d'excitation à charge assignée si la perte d'excitation, P_{ft} , pour chaque essai est calculée à partir de $I_{ft}^2 R_{ft}$, où P_{ft} , I_{ft} , et R_{ft} , sont les valeurs d'essai de la perte, du courant et de la résistance de champ. La courbe de l'échauffement d'excitation en fonction de la perte d'excitation fournie à la figure 2 pour les trois conditions d'essai est approximativement une ligne droite. Une deuxième ligne droite est ensuite tracée qui indique les variations de la perte d'excitation en fonction du courant assigné I_{fN} , lorsque la résistance de champ augmente en fonction de la température par rapport à la valeur à température ambiante. L'intersection des deux lignes donne l'échauffement d'excitation à la charge assignée.

7.2 Méthode de charge à facteur de puissance nul et à circuit ouvert

Dans cette méthode, la machine est à nouveau entraînée à la vitesse assignée par un moteur auxiliaire. Des essais sont réalisés aux points de fonctionnement suivants:

Essai m: courant assigné d'excitation, courant assigné d'induit, facteur de puissance nul, tension réduite aux bornes du stator;

Essai n: stator en circuit ouvert, avec une tension aux bornes égale à la force électromotrice induite par le stator dans l'essai m, en d'autres termes:

$$V_n = V_m + I_m X_L$$

où X_L est la réactance de fuite calculée du stator.

Essai o: stator en circuit ouvert, avec une tension aux bornes égale à la force électromotrice induite à la charge assignée, en d'autres termes

$$V_o = \sqrt{(1 + \sin \phi \times X_L)^2 + (\cos \phi \times X_L)^2} \times I_N$$

où

$\cos \phi$ est le facteur de puissance assigné;

V_N est la tension d'induit assignée;

I_N est le courant d'induit assigné.

L'échauffement de l'enroulement statorique est donné par $\Delta\theta_{1N} = \Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1n} + \Delta\theta_{1o}$ où $\Delta\theta_{1m}$, $\Delta\theta_{1n}$ et $\Delta\theta_{1o}$ sont les échauffements statoriques mesurés respectivement dans les essais m, n et o.

$\Delta\theta_{1m}$ est l'échauffement de l'enroulement d'induit dû au courant assigné d'excitation, au courant assigné d'induit, à la perte par frottement et par ventilation à la vitesse assignée et à la faible perte dans le fer.

$\Delta\theta_{1n}$ est l'échauffement de l'enroulement d'induit dû au courant d'excitation en circuit ouvert, à la tension de phase V_n , à la perte par frottement et par ventilation à la vitesse assignée et à la faible perte dans le fer.

$\Delta\theta_{1o}$ est l'échauffement de l'enroulement d'induit dû au courant d'excitation à la tension de phase en circuit ouvert V_o , à la perte par frottement et par ventilation à la vitesse assignée et à la perte assignée dans le fer.

L'exactitude de l'échauffement obtenu pour l'enroulement d'induit des machines synchrones d'une puissance assignée inférieure ou égale à 500 kVA est de l'ordre de $\gamma = -10 \%$.

L'échauffement de l'enroulement d'excitation est pris comme la valeur mesurée dans l'essai m.

Alternatively, the machine may be operated as a synchronous condenser at rated field current and at some intermediate stator current until the field voltage is constant. The ratio of the field voltage (adjusted for brush contact effects) to the field current gives the hot field resistance from which the field temperature rise can be calculated.

A graphical method can be used to obtain the field temperature rise at rated load if the field loss, P_{ft} , for each test is calculated from $I_{ft}^2 R_{ft}$, where P_{ft} , I_{ft} , and R_{ft} , are the test values of the field loss, current and resistance respectively. The graphical plot of field temperature rise against field loss in figure 2 for the three test conditions approximates a straight line. A second straight line is then plotted, showing the variation of the field loss with rated current I_{fN} , as the field resistance increases with temperature from the value at ambient temperature. The intersection of the two lines gives the temperature rise of the field at rated load.

7.2 Method of zero power factor and open circuit loading

In this method, the machine is again driven at rated speed by an auxiliary motor. Tests are undertaken at the following operating points:

Test m: rated field current, rated armature current, zero power factor, reduced stator terminal voltage;

Test n: stator open-circuited, with terminal voltage equal to stator-induced e.m.f. in test m, i.e.:

$$V_n = V_m + I_m X_L$$

where X_L is the calculated stator leakage reactance;

Test o: stator open-circuited, with terminal voltage equal to induced e.m.f. at rated load, i.e.:

$$V_o = \sqrt{(1 + \sin \phi \times X_L)^2 + (\cos \phi \times X_L)^2} \times I_N$$

where

$\cos \phi$ is the rated power factor;

V_N is the rated armature voltage;

I_N is the rated armature current.

The stator winding temperature rise is given by $\Delta\theta_{1N} = \Delta\theta_{1m} - \Delta\theta_{1n} + \Delta\theta_{1o}$ where $\Delta\theta_{1m}$, $\Delta\theta_{1n}$ and $\Delta\theta_{1o}$ are the stator temperature rises measured in tests m, n and o, respectively.

$\Delta\theta_{1m}$ is the armature winding temperature rise due to rated field current, rated armature current, friction and windage loss at rated speed, and low iron loss.

$\Delta\theta_{1n}$ is the armature winding temperature rise due to field current at open-circuit, phase voltage V_n , friction and windage loss at rated speed, and low iron loss.

$\Delta\theta_{1o}$ is the armature winding temperature rise due to field current at open-circuit phase voltage V_o , friction and windage loss at rated speed, and rated iron loss.

The temperature rise accuracy obtained for the armature winding of synchronous machines with rating up to 500 kVA is within $\gamma = -10$ %.

The field winding temperature-rise is taken as the value measured in test m.

