

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
76-5**

Première édition
First edition
1976

Incorporant: modification N° 1 (1979)
Incorporating: Amendment No. 1 (1979)

Transformateurs de puissance

Cinquième partie:
Tenue au court-circuit

Power transformers

Part 5:
Ability to withstand short circuit



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 76-5: 1976

Numéros des publications

Depuis le 1er 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.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
76-5**

Première édition
First edition
1976

Incorporant: modification N° 1 (1979)
Incorporating: Amendment No. 1 (1979)

Transformateurs de puissance

**Cinquième partie:
Tenue au court-circuit**

Power transformers

**Part 5:
Ability to withstand short circuit**

© CEI 1976 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Prescriptions relatives à la tenue au court-circuit	6
1.1 Généralités	6
1.2 Conditions de surintensité	6
2. Démonstration de la tenue au court-circuit	10
2.1 Tenue thermique au court-circuit	10
2.2 Tenue mécanique au court-circuit	14

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Requirements with regard to ability to withstand short circuit	7
1.1 General	7
1.2 Overcurrent conditions	7
2. Demonstration of ability to withstand short circuit	11
2.1 Thermal ability to withstand short circuit	11
2.2 Dynamic ability to withstand short circuit	15

Withdrawing

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-5:1976 CSV

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Cinquième partie : Tenue au court-circuit

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI 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 l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente publication a été établie par le Comité d'Etudes N° 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Elle constitue la cinquième partie d'une série de cinq qui, lorsqu'elle sera complète, remplacera la deuxième édition de la Publication 76 (1967).

Un premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Bruxelles en 1971, d'où résulta un projet, document 14(Bureau Central)22, qui fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en septembre 1972.

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

Afrique du Sud (République d')

Allemagne

Argentine

Australie

Autriche

Belgique

Canada

Danemark

Espagne

Etats Unis d'Amérique

Finlande

France

Hongrie

Israël

Italie

Japon

Norvège

Pays-Bas

Portugal

Roumanie

Royaume-Uni

Suède

Turquie

Union des Républiques

Socialistes Soviétiques

Yougoslavie

La publication 76 a été divisée en cinq parties, indiquées ci-après, qui sont publiées en fascicules séparés:

Publication 76-1: Première partie: Généralités.

Publication 76-2: Deuxième partie: Echauffement.

Publication 76-3: Troisième partie: Niveaux d'isolement et essais diélectriques.

Publication 76-4: Quatrième partie: Prises et connexions.

Publication 76-5: Cinquième partie: Tenue au court-circuit.

Cette publication comprend la première édition (1976) et la Modification N° 1 parue en 1979.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS

Part 5 : Ability to withstand short circuit

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 international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This publication has been prepared by IEC Technical Committee No. 14, Power Transformers.

It is the fifth of a series of five parts which, when completed, will supersede the second edition of Publication 76 (1967).

A first draft was discussed at the meeting held in Brussels in 1971, as a result of which a draft, Document 14(Central Office)22, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in September 1972.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Argentina	Netherlands
Australia	Norway
Austria	Portugal
Belgium	Romania
Canada	South Africa (Republic of)
Denmark	Spain
Finland	Sweden
France	Turkey
Germany	Union of Soviet
Hungary	Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Italy	United States of America
Japan	Yugoslavia

Publication 76 has been divided into the following five parts, which are published as separate booklets:

- Publication 76-1: Part 1: General.
- Publication 76-2: Part 2: Temperature Rise.
- Publication 76-3: Part 3: Insulation Levels and Dielectric Tests.
- Publication 76-4: Part 4: Tappings and Connections.
- Publication 76-5: Part 5: Ability to Withstand Short Circuit.

This publication is formed by the first edition (1976) and Amendment No. 1 issued in 1979.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Cinquième partie : Tenue au court-circuit

1. Prescriptions relatives à la tenue au court-circuit

1.1 Généralités

Les transformateurs doivent être conçus et construits pour résister sans dommage aux effets thermiques et mécaniques des courts-circuits extérieurs dans les conditions spécifiées au paragraphe 1.2.

