

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

60279

Première édition
First edition
1969-01

**Mesure de la résistance des enroulements d'une
machine à courant alternatif en fonctionnement
sous tension alternative**

**Measurement of the winding resistance of an a.c.
machine during operation at alternating voltage**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60279: 1969

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications 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.

Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. 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.

Validity of this publication

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 the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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 to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

60279

Première édition
First edition
1969-01

**Mesure de la résistance des enroulements d'une
machine à courant alternatif en fonctionnement
sous tension alternative**

**Measurement of the winding resistance of an a.c.
machine during operation at alternating voltage**

© IEC 1969 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 photo-
copie 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

L

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

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MESURE DE LA RÉSISTANCE DES ENROULEMENTS
D'UNE MACHINE A COURANT ALTERNATIF
EN FONCTIONNEMENT SOUS TENSION ALTERNATIVE**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la C E I en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la C E I exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la C E I dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Comité d'Etudes N° 2 de la C E I: Machines tournantes.

Les travaux furent commencés en 1964 et un premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Tokyo en 1965. Un projet définitif fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en septembre 1966.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud	Israël
Allemagne	Japon
Australie	Pays-Bas
Autriche	Royaume-Uni
Belgique	Suède
Corée (République de)	Suisse
Danemark	Tchécoslovaquie
Etats-Unis d'Amérique	Turquie
Finlande	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
France	Yougoslavie

Les méthodes de mesure comprises dans le présent rapport ne constituent pas des recommandations.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENT OF THE WINDING RESISTANCE
OF AN A.C. MACHINE
DURING OPERATION AT ALTERNATING VOLTAGE**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the IEC recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Report has been prepared by IEC Technical Committee No. 2, Rotating Machinery.

Work was commenced in 1964 and a first draft was discussed at the meeting held in Tokyo in 1965. A final draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in September 1966.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Korea (Republic of)
Austria	Netherlands
Belgium	South Africa
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
Finland	Turkey
France	Union of Soviet Socialist Republics
Germany	United Kingdom
Israel	United States of America
Japan	Yugoslavia

The methods of measurement contained in the present Report are not recommendations.

MESURE DE LA RÉSISTANCE DES ENROULEMENTS D'UNE MACHINE A COURANT ALTERNATIF EN FONCTIONNEMENT SOUS TENSION ALTERNATIVE

INTRODUCTION

Cette méthode qui permet d'effectuer les mesures de résistance des enroulements sans interrompre l'essai en charge, et donc sans être obligé d'avoir recours à des extrapolations, est applicable aux machines de toute puissance, à basse et à haute tension.

Les méthodes de mesure décrites dans le présent rapport ne sont que des méthodes types et le rapport n'a pour objet qu'une application expérimentale en vue de recueillir les données de l'expérience. Il sera donc nécessaire de s'assurer que les différentes méthodes donnent des résultats précis et compatibles entre eux.

Les valeurs de température obtenues par les méthodes décrites dans ce rapport peuvent être dans de nombreux cas supérieures de 5 °C à 25 °C à celles obtenues par les méthodes normales existantes. Il ne sera pas possible en conséquence d'appliquer les méthodes de ce rapport concurremment avec la Publication 34-1 de la CEI: Machines électriques tournantes, Première partie: Valeurs nominales et caractéristiques de fonctionnement. Au cours de la période d'application expérimentale de cette méthode de mesure des températures il sera donc nécessaire de déterminer les échauffements qui peuvent être admis.

1. Principe de la méthode

En appliquant une tension continue aux enroulements d'une machine à courant alternatif en charge, on superpose au courant alternatif une composante à courant continu, et on peut, au moyen de réactances, séparer les composantes continues et alternatives.

La mesure de la résistance des enroulements à partir du courant continu peut être réalisée soit par la méthode volt-ampèremétrique, soit au moyen d'un pont de mesure. Le choix de la méthode et du montage à employer dépend de la puissance et de la tension de la machine, du mode de connexion de ses enroulements ainsi que du mode de réalisation de l'essai d'échauffement.

Pour chacune de ces méthodes on n'a retenu dans un but de normalisation que les schémas les plus généralement utilisés, mais il est évident que de nombreuses variantes à ces schémas sont possibles.

Il n'a pas été considéré comme entrant dans le cadre du présent rapport de donner les schémas applicables à des machines spéciales, par exemple les alternateurs à haute fréquence.

Notes 1. — En général, la méthode volt-ampèremétrique est préférée pour les machines à haute tension à cause de sa simplicité bien que la méthode du pont permette une plus grande précision.

2. — La valeur du courant continu superposé doit être assez faible, et son temps de circulation assez court pour ne pas avoir d'influence sur l'échauffement des enroulements. S'il ne pouvait en être ainsi, il y aurait lieu de déterminer par le calcul ou par un essai la valeur de la correction éventuelle à appliquer.

On considérera en pratique qu'il n'y a pas lieu à correction si le courant continu superposé ne dépasse pas 5 % du courant alternatif de charge, et s'il ne circule pas plus de 5 min. En fait, pour les mesures sur des machines à haute tension, la méthode décrite permet d'opérer avec des valeurs du courant continu beaucoup plus faible, inférieures même à 1 % du courant de charge, la valeur minimale de la tension continue mesurée aux bornes de l'enroulement et du shunt devant être de l'ordre de 10 mV.