8 Méthode par superposition pour les machines à courant continu

La plupart des essais sur de grandes machines à courant continu sont réalisés selon la méthode en opposition. Une seule méthode d'essai indirect est disponible pour les machines à courant continu. Dans cette méthode par superposition, la machine est entraînée à la vitesse assignée par un moteur auxiliaire dont les caractéristiques assignées sont généralement inférieures à 20 % de celles de la machine à soumettre à l'essai. Les essais sont réalisés aux trois points de fonctionnement suivants:

Essai m: Induit en court-circuit et courant d'excitation réglé pour donner le courant d'induit assigné;

Essai n: Induit en circuit ouvert et courant d'excitation réglé pour donner la tension d'induit assignée;

Essai o: Induit en circuit ouvert avec courant d'excitation nul.

Lorsque les deux essais à circuit ouvert sont réalisés sur des machines de puissance assignée inférieure ou égale à 1 000 kW, il convient de relever les balais sauf lorsque la tension statorique est mesurée. Pour les machines de puissance assignée supérieure à 1 000 kW, les balais peuvent rester en place puisque la perte par frottement des balais sera faible par rapport aux autres pertes.

Le troisième essai n'est généralement nécessaire que sur les machines dont le rotor a une vitesse périphérique importante (>30 m/s) et pour lesquelles la perte par ventilation est importante.

Pour chaque condition, l'échauffement de l'enroulement d'induit est déterminé pour donner les valeurs $\Delta\theta_{1m}$, $\Delta\theta_{1n}$ et $\Delta\theta_{1o}$. L'échauffement à la vitesse assignée, à la tension assignée et au courant assigné est déterminé par l'expression

$$\Delta\theta_{1N} = \Delta\theta_{1m} + \Delta\theta_{1n} - \Delta\theta_{1o}$$

(en d'autres termes, l'échauffement est égal à l'échauffement dû aux pertes par effet Joule d'induit et par frottement et par ventilation avec une perte négligeable dans le fer et une perte par effet Joule d'excitation négligeable plus l'échauffement dû à la perte dans le fer et à la perte par frottement et par ventilation avec une perte par effet Joule d'induit nulle et une perte assignée par effet Joule d'excitation, moins l'échauffement dû à la perte par frottement et par ventilation).

Pour l'enroulement d'induit, l'exactitude obtenue est d'environ $\gamma = \pm 10 \%$.

9 Principe d'essais de charge équivalente

9.1 Généralités

Contrairement aux concepts à plusieurs essais des méthodes par superposition, un essai de charge équivalente est conçu pour permettre de déterminer l'échauffement d'un composant donné (pratiquement exclusivement l'enroulement statorique) à la charge assignée de manière expérimentale à partir d'un essai unique réalisé dans des conditions différentes de la charge assignée. Le but est de reproduire la distribution des pertes en charge assignée dans le moteur, notamment les pertes dans le composant considéré, dans ces conditions d'essai de charge équivalente. Pour l'enroulement statorique, ceci implique de créer le courant efficace à pleine charge dans l'enroulement.

La charge équivalente est également utilisée dans le cas de machines spéciales à extrémités d'arbre inaccessibles, de machines à haute vitesse ou de machines pour lesquelles l'accouplement des extrémités d'arbre avec la machine de charge nécessite des accouplements spéciaux et onéreux (par exemple des arbres cannelés, etc.).

8 Superposition method for d.c. machines

Most tests on larger d.c. machines are carried out by the back-to-back method. Only one indirect test method is available for d.c. machines. In this superposition method, the d.c. machine is driven at rated speed by an auxiliary motor, whose rating is usually less than 20 % of the machine to be tested. Tests are undertaken at the following three operating points:

Test m: armature short-circuited, and field current set to give rated armature current,

Test n: armature open-circuited, and field current set to give rated armature voltage,

Test o: armature open-circuited, with zero field current.

For the two open-circuit tests on machines rated at and below 1 000 kW, the brushes should be lifted except when the stator voltage is being measured. For machines rated above 1 000 kW, the brushes may be left in place as the brush frictional loss will be small compared with other losses.

The third test is usually only necessary for machines with high rotor surface speed (>30 m/s) where the windage loss is significant.

For each condition, the temperature rise of the armature winding is determined to give values $\Delta\theta_{1m}$, $\Delta\theta_{1n}$ and $\Delta\theta_{1o}$. The temperature rise at rated speed, voltage and current is determined from the expression

$$\Delta\theta_{1N} = \Delta\theta_{1m} + \Delta\theta_{1n} - \Delta\theta_{1o}$$

(i.e. the temperature rise is equal to the rise due to armature I^2R and friction and windage loss with negligible iron loss and negligible field I^2R loss plus the rise due to iron loss and friction and windage loss with zero armature I^2R loss and rated field I^2R loss, minus the rise due to friction and windage loss).

For the armature winding the accuracy obtained is about $\gamma = \pm 10 \%$.

9 Principle of equivalent load tests

9.1 General

In contrast with the multi-test concept of the superposition methods, an equivalent load test is designed to allow the temperature rise of the chosen component (almost exclusively the stator winding) at rated load to be determined experimentally from a single test at conditions other than rated load. The intention is to replicate the rated-load loss distribution in the motor, but particularly the loss in the relevant component, at this equivalent load test condition. For the stator winding, this implies creating the effective (r.m.s.) full-load current in the winding.

The equivalent loading is used also in the cases of special machines with inaccessible free shaft ends, high-speed machines or machines where the coupling of the shaft ends with the loading machine requires special and expensive couplings to be made (for example, grooved shaft, etc.).