Les courts-circuits extérieurs ne sont pas limités aux courts-circuits triphasés: ils comprennent les défauts entre phases, entre deux phases et la terre et entre phase et terre. Les courants dans les enroulements correspondant à ces conditions sont appelés dans cette partie de la Publication 76 « *surintensités* » (abréviation de « *surintensités de courant* »).

Note. — Les prescriptions de l'article 1 s'appliquent aux transformateurs immergés dans l'huile. Pour les transformateurs secs, de telles prescriptions doivent faire l'objet d'un accord entre constructeur et acheteur, compte tenu des principes énoncés à l'article 1 de la présente publication.

1.2 Conditions de surintensité

1.2.1 Transformateurs à deux enroulements séparés

1.2.1.1 Pour les transformateurs triphasés ou les groupes triphasés, on distingue trois catégories selon la puissance nominale:

Catégorie I, jusqu'à 3 150 kVA;

Catégorie II, de 3 151 kVA à 40 000 kVA;

Catégorie III, au-dessus de 40 000 kVA.

1.2.1.2 Le courant de court-circuit symétrique (en valeur efficace, voir le paragraphe 2.1.2) doit être calculé en tenant compte de l'impédance de court-circuit du transformateur et de l'impédance du réseau pour les transformateurs des catégories II et III, ainsi que pour ceux de la catégorie I si l'impédance du réseau est supérieure à 5 % de l'impédance de court-circuit du transformateur.

TABEAU I

Valeurs caractéristiques de tension de court-circuit de transformateurs à deux enroulements séparés

Tension de court-circuit à courant nominal, exprimée en pour-cent de la tension nominale de l'enroulement auquel la tension est appliquée	
Puissance nominale kVA	Tension de court-circuit %
Jusqu'à 630	4,0
631 à 1 250	5,0
1 251 à 3 150	6,25
3 151 à 6 300	7,15
6 301 à 12 500	8,35
12 501 à 25 000	10,0
25 001 à 200 000	12,5

Notes 1. — Pour les puissances nominales supérieures à 200 000 kVA, les valeurs doivent faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

2. — Dans le cas d'éléments monophasés destinés à constituer un groupe triphasé, les valeurs de puissance nominale s'entendent comme étant celles du groupe triphasé.

POWER TRANSFORMERS

Part 5 : Ability to withstand short circuit

1. Requirements with regard to ability to withstand short circuit

1.1 General

Transformers shall be designed and constructed to withstand without damage the thermal and dynamic effects of external short circuits under the conditions specified in Sub-clause 1.2.

External short circuits are not restricted to three-phase short circuits: they include line-to-line, double-earth and line-to-earth faults. The currents resulting from these conditions in the windings are designated as "overcurrents" in this part of Publication 76.

Note. — The requirements of Clause 1 apply to oil-immersed transformers. For dry-type transformers, such requirements are subject to agreement between the manufacturer and the purchaser, taking into account the principles established in Clause 1 of this publication.

1.2 Overcurrent conditions

1.2.1 Transformers with two separate windings

1.2.1.1 Three categories for the rated power of three-phase transformers or three-phase banks are recognized:

category I, up to 3 150 kVA;

category II, 3 151 kVA to 40 000 kVA;

category III, above 40 000 kVA.

1.2.1.2 The symmetrical short-circuit current (r.m.s. value, see also Sub-clause 2.1.2) shall be calculated using the short-circuit impedance of the transformer plus the system impedance for transformers of categories II and III and also for transformers of category I if the system impedance is greater than 5% of the short-circuit impedance of the transformer.