3. — Les mesures des résistances à froid et en charge doivent être effectuées par la même méthode et à l'aide des mêmes appareils.

MEASUREMENT OF THE WINDING RESISTANCE OF AN A.C. MACHINE DURING OPERATION AT ALTERNATING VOLTAGE

INTRODUCTION

This method, which allows the measurement of winding resistances to be made without interrupting the on-load test and, therefore, without having to make extrapolations, is applicable to low-voltage or high-voltage machines of any power rating.

The methods of measurement contained in this Report are typical only, and the Report is intended solely for experimental use with a view to gaining experience. For this reason, it will be necessary to establish the accuracy and consistency of the various methods.

The values of temperature obtained by the methods contained in this Report may in many cases be from 5 °C to 25 °C higher than those obtained by existing standard methods. It will, therefore, not be practicable to employ the methods of measurement contained in this Report in conjunction with IEC Publication 34-1, Rotating Electrical Machines, Part 1: Rating and Performance. During experimental use of this method of measuring temperature, it will also, therefore, be necessary to establish what temperature rises can be permitted.

1. Principle of the method

By applying a d.c. voltage across the windings of an a.c. machine on load, a component of direct current is superimposed on the alternating current, and by passing this through a reactance the d.c. and a.c. components can be separated.

Measurement of the winding resistance can be performed using direct current either in a bridge circuit or by the volt-ampere method. The choice of the method of measurement, and the actual circuit used, depend on the size and voltage of the machine involved, the connections of its windings and the type of heat run being performed.

For each of these methods, only the more commonly accepted diagrams have been retained in the interest of standardization, but it is obvious that a number of alternatives are possible.

It is considered that the arrangements for special machines, e.g., high-frequency a.c. generators, do not fall within the scope of this Report.

Notes 1. – The volt-ampere method is generally preferred for high-voltage machines on account of its simplicity, yet a higher accuracy may be obtained with the bridge method.

2. – The value of the superimposed direct current should be sufficiently low and its time of flowing sufficiently short to prevent any influence on the temperature rise of the windings. If not, the possible correction to be applied should be obtained by computation or by a test.

It is assumed that, in practice, no correction is to be made if the superimposed direct current does not exceed 5% of the alternating load current and if it does not flow for more than 5 min. In fact, for measurements on high-voltage machines, the described method may be applied with much lower direct current, even lower than 1% of the load current, the minimum value of the d.c. voltage measured at the winding and shunt terminals being about 10 mV.

3. – The resistance measurements, when cold, and during the on-load test, should be made by the same method, and using the same apparatus.

2. Méthode volt-ampèremétrique

On injecte dans l'enroulement, par exemple au moyen d'une batterie d'accumulateurs, un courant continu superposé au courant de charge et on mesure :

- l'intensité du courant continu superposé parcourant l'enroulement ;
- la chute de tension aux bornes de cet enroulement dû au courant continu superposé.

Cette méthode est applicable à tous les modes de connexion des enroulements (étoile neutre sorti ou non sorti, triangle), mais le schéma à réaliser varie suivant ce mode de connexion.

Trois schémas sont donnés à titre d'exemple :

La figure 1, page 18, donne les détails du montage utilisé pour la mesure, au cours de l'essai en charge, de l'échauffement d'un enroulement connecté en étoile avec neutre sorti.

La figure 2, page 18, donne le schéma de principe à utiliser pour la même machine essayée en court-circuit.

La figure 3, page 19, enfin, indique le schéma de principe à utiliser pour un enroulement en étoile à neutre non sorti. De ce schéma on déduira facilement le montage à appliquer pour un enroulement en triangle.

Dans le cas d'enroulement en étoile à neutre sorti, l'injection du courant continu se fait par le neutre, et il est nécessaire de disposer également d'un point neutre de retour qui, dans le cas d'un essai en charge, sera par exemple celui de l'enroulement statorique d'une autre machine ou de l'enroulement en parallèle de la machine en essai si celle-ci comporte deux voies d'enroulement en parallèle, le point neutre du transformateur principal ou encore celui d'un transformateur auxiliaire ou de bobines de réactance zig-zag, et dans le cas d'un essai en court-circuit, la connexion de court-circuit des bornes de phases.

Dans le cas d'un enroulement à neutre non sorti (figure 3), l'injection du courant continu se fait entre une phase et la borne correspondante d'une inductance triphasée. En pratique, la résistance d'un réseau étant très faible par rapport à celle de l'enroulement en essai, il faut empêcher le courant continu de se refermer par le réseau. Pour cela, on insère entre les points d'injection du courant continu et le réseau des condensateurs ou des résistances. Dans le schéma de la figure 3, on a figuré une résistance sur chaque phase, mais on peut, en pratique, se contenter d'une seule résistance montée sur la phase en essai. Sa valeur sera choisie du même ordre de grandeur que celle de l'enroulement.

Ces condensateurs ou résistances sont normalement court-circuités, les interrupteurs les court-circuitant ne sont ouverts que pendant les mesures.

2.1 Méthode de mesure

Les indications données ci-après correspondent essentiellement au cas d'un enroulement en étoile à neutre sorti (figure 1).