Pour que l'essai soit profitable, il convient que le matériel utilisé pour l'essai soit sensiblement moins compliqué et moins onéreux que le matériel qui serait nécessaire pour un essai direct à pleine charge. Il convient également que la consommation électrique soit sensiblement moins importante. Il convient dans la mesure du possible de réaliser l'essai avec l'arbre du moteur libre et non accouplé afin de simplifier l'opération et économiser le temps nécessaire à l'alignement de la machine soumise à l'essai avec une charge mécanique ou un moteur d'entraînement.

Les méthodes d'essai décrites dans les articles 10 et 11 permettent d'atteindre ces objectifs à différents niveaux.

9.2 Echauffement admissible lors des essais de charge équivalente.

Lors de la détermination des échauffements des pièces constitutives de la machine au moyen d'essais de charge équivalente, les écarts par rapport aux résultats obtenus lors des essais à charge assignée sont toujours disponibles (voir la présente norme). Dans le cas d'une erreur négative, les échauffements admissibles spécifiés dans la CEI 60034-1 doivent être corrigés.

Si l'exactitude $\gamma\%$ pour les résultats obtenus lors des essais de charge équivalente est une valeur négative, les échauffements possibles en fonctionnement à charge assignée sont généralement égaux à:

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta_{N\text{equiv}} + \Delta\theta_{N\text{equiv}} \frac{|\gamma|}{100}$$

Pour les erreurs négatives, les échauffements admissibles spécifiés dans la CEI 60034-1 doivent par conséquent être multipliés par le facteur de correction σ suivant:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{|\gamma|}{100}}$$

10 Essais de charge équivalente pour les moteurs à induction

10.1 Essai de court-circuit direct

Le moteur à l'essai est entraîné à la vitesse assignée par une machine auxiliaire et est alimenté par une alimentation à une fréquence d'environ 80 % ou 120 % de la fréquence assignée du moteur. La tension de cette alimentation est ajustée jusqu'à ce que le courant dans le stator du moteur à l'essai soit égal à la valeur assignée. Lorsque la fréquence d'alimentation est d'environ 80 % de la fréquence assignée du moteur, la machine à l'essai fournit une puissance électrique puisqu'elle fonctionne comme une génératrice à induction à glissement négatif. Lorsque la fréquence d'alimentation est d'environ 120 % de la fréquence assignée du moteur, la machine auxiliaire fournit une puissance électrique, puisque le moteur fonctionne comme un moteur à induction à glissement positif.

Par rapport à un essai direct à pleine charge, la perte de fréquence fondamentale par effet Joule du stator reste inchangée, les pertes par frottement et par ventilation restent inchangées, la perte de fréquence fondamentale dans le fer statorique est plus faible, le courant de barre du rotor et les pertes dans le cuivre du rotor ainsi que les pertes de haute fréquence dans le fer des dents du stator sont plus élevées.

For the test to be advantageous, the equipment to be used in the test should be significantly less complex and expensive than that which would be required for a direct full-load test. Also, the demands on the electrical supply should be much less. Ideally, the motor should be tested with a free uncoupled shaft, so that the complexity and time involved in lining up the test machine with a mechanical load or a driving motor is avoided.

The test methods described in clauses 10 and 11 achieve these aims to varying degrees.

9.2 Permissible temperature rise at equivalent load tests

When determining the temperature rises of the machine design parts at equivalent load tests, the variations from the results obtained at the rated load test are always available (see this standard). In the case of negative error, the permissible temperature rises given in IEC 60034-1 shall be corrected.

If the accuracy γ % for the results obtained at the equivalent load tests is a negative value, the possible temperature rises during the operation at the rated load should be equal to

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta_{Nequiv} + \Delta\theta_{Nequiv} \frac{|\gamma|}{100}$$

Consequently, for negative errors the permissible temperature rises given in IEC 60034-1 shall be multiplied by the correction factor σ being as follows:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \frac{|\gamma|}{100}}$$

10 Equivalent load tests for induction motors

10.1 Forward short-circuit test

The motor under test is driven at rated speed by an auxiliary machine and is fed from a supply with a frequency of about 80 % or about 120 % of the motor rated frequency. The voltage of this supply is adjusted until the current in the test motor stator equals the rated value. When the supply frequency is about 80 % of the motor rated frequency, an electrical output is obtained from the test machine as it operates as an induction generator at negative slip. When the supply frequency is about 120 % of the motor rated frequency, an electrical output is obtained from the auxiliary machine as the motor operates as an induction motor at positive slip.

Compared with a direct full-load test, the stator fundamental-frequency I^2R loss is the same, the friction and windage losses are the same, the fundamental-frequency stator iron loss is lower, and the rotor bar current and rotor copper losses as well as the high-frequency stator-tooth iron losses are higher.

La réduction de la perte de fréquence fondamentale dans le fer n'est généralement pas compensée correctement par l'augmentation de la perte de haute fréquence et il convient par conséquent de compléter l'essai par deux essais à vide à la fréquence d'alimentation assignée, l'un à la tension d'alimentation assignée et l'autre à la tension la plus basse appliquée pendant l'essai de court-circuit direct. La différence entre les échauffements statoriques lors des deux essais à vide est additionnée à l'échauffement mesuré pendant l'essai de court-circuit direct. Afin de déterminer si la perte totale est ou n'est pas égale à la perte qui serait observée lors d'un essai en charge directe, il est nécessaire de mesurer la puissance absorbée et la puissance utile du moteur ou de réaliser des calculs de perte pour les conditions observées dans le moteur pendant l'essai de court-circuit direct.

L'essai peut être appliqué de manière utile aux machines de 60 Hz de toutes caractéristiques assignées lorsque seules des alimentations de 50 Hz sont disponibles et à des machines de 50 Hz de toutes caractéristiques assignées lorsque seules des alimentations de 60 Hz sont disponibles. Il est possible dans ce cas d'obtenir la vitesse correcte de la machine auxiliaire en utilisant une boîte d'engrenages, un entraînement à courant alternatif à vitesse variable ou un moteur à courant continu.

L'exactitude de la détermination des échauffements est de $\gamma = \pm 10\%$ pour tous les types et toutes les caractéristiques assignées des machines.

Il est préférable d'utiliser la méthode pour les moteurs à induction à rotor bobiné à basse tension pour lesquels l'exactitude peut être estimée à $\gamma = \pm 3\%$.

En raison de la redistribution des pertes dans les différentes pièces de la machine, il convient de surveiller soigneusement les températures dans toute la machine. Si la température atteint des niveaux excessifs en un quelconque point de la machine, il convient d'interrompre l'essai.

10.2 Méthode de la fréquence modulée

Dans le présent essai, le moteur à induction est alimenté par une source de courant alternatif dont la fréquence est modulée autour d'une valeur moyenne, où

f est la fréquence moyenne (Hz);

δ est l'amplitude de la modulation de fréquence (Hz);

F est la fréquence de modulation (Hz);

Le moteur est soumis à une charge en raison des accélérations et décélérations répétées dues à l'augmentation et à la réduction répétée de la fréquence.

La source de l'alimentation modulée peut être une génératrice à courant alternatif à basse fréquence d'excitation, f_{ex} , où

$$f_{ex} = \delta \times \sin(2\pi Ft)$$

La fréquence de la puissance utile de la génératrice, f , est donnée par l'équation:

$$f = f_{rot} + f_{ex}$$

où f_{rot} est la fréquence déterminée par la rotation de l'arbre.

Generally, the reduction in the fundamental frequency iron loss is not adequately offset by the increase in the high-frequency loss, so the test should be supplemented by two no-load tests at rated supply frequency, one at rated supply voltage and the other at the lower voltage applied during the forward short-circuit test. The difference between the stator temperature rises on the two no-load tests is added to the temperature rise measured during the forward short-circuit test. In order to determine whether or not the total loss equals the loss that would occur in a direct-load test, it is necessary to measure the motor input and output powers or undertake loss calculations for the conditions existing in the motor during the forward short-circuit test.

The test can usefully be applied to 60 Hz machines of any rating where only 50 Hz supplies are available and to 50 Hz machines of any rating where only 60 Hz supplies are available. The correct speed of the auxiliary machine in this case could be achieved by using a gearbox, a variable-speed a.c. drive, or a d.c. motor.

The accuracy of determining temperature rises is $\gamma = \pm 10\%$ for all types and ratings of machines.

The method is preferable for wound rotor induction motors of low voltage where the accuracy can be estimated within $\gamma = \pm 3\%$.

Due to the significant redistribution of losses in the various component parts of the machine, the temperatures throughout the machine should be carefully monitored. If the temperature becomes excessive at any location, the test should be terminated.

10.2 Modulated frequency method

In this test, the induction motor is fed from an a.c. source, the frequency of which is modulated around a mean value, where

f is the mean frequency (Hz),

δ is the amplitude of frequency modulation (Hz);

F is the modulation frequency (Hz).

The motor is loaded due to the repetitive acceleration and deceleration as the frequency repeatedly increases and then decreases.

The source of the modulated supply can be an a.c. generator with low excitation frequency, f_{ex} , where:

$$f_{\text{ex}} = \delta \times \sin(2\pi Ft)$$

The generator output frequency, f , is given by the equation:

$$f = f_{\text{rot}} + f_{\text{ex}}$$

where f_{rot} is the frequency determined by the shaft rotation.

La valeur moyenne du couple est donnée par

$$T_{av} = 2J \times \delta_{\omega} \times F$$

où:

J = moment d'inertie du moteur

δ_{ω} = amplitude de la variation de pulsation

En supposant une modulation sinusoïdale, la valeur instantanée maximale du couple est donnée par:

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} T_{av}$$

Il convient que cette valeur soit inférieure au couple de décrochage de sorte que le moteur fonctionne dans la partie stable des caractéristiques de charge.

L'exactitude escomptée est d'environ $\gamma = \pm 10 \%$.¹⁾

Cette méthode convient tout particulièrement aux moteurs à inertie importante car plus l'inertie est grande moins il est nécessaire que l'amplitude et la fréquence de modulation soient importantes (généralement 1-2 Hz). Pour les moteurs à faible inertie, il peut être nécessaire d'ajouter de l'inertie sous la forme d'un volant.

Le moteur est démarré à la fréquence d'alimentation moyenne, f , et avec l'amplitude et le taux de modulation mis à zéro. L'amplitude et le taux de modulation sont ensuite augmentés jusqu'à ce que le courant statorique soit égal au courant assigné à pleine charge. Le courant d'excitation de la génératrice est ajusté pour donner la tension assignée statorique.

10.3 Injection de courant continu

Dans la présente méthode, le moteur à l'essai est raccordé à une génératrice source à courant alternatif et fonctionne à la tension assignée à vide. Pour cette méthode, il est nécessaire de monter le moteur et la génératrice en étoile et le point neutre doit être accessible tant sur le moteur que sur la génératrice. Une source d'alimentation peut être la génératrice avec un enroulement d'excitation multiphasé symétrique (ou le moteur à induction à rotor bobiné) excité par le courant multiphasé de basse fréquence à variation périodique f_{ex} . Une source de courant continu est ensuite branchée entre les deux points neutres comme illustré à la figure 3. La puissance de courant continu est ajustée jusqu'à ce que la valeur efficace du courant alternatif à vide plus le courant continu d'injection soit égale au courant à pleine charge du moteur. La génératrice source doit fournir la tension assignée et doit être capable de supporter le courant assigné.

Les données d'essai de comparaison destinées à déterminer les échauffements par cette méthode sont inconnues. Les experts estiment que l'exactitude de cette méthode est de l'ordre de $\gamma = \pm 10 \%$.