Le courant continu est mesuré aux bornes d'un shunt placé dans la connexion du neutre: il représente ainsi, à un facteur 3 près, la moyenne des courants injectés dans chacune des trois phases. La moyenne des tensions continues consommées dans les trois phases de l'enroulement est déduite de la lecture d'un micro-ampèremètre branché entre le neutre de l'enroulement et le neutre de trois impédances possédant des résistances égales r_a et montées en étoile aux bornes de sortie des enroulements. On peut utiliser à cet effet les primaires de transformateurs de tension, dont la grande réactance limite la circulation de courant alternatif dans les circuits de mesure de la tension continue.

2. Volt-ampere method

A direct current, supplied e.g. from a storage battery, is superimposed on the load alternating current and the following values are measured:

- the value of the superimposed d.c. flowing through the winding;
- the voltage drop caused by the superimposed d.c. across the terminals of the windings.

This method may be applied whatever the type of connection of the windings (star connection, with or without brought-out neutral; delta connection) but the test circuit to be used will vary accordingly.

Three typical arrangements are described hereafter:

Figure 1, page 18, gives the details of the test arrangement for measuring, in the on-load test, the temperature-rise of a star-connected winding with brought-out neutral.

Figure 2, page 18, shows the basic diagram to be used for the same machine for the short-circuit test.

Figure 3, page 19, shows the basic diagram to be used for a star-connected winding with non-brought-out neutral. The test arrangement for a delta-connected winding can be easily derived from this diagram.

In the case of a star-connected winding with brought-out neutral, the direct current should be injected through the neutral. It is also necessary to provide a return neutral point which, for an on-load test, may be that of the stator winding of another machine, or that of the parallel winding of the machine under test if it has two parallel circuits. Alternatively, the return neutral point may be the neutral point of the main transformer or that of an auxiliary transformer or of zig-zag connected reactors. For a short-circuit test, the return neutral point may be the short-circuited connections of the line terminals.

In the case of a winding with non-brought-out neutral, the direct current should be injected between a line and the related terminal of a three-phase inductor. As, in practice, the resistance of a network is much lower than that of the winding under test, it is necessary to prevent the direct current from flowing into the network. For this purpose, capacitors or resistors should be connected between the network and the points where the injection of direct current is made. The diagram (Figure 3) shows a resistor in each phase, but it will be sufficient to have one resistor in the phase under test. Its resistance should have a value approximating that of the winding resistance.

These capacitors or resistors are normally short-circuited. The switches which short-circuit them are only opened during the measurements.

2.1 Method of measurement

The description given hereafter is limited to the case of a star-connected winding with brought-out neutral (Figure 1).

The direct current is measured at the terminals of a shunt inserted in the neutral connection: it thus represents three times the average value of the currents injected into each of the three phases. The average value of the d.c. voltage absorbed in the three phases of the winding will be obtained from the reading taken on a microammeter connected between the winding neutral and the neutral of three impedances having equal resistances r_a and star-connected at the output terminals of the windings. It is possible to use for this purpose the primary windings of voltage transformers with high reactance values which limit the flow of alternating currents through d.c. measuring circuits.

Si $R/3$ est la résistance équivalente aux trois phases de l'enroulement en essai, r_a la résistance de chacune des impédances, r la résistance du circuit du micro-ampèremètre de mesure de la tension, on a entre le courant injecté I_1 et le courant i dans le micro-ampèremètre la relation :

$$i = \frac{RI_1/3}{r + r_a/3}$$

d'où la résistance cherchée :

$$R = \frac{i}{I_1} (3r + r_a)$$

En fait, comme il s'agit de mesurer un échauffement, c'est-à-dire une variation relative de résistance, il n'est pas nécessaire de mesurer les valeurs vraies de R à froid et en charge, mais des valeurs qui leur soient proportionnelles. Il suffit donc que les appareils de mesure aient des elongations proportionnelles, dans la plage de mesure, pour l'un aux valeurs de la tension continue aux bornes de l'enroulement en essai, pour l'autre aux valeurs de l'intensité du courant continu dans cet enroulement.

2.2 Appareillage de mesure

2.2.1 Shunts

Le shunt placé dans les connexions de neutre n'est traversé que par un courant alternatif très faible et sa réalisation ne présente aucune difficulté particulière.

Au contraire, dans le cas d'enroulement connecté en triangle ou en étoile à neutre non sorti, le shunt est traversé par le courant alternatif de charge et doit être construit de façon que l'échauffement dû au passage de ce courant n'influe pas sur sa résistance. Un sectionneur disposé à ses bornes permet de le mettre en service seulement au moment des mesures.

Le transformateur de filtrage de rapport 1 monté aux bornes du shunt doit avoir une résistance élevée par rapport à celle du shunt pour que la composante continue le traversant soit sans influence sur son état magnétique.

2.2.2 Microampèremètres et millivoltmètres

Ces appareils doivent être fidèles et linéaires. Leur classe de précision doit être de 0,5. Ils doivent être filtrés pour que la présence du courant alternatif ne perturbe pas les mesures. La résistance r du circuit du microampèremètre doit être supérieure à $10 \frac{r_a}{3}$.

En fait, pour réduire l'influence des variations de r_a dues à l'échauffement des bobines de réactance, on donnera à r une valeur au moins égale à $100 r_a$.

On utilisera généralement des appareils à spot lumineux.

2.2.3 Transformateurs de tension utilisés comme impédances dans le circuit de mesure

Ces trois transformateurs doivent avoir des réactances aussi voisines que possible pour réduire la composante alternative résiduelle transmise aux systèmes de mesure. Si leurs résistances ne sont pas égales, on peut les équilibrer par des résistances additionnelles, ou remplacer dans la formule $r_a/3$ par la valeur calculée de la résistance équivalente de ces 3 impédances en parallèle. Si, comme il est dit au paragraphe 2.2.2, r est élevé par rapport à r_a ($r \geq 100 r_a$), cette correction est inutile.

If $R/3$ is the resistance equivalent to the three phases of the winding under test, r_a the resistance of one of the equal impedances, r the resistance of the microammeter circuit used for measuring the voltage; the injection current I_1 and the current i in the microammeter are linked by the relationship:

$$i = \frac{RI_1/3}{r + r_a/3}$$

which gives the resistance:

$$R = \frac{i}{I_1} (3r + r_a)$$

Since the measurement deals with a temperature rise, i.e. a relative variation of resistance, it is not necessary to measure the actual values of R in off-load and on-load conditions, but values proportional to them. It is therefore sufficient that the measuring instruments have deflections in the measurement range which are proportional, in one case, to the d.c. voltage at the terminals of the winding under test, and in the other case, to the direct current which flows through this winding.

2.2 Measuring equipment

2.2.1 Shunts

The shunt inserted in the neutral connections will have to carry an alternating current of very low value and it does not raise any design problem.

In the case of a delta-connected or star-connected winding with non-brought-out neutral, the a.c. load current will flow through the shunt which should be so designed that its resistance will not be affected by the temperature rise resulting from that current. An isolating switch connected between its terminals will allow it to be switched on at the time of measurements only.

The filter transformer with unity voltage ratio which is connected across the shunt terminals should have a high resistance compared with that of the shunt in order that the d.c. component flowing through it may not affect its magnetic condition.

2.2.2 Microammeters and millivoltmeters

These instruments should be accurate and linear. Their accuracy class shall be 0.5. They should be provided with filters to prevent a.c. interference with the measurements. The resistance r of the microammeter circuit should be higher than $10 \frac{r_a}{3}$.

In order to reduce the variations of r_a resulting from the temperature rise of the reactor, resistance r should not be less than $100 r_a$.

Light spot instruments are generally used.

2.2.3 Voltage transformers used as impedances in the measuring circuit

These three transformers should have reactances as close as possible to each other so as to reduce the residual alternating component which is transmitted to the measuring circuit. If their resistances are not equal, they may be equalized by means of series resistors, or the ratio $r_a/3$ may be replaced in the formula by the calculated value of the resistance equivalent to the three impedances parallel connected. If, as stated in Sub-clause 2.2.2, r is large in relation to r_a ($r \geq 100 r_a$), this correction is unnecessary.

Pour réduire l'influence de leurs échauffements sur la valeur de leur résistance, il est recommandé de choisir ces transformateurs de tension d'une tension nominale supérieure à celle de la machine.

2.2.4 Transformateur auxiliaire

Si, faute d'un point neutre de retour existant dans le circuit d'alimentation on doit faire usage d'un transformateur auxiliaire, il faut s'assurer que le passage du courant continu n'a pas pour effet un échauffement exagéré de l'appareil, un déplacement du point neutre, ou une forte déformation de la forme d'onde (harmonique 3 important). Pour ces raisons, on préférera généralement employer des bobines de réactances zig-zag, spécialement conçues pour ces essais.

2.2.5 Isolement des circuits de mesure

Dans le cas d'une machine à haute tension à neutre sorti, bien que le circuit de mesure du courant soit à une tension voisine de la terre, des tensions dangereuses peuvent apparaître dans le cas de défaut à la terre sur une phase haute tension, et il est indispensable d'isoler tous les circuits de mesure pour la tension simple de la machine, de faire les lectures à distance, et d'utiliser des interrupteurs manoeuvrables avec une perche.

2.2.6 Alimentation en courant continu

Toute source de courant continu à tension stable peut convenir, mais pour l'essai des machines à haute tension, où la source d'alimentation doit être isolée, l'emploi d'une batterie d'accumulateurs permet de réaliser plus facilement cette isolation.

Le réglage du courant continu peut s'effectuer au moyen d'une résistance additionnelle réglable, qui a également pour effet de limiter le courant alternatif, notamment le courant d'harmonique 3 entre les points neutres, ou en insérant un nombre plus ou moins grand d'éléments de batterie.

2.2.7 Précautions à observer pour les mesures

Comme on ne procède pas à la mesure réelle du courant continu dans l'enroulement et de la tension correspondante, mais à celle de valeurs qui leur sont proportionnelles, il importe que les coefficients de proportionnalité soient les mêmes entre les mesures à froid et les mesures en charge. Cela implique que l'on ne change aucune valeur des éléments des circuits pendant l'essai, notamment la sensibilité des appareils.

Les régimes transitoires, notamment les variations de charge, donnent naissance à des composantes continues susceptibles de fausser les mesures. Il est donc recommandé de ne faire les lectures que lorsque les indications des appareils de mesure sont restées pratiquement constantes pendant une dizaine de secondes, et de faire simultanément les mesures de tension et de courant.