La source de courant continu est à l'origine d'un champ magnétique stationnaire dans l'espace et avec trois fois le nombre de pôles de l'enroulement statorique. Des pertes supplémentaires sont par conséquent observées dans le rotor en raison des courants et des flux qui sont créés par la rotation du rotor.

Les mesurages du courant sont réalisés en utilisant des transformateurs de courant qui relient deux lignes, l'une dans le sens «direct» et l'autre dans le sens «inverse» de manière à annuler le composant de courant continu.

¹⁾ Si les erreurs de l'opérateur et du matériel de commande et de mesure sont amplifiées.

The average value of torque is given by

$$T_{av} = 2J \times \delta_{\omega} \times F$$

where

J is the moment of inertia of the motor

δ_{ω} is the amplitude of angular frequency variation

Assuming sinusoidal modulation, the maximum instantaneous value of torque is given by:

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} T_{av}$$

This maximum value should be below the pull-out torque, so that the motor operates on the stable part of the load characteristic.

The expected accuracy is about $\gamma = \pm 10 \%$.¹⁾

This method is particularly appropriate for high-inertia motors, because the greater the inertia the smaller the required modulation amplitude and frequency (typically 1-2 Hz). For low-inertia motors, it may be necessary to add inertia in the form of a flywheel.

The motor is started up with the supply of mean frequency, f , and with the modulation amplitude and rate set to zero. Modulation amplitude and rate are then increased until the stator current equals the rated full-load current. The excitation current of the generator is adjusted to give the rated stator voltage.

10.3 DC injection

In this method, the motor under test is connected to an a.c. source generator and operates at rated voltage on no load. The method requires that the motor and generator are star-connected and that the neutral point is accessible on both motor and generator. A power source may be the generator with a symmetrical multiphase excitation winding (or the induction wound-rotor motor) excited by the multiphase current of periodically varying low frequency f_{ex} . A d.c. source is then connected between the two neutral points as shown in figure 3. The d.c. output is adjusted until the r.m.s. value of the a.c. no-load current plus the d.c. injection current equals the full-load current of the motor. The source generator shall provide rated voltage and shall be able to carry rated current.

The comparative test data for determining temperature rises by this method are unknown. The experts estimate the method accuracy to be within $\gamma = \pm 10 \%$.

The d.c. source sets up a magnetic field that is stationary in space with three times the number of poles than the stator winding. Hence, extra losses appear in the rotor due to the currents and fluxes that are set up by the rotor rotation.

Current measurements are made using current transformers that link two lines, one in the "forward" direction and one in the "backward" direction so that the d.c. component is cancelled.

¹⁾ If the errors of the operator and control and measuring equipment are magnified.

10.4 Méthode de fréquence mixte ou de fréquence double

10.4.1 Alimentation statorique

Dans la présente méthode d'essai, le stator du moteur est alimenté simultanément par deux sources à différentes fréquences (figure 4), la source principale et une source auxiliaire. Il est également possible de brancher la génératrice auxiliaire par le biais d'un transformateur triphasé entre la génératrice principale et le moteur (figure 5). Il convient que les séquences de phase de tension de la fréquence principale et de la fréquence auxiliaire soient les mêmes. Le courant, la tension et la vitesse du moteur varient à une fréquence de battement. La génératrice principale fournit une fréquence assignée alors que la génératrice auxiliaire fournit une puissance de fréquence et d'amplitude réglable. La fréquence de la source auxiliaire est généralement égale à environ 80 % ou 120 % de la fréquence assignée et la tension est d'environ 20-30 % de la tension assignée. La fréquence auxiliaire est entre autres choisie de manière à ce que les variations n'empêchent pas une mesure exacte.

Le moteur est d'abord raccordé à l'alimentation principale et démarré à vide. La tension de sortie de la génératrice auxiliaire est augmentée progressivement (et si nécessaire la tension de l'alimentation principale est également ajustée) jusqu'à ce que les conditions suivantes soient atteintes simultanément:

- a) la valeur efficace du courant variable du moteur est égale au courant assigné;
- b) la valeur efficace de la tension variable du moteur est égale à la tension assignée;
- c) la vitesse est égale à la vitesse assignée.

Lorsqu'il est difficile d'ajuster avec précision les valeurs efficaces du courant et de la tension variables du moteur aux valeurs assignées du moteur, il est possible de réaliser l'essai avec un courant et une tension proches de leurs valeurs assignées et à la vitesse assignée en ajustant la puissance absorbée du moteur par rapport aux pertes totales du moteur à la charge assignée.

Pour les moteurs à induction à cage de puissance assignée inférieure ou égale à 315 kW, et pour les moteurs à induction à rotor bobiné basse tension, l'exactitude est de l'ordre de $\gamma = +3\%$ et $\gamma = -13\%$.

Pour les moteurs à induction à rotor bobiné haute tension de puissance assignée inférieure ou égale à 7 000 kW, l'exactitude est d'environ $\gamma = \pm 3,0\%$, mais pour certaines machines à faible niveau d'échauffement, l'erreur peut atteindre $\gamma = +20\%$.

Le point de fonctionnement du moteur, lorsque la fréquence de la source principale est de 50 Hz et celle de la source auxiliaire de 40 Hz, peut être déduit des courbes de vitesse/couple et de vitesse/courant pour les fréquences principales et auxiliaires, tel qu'illustré à la figure 6. Le couple positif dû à l'alimentation à 50 Hz (point A) est équilibré par le couple négatif dû à l'alimentation à 40 Hz (point B). Le courant net est principalement déterminé par le courant établi par l'alimentation à 40 Hz (point C) puisque le moteur fonctionne avec un glissement très faible (et ainsi avec un courant très faible) par rapport à l'alimentation à 50 Hz. Lorsque la fréquence de la source principale est de 50 Hz et celle de la source auxiliaire de 60 Hz, le couple positif dû à l'alimentation à 60 Hz est équilibré par le couple négatif dû à l'alimentation à 50 Hz. Le courant net est principalement déterminé par le courant établi par l'alimentation à 60 Hz.

La combinaison des fréquences produit *une* fréquence nette qui varie dans le temps de la manière suivante:

$$f = \frac{f_1 + \lambda^2 f_2 + (f_1 + f_2) \cos 2\pi (f_1 - f_2)t}{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos 2\pi (f_1 - f_2)t}$$

10.4 Mixed-frequency or bi-frequency method

10.4.1 Stator feeding

In this test method, the motor stator is fed simultaneously from two sources at different frequencies (figure 4), the main source and an auxiliary source. The auxiliary generator may alternatively be connected through a three-phase transformer between the main generator and the motor (figure 5). The voltage phase sequences of both main and auxiliary frequency should be the same. The motor current, voltage and speed fluctuate at a beat frequency. The main generator supplies rated frequency, while the auxiliary generator provides an output of adjustable frequency and amplitude. The frequency of the auxiliary source is typically either about 80 % or about 120 % of the rated frequency, and the voltage is about 20-30 % of the rated voltage. The auxiliary frequency is in part chosen so that the fluctuations do not prevent accurate readings.

The motor is first connected to the main supply and run on no load. The output voltage of the auxiliary generator is steadily increased (and if necessary the main supply voltage is adjusted also) until the following conditions are achieved simultaneously:

- a) the r.m.s. value of the fluctuating motor current equals the rated current;
- b) the r.m.s. value of the fluctuating motor voltage equals the rated voltage;
- c) the speed equals the rated speed.

When it is difficult to adjust the r.m.s. values of the fluctuating motor current and voltage to the motor rated values precisely, the test can be performed with current and voltage which are close to their rated values and at rated speed by adjusting the motor input power to the total losses of the motor at rated load.

For squirrel-cage induction motors ratings up to 315 kW and for low-voltage wound-rotor induction motors the accuracy is within $\gamma = +3\%$ and $\gamma = -13\%$.

For high-voltage wound-rotor induction motors rated up to 7 000 kW the accuracy is about $\gamma = \pm 3,0\%$, but, for some machines with a low level of heating, the error can reach $\gamma = +20\%$.

The operating point of the motor, when the frequency of the main source is 50 Hz and that of auxiliary source is 40 Hz, can be deduced from the speed/torque and speed/current curves for the main and auxiliary frequencies, as shown in figure 6. The positive torque due to the 50 Hz supply (point A) is balanced by the negative torque due to the 40 Hz supply (point B). The net current is mainly determined by the current set up by the 40 Hz supply (point C), as the motor runs at a very low slip (and hence at a low current) with respect to the 50 Hz supply. When the frequency of the main source is 50 Hz and that of auxiliary source is 60 Hz, the positive torque due to the 60 Hz supply is balanced by the negative torque due to the 50 Hz supply. The net current is mainly determined by the current set up by the 60 Hz supply.

The combination of frequencies results in a net frequency varying with time as follows:

$$f = \frac{f_1 + \lambda^2 f_2 + (f_1 + f_2) \cos 2\pi (f_1 - f_2)t}{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos 2\pi (f_1 - f_2)t}$$

Pour un cas type, les valeurs sont les suivantes:

fréquence de l'alimentation principale $f_1 = 50$ Hz;

fréquence de l'alimentation auxiliaire $f_2 = 40$ Hz;

tension auxiliaire/tension principale $\lambda = 0,25$.

Dans ce cas, la fréquence nette varie entre 48 Hz et 53,3 Hz, c'est-à-dire $50^{+3,3}_{-2,0}$ Hz et ne varie donc pas de manière symétrique autour de 50 Hz. Il s'agit là d'une différence fondamentale entre la méthode de la fréquence mixte et la méthode de la fréquence modulée décrite en 10.2. Dans cette dernière méthode, la fréquence varie généralement de manière sinusoïdale autour de la fréquence assignée.

10.4.2 Alimentation rotorique

Une autre méthode de fréquence mixte pour les moteurs à induction à rotor bobiné consiste à raccorder la génératrice auxiliaire au circuit du rotor plutôt qu'à celui du stator, tel qu'illustré à la figure 7. La tension et la fréquence auxiliaires sont alors ajustées pour établir le courant assigné statorique ou la perte assignée dans le moteur comme dans la méthode normale d'alimentation statorique. Il convient que la séquence de phase de la source auxiliaire soit telle que le rotor avec le stator en court-circuit tourne dans la même direction que celle de l'alimentation principale raccordée au stator avec le rotor en court-circuit. Il convient que la fréquence auxiliaire soit sensiblement inférieure à la moitié de la fréquence principale.

10.4.3 Niveau de vibration pendant l'essai à fréquence mixte

En raison de la combinaison des fréquences des courants et des champs statoriques (ou rotoriques), le couple d'arbre aura une composante d'oscillation considérable. Les niveaux de vibration auront tendance à être supérieurs à la normale et le risque d'observer une résonance mécanique est augmenté en raison du large spectre d'harmoniques de courant et de flux. Il est souhaitable de surveiller les niveaux de vibration pendant l'essai pour vérifier qu'aucun dommage n'a lieu.

A l'issue de l'essai à fréquence mixte, il est possible de faire marcher le moteur avec seulement l'alimentation principale à la tension assignée et de mesurer rapidement le vrai niveau de vibrations pendant que le moteur est à la température de fonctionnement à pleine charge. Il serait possible de surveiller la température du moteur au moyen d'un thermocouple pour s'assurer que la température est suffisamment proche de la valeur à pleine charge assignée pour être admissible. Si la température devait tomber au-dessous d'un niveau admissible, il serait possible de poursuivre l'essai à fréquence mixte pendant un certain temps.