De plus, comme pendant la durée de l'essai le zéro mécanique des appareils peut varier légèrement et qu'on ne peut le régler en cours d'essai à cause des dangers de la haute tension, on décale le zéro mécanique de quelques divisions, de façon à pouvoir déduire des élongations lues lors de l'essai l'élongation du zéro mécanique contrôlée après chaque mesure.

Enfin, il y a lieu de s'assurer que les appareils de mesure du courant continu ne dévient pas sous l'effet du courant alternatif de charge, en l'absence de courant continu.

Dans certains cas particuliers de machines à forte intensité, c'est-à-dire à bornes massives, les différences de potentiel pouvant exister le long des bornes sont susceptibles d'influer sur la précision de la mesure de la chute de la tension continue dans l'enroulement en essai. On peut remédier à cette cause d'erreur en réalisant les connexions du circuit de mesure de la tension continue aux bornes d'enroulement par l'intermédiaire de résistances d'équilibrage de l'ordre de 1Ω , montées comme l'indique le schéma ci-après.

In order to reduce the influence of their temperature-rises on the value of their resistance, voltage transformers should be chosen with a rated voltage higher than that of the machine.

2.2.4 *Auxiliary transformer*

When, in the absence of a return neutral point in the supply circuit, an auxiliary transformer is used, it is necessary to make sure that the d.c. flow will not cause an undue temperature rise in this apparatus, a displacement of the neutral point, or a significant distortion of the waveform (3rd harmonic). For these reasons, it will generally be preferable to use zig-zag reactors especially designed for these tests.

2.2.5 *Insulation of measuring circuit*

Although in the case of a high-voltage machine with brought-out neutral, the current measuring circuit is at a voltage approximating that of earth, dangerous voltages may arise in the event of an earth fault on a high-voltage phase and it is therefore necessary to have all measuring circuits insulated for the working voltage of the machine, to take remote readings and to use pole-operated switches.

2.2.6 *Direct current supply*

Any d.c. supply of steady voltage may be used; but, for testing high-voltage machines where the supply source must be insulated, this insulation may be effected more easily by using a storage battery.

Direct current can be adjusted by means of an adjustable series resistor, which also serves to limit the alternating current, especially that of the 3rd harmonic, flowing between the neutral points, or by inserting more or fewer cells.

2.2.7 *Care to be taken for measurements*

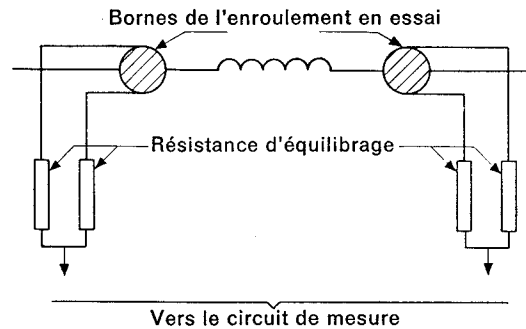
Since one does not measure the actual direct current which flows through the winding, or the associated voltages, but values which are proportional to them, it is important that proportionality factors should remain unchanged between measurements made in off-load and on-load conditions. This implies that no change will be made in any characteristic of the circuit elements during the tests, especially in the sensitivity of the instruments.

Transient phenomena, especially changes in load, will give rise to d.c. components liable to affect measurements adversely. It is therefore recommended that readings be taken only after they have remained actually constant for about 10 s, and that voltage and current measurements be carried out simultaneously.

Moreover, since the mechanical zero of the apparatus can slightly vary during the test, and since it cannot then be adjusted because of the danger of high voltage, the mechanical zero is displaced by a few divisions in order to deduce from the values of deflection read during the test, the value of the mechanical zero deflection checked after each measurement.

Finally, it should be ensured that the measuring instruments for d.c. do not move under the influence of the a.c. load without d.c. flowing.

In certain special cases of machines with a high-current rating, i.e. with massive terminals, the differences of potential which may exist along the terminals are likely to influence the degree of accuracy in the measurement of the d.c. voltage drop in the winding under test. This cause of error can be removed by connecting the d.c. voltage measuring circuit to the winding terminals through equalizing resistors of about $1\ \Omega$ connected in accordance with the following diagram.



3. Méthodes basées sur l'emploi d'un pont de mesure

Ces méthodes, qui sont applicables aux différents modes de connexion des enroulements (étoile neutre sorti ou non sorti, triangle), sont surtout utilisées pour les machines à basse tension. Toutefois, la figure 8, page 22, donne un schéma d'utilisation sur une machine à haute tension avec enroulement en étoile à neutre sorti.

On peut utiliser soit le pont double soit un pont simple. Il est recommandé d'utiliser un pont simple pour les mesures de résistances supérieures à 10Ω . Les schémas les plus courants correspondant à ces deux cas sont indiqués ci-après :

3.1 Mesure de la résistance de l'enroulement d'une machine à basse tension par la méthode du pont double

Suivant le mode de connexion de l'enroulement, on emploie le montage de la figure 4, page 20, (connexion en étoile, neutre sorti) ou de la figure 5, page 20 (connexion en triangle) :

- R_1 = résistance d'une phase de l'enroulement
- R_2 = résistance-étalon normale du pont de mesure
- R_3-R_4 = résistances réglables du pont de mesure
- D = impédances à réactance élevée de limitation du courant alternatif
- R_D = résistance des impédances D
- Z = court-circuiteur
- W = interrupteur
- A = ampèremètre à cadre mobile
- F = filtre

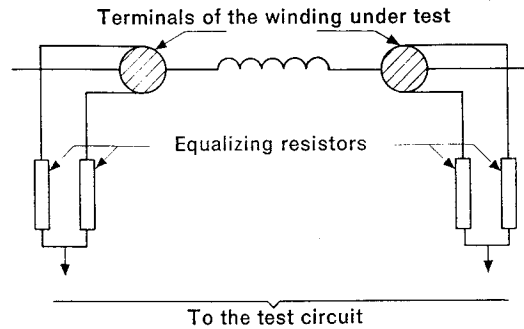
La résistance étalon R_2 doit être dimensionnée pour le courant de charge I_p et il est recommandé d'avoir :

$$R_2 \leq 0,1 R_1$$

Les résistances réglables R_3 et R_4 doivent avoir la précision habituelle des résistances des ponts de mesure de laboratoire, c'est-à-dire environ 0,02%.

Les impédances D doivent être bobinées avec un fil ayant un faible coefficient de variation de résistance en fonction de la température. La valeur de leur résistance R_D doit être connue avec la même précision que celle des résistances R_3 et R_4 .

La connexion des circuits de mesure se fait par l'interrupteur W , le court-circuiteur Z étant ouvert, et sa mise hors circuit se fait en ouvrant l'interrupteur W et en fermant le court-circuiteur Z .



3. Methods using a measuring bridge

These methods, which are applicable to the various methods of connecting windings (star-connection with brought-out or non-brought-out neutral, delta-connection), are mainly used for low-voltage machines. However, Figure 8, page 22, shows a test circuit for a high-voltage machine where windings are star-connected with brought-out neutral.

Single or double bridges may be used. It is recommended that a single bridge be used during measurement of resistances of a value higher than 10Ω . The most usual circuits for either case are described hereafter:

3.1 Measurement of winding temperature rise on a low-voltage machine using the double bridge method

According to the method of connection of the winding, the test circuit shown in Figure 4, page 20, (star-connection with brought-out neutral) or in Figure 5, page 20, (delta-connection) should be used where:

- R_1 = resistance of a phase winding
- R_2 = calibrated resistor of the measuring bridge
- R_3 – R_4 = adjustable resistors of the measuring bridge
- D = high-reactance a.c. limiting impedances
- R_D = resistance of impedances D
- Z = short-circuiting switch
- W = switch
- A = moving-coil ammeter
- F = filter

The calibrated resistor R_2 should be capable of carrying the load current I_p and it is recommended to have:

$$R_2 \leq 0.1 R_1$$

Adjustable resistors R_3 and R_4 should have the usual accuracy of resistors for laboratory measuring bridges, i.e. about 0.02%.

Impedances D should be wound with a wire having a low-temperature coefficient. The value of their resistance R_D should be known with the same accuracy as for resistors R_3 and R_4 .

The measuring circuits should be connected by the switch W , with the short-circuiting switch Z open, and disconnected by opening the switch W and closing the short-circuiting switch Z .

Le courant continu indiqué par l'ampèremètre doit être de l'ordre de :

- 5% de I_p dans le cas de la figure 4, page 20 (connexion en étoile);
- 10% à 15% de I_p dans le cas de la figure 5, page 20 (connexion en triangle),

I_p étant la valeur du courant alternatif par phase de la machine pendant l'essai d'échauffement.

Pour les moteurs à double connexion étoile-triangle, il est recommandé de choisir pour l'essai la connexion en étoile.

La résistance d'une phase de l'enroulement est calculée, à l'équilibre du pont, par la formule :

$$R_1 = R_2 \frac{R_3 + R_D}{R_4}$$

3.2 Mesure sur une machine à basse tension au pont simple

La figure 6, page 21, indique le schéma de principe. Le transformateur de potentiel T_1 de rapport 1 sert à annuler la tension alternative aux bornes du pont, tandis que le condensateur sert à découpler, pour le courant continu, l'enroulement en essai et le réseau. Sans ce condensateur, la résistance mesurée serait celle de l'enroulement shuntée par la résistance du réseau.

On voit, d'après ce schéma, que l'on mesure la somme des résistances de l'enroulement et du secondaire du transformateur de potentiel.

La résistance de l'enroulement est obtenue en soustrayant la résistance du transformateur; un commutateur, disposé comme indiqué à la figure 7, page 21, et dont le rôle est précisé plus loin, permet d'éviter l'échauffement de ce transformateur et la variation de sa résistance au cours de l'essai. Il convient de tenir compte des résistances des éléments auxiliaires et, s'il y a lieu, de leur variation avec la température.

L'obligation d'utiliser dans ce montage des condensateurs capables de laisser passer le courant alternatif de charge de la machine avec une chute de tension peu importante limite l'emploi de cette méthode aux machines de puissance relativement faible (de l'ordre de 20 kW à 30 kW).

Dans la figure 7 sont représentées les dispositions pratiques de la méthode appliquée à la mesure sur une machine triphasée avec enroulement en étoile. La résistance mesurée correspond à celle de deux phases en série. Avec des enroulements connectés en triangle, le schéma est le même, mais la résistance mesurée correspond à celle d'une phase shuntée par la résistance des deux autres phases connectées en série. Si le neutre de l'enroulement en essai est connecté à la terre, il y a lieu de disposer un condensateur sur chaque phase du réseau.