11 Essai de charge équivalente pour machines synchrones – Facteur de puissance nul

Cette méthode consiste à faire fonctionner la machine comme un compensateur synchrone, avec des valeurs appropriées de courant, de tension et de fréquence statoriques. La machine surexcitée peut être raccordée à une charge constituée de machines synchrones sous-excitée tournant au ralenti. En ajustant l'excitation de la machine à l'essai et celle de sa charge, il est possible de faire varier la tension aux bornes tout en maintenant le courant statorique constant. Dans la mesure où la tension E_p en aval de la réactance de fuite du stator à un facteur de puissance nul surexcité est supérieure à ce qu'elle est avec des facteurs de puissance plus élevés pour la même tension de borne et le même courant statorique, la tension d'essai aux bornes peut être réduite à une valeur qui donne une valeur de E_p identique à celle à la charge assignée. L'échauffement qui en résulte dans le stator peut alors être mesuré et utilisé comme une indication de l'échauffement qui serait observé à la charge assignée.

In a typical case, the values are as follows:

frequency of main supply $f_1 = 50 \text{ Hz}$;

frequency of auxiliary supply $f_2 = 40 \text{ Hz}$;

auxiliary voltage/main voltage $\lambda = 0,25$.

In this case, the net frequency varies between 48 Hz and 53,3 Hz, i.e. $50^{+3,3}_{-2,0} \text{ Hz}$, and hence does not vary symmetrically around 50 Hz. This is the fundamental difference between this mixed-frequency method and the modulated-frequency method described in 10.2. In the latter method, the frequency generally varies sinusoidally around the rated frequency.

10.4.2 Rotor feeding

An alternative mixed-frequency method for wound-rotor induction motors involves the connection of the auxiliary generator to the rotor circuit rather than to the stator, as shown in figure 7. The auxiliary voltage and frequency are then adjusted in order to establish rated stator current or rated loss in the motor as in the normal stator-feeding method. The phase sequence of the auxiliary source should be such that the rotor rotation with the stator shorted would be in the same direction as that with the main supply connected to the stator with the rotor shorted. The auxiliary frequency should be significantly less than half the main frequency.

10.4.3 Vibration level during the mixed-frequency test

Due to the combination of the frequencies of the stator (or rotor) currents and fields, the shaft torque will have a considerable oscillating component. Vibration levels will tend to be higher than normal, and there is a greater chance of mechanical resonance occurring due to the broad spectrum of current and flux harmonics. It is desirable that vibration levels are monitored during the test to check that damage will not occur.

When the mixed-frequency test has been completed, the motor can then be operated with the main supply only at rated voltage, and the true vibration level can be measured quickly while the motor is at full-load running temperature. The motor temperature could be monitored by thermocouple to ensure that the temperature is acceptably close to the value at rated full load. If the temperature were to fall below an acceptable level, the mixed-frequency test could be re-continued for a while.

11 Equivalent load test for synchronous machines – Zero power factor

This method consists of operating the machine as a synchronous condenser, with appropriate values of stator current, voltage and frequency. The overexcited machine may be connected to a load consisting of idle-running underexcited synchronous machines. By adjustment of the excitation of the machine to be tested and that of its load, the terminal voltage may be varied while the stator current is held constant. Since the voltage E_p behind the stator leakage reactance at zero power factor overexcited is greater than it is at higher power factors for the same terminal voltage and stator current, the test terminal voltage may be reduced to a value which results in a value of E_p which is the same as that at rated load. The resulting stator temperature rise can then be measured and used as an indication of the rise that would occur at rated load.

La perte dans l'enroulement d'excitation s'écarte sensiblement de celle en fonctionnement normal. Il convient par conséquent de corriger l'échauffement d'excitation mesuré par la variation de résistance pour qu'elle corresponde à la perte associée au courant assigné d'excitation. L'échauffement peut être supposé proportionnel à la perte par effet Joule d'excitation de la manière suivante:

$$\Delta\theta_{fN} = \left(\frac{I_{fN}}{I_{ft}} \right)^2 \Delta\theta_{ft} \times \frac{235 + \theta_{AN}}{235 + \Delta\theta_{ft} + \theta_{Ft} - (I_{fN}/I_{ft})^2 \Delta\theta_{ft}}$$

où

I_{fN} est le courant assigné d'excitation;

I_{ft} est le courant d'excitation mesuré;

θ_{AN} est la température ambiante de référence;

θ_{Ft} est la température ambiante mesurée;

$\Delta\theta_{ft}$ est l'échauffement mesuré d'excitation.

Il est possible d'utiliser l'équation simplifiée suivante, moins précise et qui néglige la variation de résistance avec la température

$$\Delta\theta_{fN} = (I_{fN}/I_{ft})^2 \Delta\theta_{ft}$$

Ce calcul de l'échauffement d'excitation néglige les effets des pertes dans le stator, de surface de rotor et par ventilation.

Lorsqu'il est impossible de négliger l'échauffement de l'enroulement d'excitation dû aux pertes par ventilation, par exemple dans le cas de machines à vitesse périphérique élevée telles que des génératrices de type turbine, l'échauffement de l'enroulement d'excitation doit être déterminé par l'équation suivante:

$$\Delta\theta_{fN} = (I_{fN}/I_{ft})^2 (\Delta\theta_{ft} - \Delta\theta_{fw}) + \Delta\theta_{fw}$$

où $\Delta\theta_{fw}$ est l'échauffement de l'enroulement d'excitation mesuré en entraînant la machine à la vitesse assignée avec les enroulements d'induit et d'excitation en circuit ouvert.