Le commutateur tétrapolaire à deux directions de la figure 7 sert à plusieurs fins :

- i) Permettre de ne brancher le transformateur de potentiel que pendant les mesures de résistance de façon à réduire son échauffement. Il est du reste à noter que ce transformateur n'a pour objet que de fournir une tension en opposition avec la tension alternative aux bornes du pont et non de délivrer de la puissance. Dans ces conditions, l'échauffement susceptible d'influer sur la résistance de son enroulement secondaire est donc excessivement faible.
- ii) Shunter les condensateurs en dehors des périodes de mesure.
- iii) Permettre, avant les mesures de résistance, le contrôle de la résistance de l'enroulement secondaire du transformateur pour tenir compte d'une variation éventuelle. Il est à noter que pour réduire et rendre plus stable dans ce circuit les résistances de contact, on a utilisé deux pôles du commutateur en parallèle.

The direct current reading on the ammeter should approximate:

- 5% of I_p for the circuit on Figure 4, page 20 (star-connection);
- 10% to 15% of I_p for the circuit on Figure 5, page 20 (delta-connection),

where I_p is the value of the alternating current flowing through each phase of the machine during the temperature-rise test.

For double star-delta connected motors, a star-connection should be chosen for the test.

The resistance of a phase of the winding is given, with the bridge balanced, by the formula:

$$R_1 = R_2 \frac{R_3 + R_D}{R_4}$$

3.2 *Measurement on a low-voltage machine using the single-bridge method*

The basic diagram is shown on Figure 6, page 21. The voltage transformer T_1 with unity ratio serves to reduce to zero the a.c. voltage across the bridge terminals, whereas the capacitor is used for decoupling, for direct current, the test winding from the network. If this capacitor is not provided, the measured resistance would be that of the winding paralleled by the resistance of the network.

It will be seen from this diagram, that the measured resistance is the sum of the resistances of the windings and of the secondary of the voltage transformer.

The resistance of the winding is obtained by subtracting from this measurement the resistance of the transformer. A double-throw switch placed as indicated in Figure 7, page 21, and described below, prevents heating of the transformer and variation of its resistance during the tests. Allowance should be made for the resistance of the auxiliary elements and for their temperature dependence, if any.

Since it is necessary to use in this circuit capacitors capable of letting the a.c. load current of the machine flow through them with a voltage drop of low value, the application of the method will be limited to machines of rather low power (about 20 kW to 30 kW).

Figure 7 shows the arrangements to be made to apply this method to a star-connected three-phase machine. The measured resistance is that of two phase-windings in series. With delta-connected windings, the test circuit is the same, but the measured resistance is that of one phase paralleled by the resistance of the other two phases connected in series. If the neutral of the winding under test is connected to earth, a capacitor should be inserted in each phase of the supply.

The four-pole double-throw switch shown in Figure 7 has a number of purposes:

- i) To connect the voltage transformer during resistance measurements only, so as to reduce its temperature rise. It should also be noted that the purpose of this transformer is to supply a voltage in opposition to the a.c. voltage across the bridge terminals, but not to supply power. Under these conditions, the temperature rise liable to affect the resistance of its secondary winding is considerably lower.
- ii) To short-circuit the capacitor banks during the periods where no measurements are made.
- iii) To allow the resistance of the secondary winding of the transformer to be checked periodically for a possible change before carrying out resistance measurements. It should be noted that two poles of the switch in parallel have been used to reduce contact resistance in this circuit and make it more stable.

Si au lieu de mesures périodiques de l'échauffement on veut en suivre la variation de façon continue, il sera nécessaire de laisser le transformateur de potentiel sous tension jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint avant de commencer l'essai et d'effectuer la mesure de la résistance à froid de l'enroulement de la machine.

Le condensateur aux bornes du pont de mesure sert à amortir, sur le circuit de mesure, les effets des surtensions dues aux manœuvres du commutateur.

3.3 *Méthode du pont de mesure appliquée à une machine à haute tension*

Le montage employé est donné par la figure 8, page 22, pour une machine à enroulement en étoile avec neutre sorti.

La tension continue d'alimentation du pont est appliquée entre le point neutre de la machine et celui d'un transformateur T.

Une réactance L_1 s'oppose à la circulation du courant d'harmonique 3 entre ces deux points neutres.

Le filtrage des composantes alternatives dans le circuit de mesure est assuré d'une part par un transformateur de potentiel T_1 de rapport 1 branché aux bornes du shunt R_2 , et dont l'enroulement primaire doit avoir une résistance élevée par rapport à R_2 , et d'autre part une bobine de réactance L_2 en série avec la résistance R_3 et un condensateur branché en parallèle sur la branche $R_3 R_4$ du pont.

Les conditions nécessaires pour la précision des mesures relatives aux réactances et aux shunts, ainsi que les précautions de sécurité à prendre du fait de la présence de la haute tension, sont les mêmes que celles indiquées pour la méthode volt-ampèremétrique. Si le neutre de la machine est solidement mis à la terre, le circuit du pont de mesure peut être simplement protégé par un éclateur.

If instead of measuring temperature-rises at intervals, it is desired to observe their continuous variation, it will be necessary to keep the voltage transformer switched on until steady state is attained before beginning the test, and measuring the resistance of the winding cold.