Pour les machines dont les caractéristiques assignées ont un facteur de puissance supérieur à 0,9 (et notamment les machines dont les caractéristiques assignées ont un facteur de puissance unité), cette méthode d'essai peut être impossible à réaliser en raison des limites d'échauffement d'excitation. Dans ce cas, l'excitation peut être réglée à la valeur assignée et il convient de réduire la tension aux bornes pour donner le courant assigné statorique. La perte par effet Joule dans le stator est alors égale à la valeur assignée, mais une correction est nécessaire pour compenser l'échauffement du stator par rapport à la réduction de la perte dans le fer dans le stator, même si l'effet est faible puisque les pertes dans le cuivre dominent. Cet essai peut être complété par deux essais à circuit ouvert pour obtenir cette correction:

- a) avec l'excitation réglée pour donner la tension réduite aux bornes;
- b) avec l'excitation réglée pour donner la tension assignée aux bornes.

L'échauffement statorique est mesuré dans chaque cas et la différence entre les valeurs est ajoutée à la valeur mesurée dans l'essai de charge équivalente.

Il est impossible d'appliquer ces méthodes à des machines à service temporaire puisque ces essais doivent être réalisés suffisamment longtemps pour que les conditions de charge alternative puissent créer un équilibre thermique.

The field winding loss differs considerably from that in normal operation. Hence, the temperature rise of the field measured by change of resistance should be corrected to correspond to the loss associated with the rated field current. The temperature rise may be assumed to be proportional to the field I^2R loss, as follows:

$$\Delta\theta_{fN} = \left(\frac{I_{fN}}{I_{ft}} \right)^2 \Delta\theta_{ft} \times \frac{235 + \theta_{AN}}{235 + \Delta\theta_{ft} + \theta_{Ft} - (I_{fN}/I_{ft})^2 \Delta\theta_{ft}}$$

where

I_{fN} is the rated field current;

I_{ft} is the measured field current;

θ_{AN} is the reference ambient temperature;

θ_{Ft} is the measured ambient temperature;

$\Delta\theta_{ft}$ is the measured field temperature rise.

The following simplified less accurate equation, which neglects the change of resistance with temperature, may be used.

$$\Delta\theta_{fN} = (I_{fN}/I_{ft})^2 \Delta\theta_{ft}$$

This derivation of the field temperature rise neglects the effect of stator, rotor-surface and windage losses.

When the temperature rise of field winding due to windage losses cannot be neglected, for example, in the case of high-peripheral-speed machines such as turbine type generators, the temperature rise of field winding shall be determined by the following equation

$$\Delta\theta_{fN} = (I_{fN}/I_{ft})^2 (\Delta\theta_{ft} - \Delta\theta_{fw}) + \Delta\theta_{fw}$$

where $\Delta\theta_{fw}$ is the temperature rise of field winding measured by driving the machine at rated speed with open-circuit armature and field windings.

For machines rated at power factors above 0,9 (and particularly those rated at unity power factor), this test method may be impractical because of field heating limits. In this case, the excitation may be set to the rated value, and the terminal voltage should be reduced to give rated stator current. The I^2R loss in the stator will then equal the rated value, but correction is required to compensate the stator temperature rise for reduced iron loss in the stator, even though the effect is small as the copper losses predominate. This test may be supplemented by two open-circuit tests to achieve this correction:

- a) with the excitation set to give the reduced terminal voltage;
- b) with the excitation set to give the rated terminal voltage.

The stator temperature rise is measured in each case, and the difference between the values is added to the value measured in the equivalent load test.

These methods cannot be applied to short-time rated machines, as the tests have to be applied for a sufficiently long period of time so that the alternating loading conditions can result in thermal equilibrium.

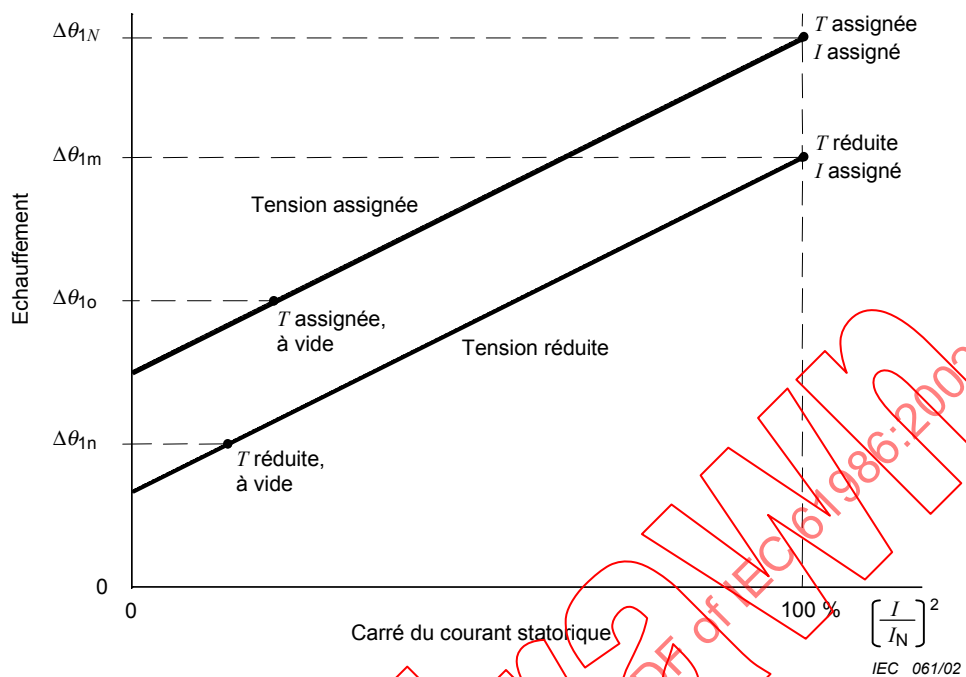


Figure 1 – Méthode par superposition graphique pour moteurs à induction