The capacitor connected to the measuring bridge terminals is used for minimizing the effects of switching surges on the measuring circuit.

3.3 *Measurement on a high-voltage machine using a bridge method*

The connection diagram is shown at Figure 8, page 22, for a star-connected machine with brought-out neutral.

The d.c. voltage supplying the bridge is applied between the neutral points of the machine and of a transformer T.

A reactor L_1 opposes the flow of third harmonic currents between the two neutral points.

A.C. components in the measuring circuit are filtered by means of a voltage transformer T_1 with a 1/1 ratio connected across the terminals of shunt R_2 , the resistance of the primary winding being large in relation to R_2 , or by means of a reactor L_2 in series with resistor R_3 and a capacitor connected in parallel with the arm $R_3 R_4$ of the bridge.

The conditions necessary for the accuracy of measurements on reactors and shunt resistors and the safety precautions to be taken against high voltages are the same as for the volt-ampere method. If the neutral point of the machine is solidly earthed, the bridge circuit may simply be protected with a spark gap.

A – MÉTHODE VOLT-AMPÈREMÉTRIQUE
A – VOLT-AMPERE METHOD

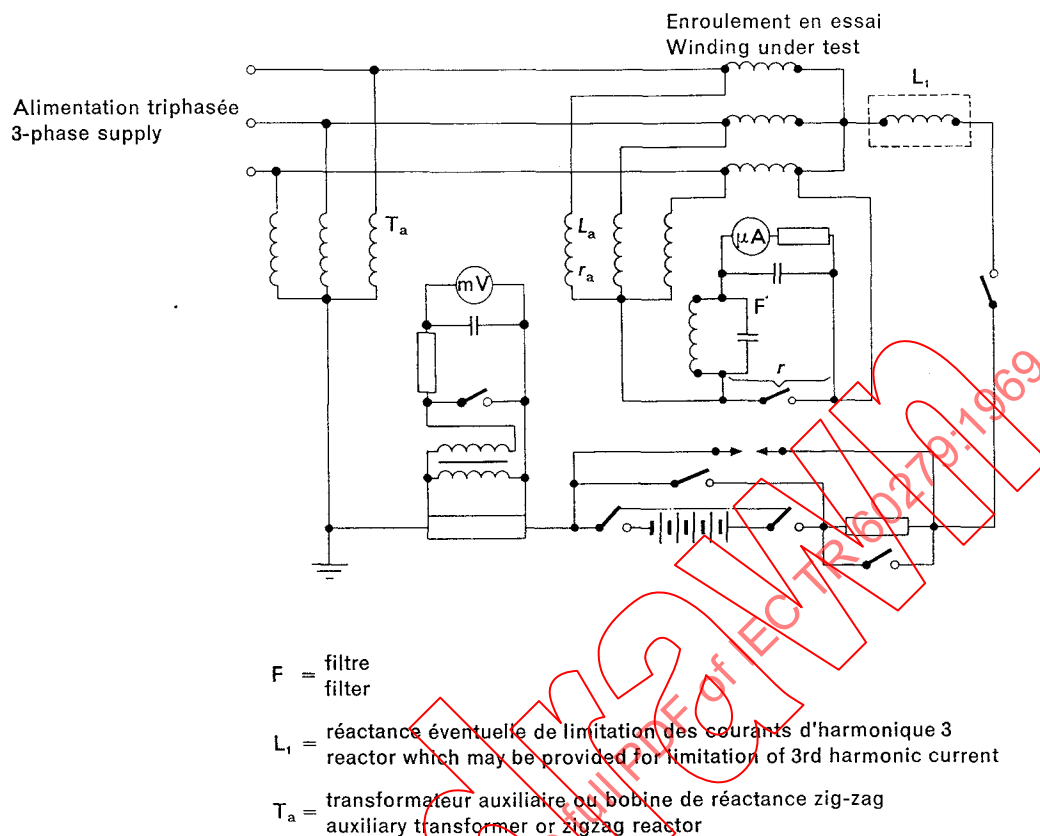
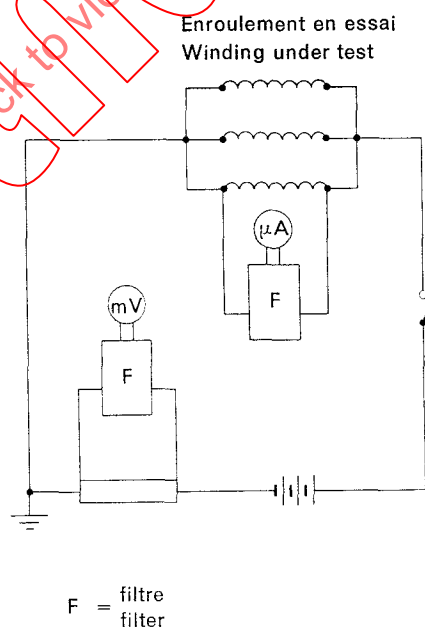


FIG. 1. — Essai en charge.

On-load test.



Les dispositions pratiques concernant les filtres de courant et de tension et le circuit d'alimentation sont les mêmes que pour l'essai en charge (figure 1).

Test arrangements for current and voltage filters and supply circuits are the same as for the on-load test (Figure 1).

FIG. 2. — Essai en court-circuit, schéma de principe.

Short-circuit test, basic diagram.