TABLE I

Typical values of impedance voltage for transformers with two separate windings

Impedance voltage at rated current, given as a percentage of the rated voltage of the winding to which the voltage is applied	
Rated power kVA	Impedance voltage %
Up to 630	4.0
631 to 1 250	5.0
1 251 to 3 150	6.25
3 151 to 6 300	7.15
6 301 to 12 500	8.35
12 501 to 25 000	10.0
25 001 to 200 000	12.5

Notes 1. — Values for rated powers greater than 200 000 kVA are subject to agreement between the manufacturer and the purchaser.

2. — In the case of single-phase units connected to form a three-phase bank, the value of rated power applies to the three-phase bank.

Pour les transformateurs de la catégorie I, on négligera dans le calcul l'impédance du réseau si celle-ci est égale ou inférieure à 5 % de l'impédance de court-circuit du transformateur.

La valeur de crête du courant de court-circuit doit être calculée selon les indications du paragraphe 2.2.3.

1.2.1.3 Le tableau I donne des valeurs caractéristiques d'impédances de court-circuit de transformateurs, exprimées en tension de court-circuit à courant nominal (pour la prise principale). Si des valeurs plus faibles sont spécifiées, la tenue au court-circuit du transformateur devra faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

1.2.1.4 La puissance apparente de court-circuit du réseau à l'endroit où est installé le transformateur pourra être spécifiée par l'acheteur dans son appel d'offres pour permettre de trouver la valeur du courant de court-circuit symétrique à prendre en compte dans le calcul et dans les essais.

Si le niveau de la puissance de court-circuit n'est pas spécifié, on peut utiliser les valeurs données dans le tableau II.

TABLEAU II

Puissance apparente de court-circuit du réseau qui peut être utilisée en l'absence d'autres spécifications

Tension la plus élevée du réseau kV	Puissance apparente de court-circuit MVA
7,2 - 12 - 17,5 et 24	500
36	1 000
52 et 72,5	3 000
100 et 123	6 000
145 et 170	10 000
245	20 000
300	30 000
420	40 000

1.2.2 Transformateurs à plus de deux enroulements et autotransformateurs

Les surintensités dans les enroulements y compris les enroulements de stabilisation et les enroulements auxiliaires doivent être déterminées à partir des impédances du transformateur et de celles du ou des réseaux. Il doit être tenu compte des effets d'éventuelles alimentations en retour provenant de machines tournantes ou d'autres transformateurs ainsi que des différentes sortes de défauts pouvant intervenir en service sur le réseau, par exemple des défauts phase-terre et des défauts entre phases, associés aux conditions de mise à la terre du réseau intéressé et du transformateur. Les caractéristiques de chaque réseau (au moins la puissance apparente de court-circuit et la gamme dans laquelle est compris le rapport entre l'impédance homopolaire et l'impédance directe) doivent être spécifiées par l'acheteur dans son appel d'offres.

Quand la combinaison de l'impédance du transformateur et de celle du ou des réseaux conduit à une surintensité excessive, le constructeur doit informer l'acheteur de la surintensité maximale que peut supporter le transformateur. Dans ce cas, il convient que l'acheteur prenne des dispositions pour limiter le courant de court-circuit à la surintensité indiquée par le constructeur.

Les enroulements de stabilisation des transformateurs triphasés doivent être capables de supporter les surintensités résultant des différentes sortes de défauts pouvant survenir en service, compte tenu des conditions de mise à la terre du réseau considéré.

Il peut ne pas être économique de dimensionner les enroulements auxiliaires pour résister à un court-circuit à leurs bornes. Dans un tel cas, l'effet des surintensités doit être limité par des moyens appropriés tels que des bobines d'inductances série ou, dans certains cas, des fusibles. On doit veiller à se prémunir contre les défauts dans la zone comprise entre le transformateur et l'appareillage de protection.

Dans le cas de transformateurs monophasés raccordés de manière à constituer un groupe triphasé, les enroulements de stabilisation doivent pouvoir tenir un court-circuit à leurs bornes, à moins que l'acheteur n'ait spécifié que des précautions spéciales seront prises pour éviter tout court-circuit entre phases.

For transformers of category I, the system impedance shall be neglected in the calculation if this impedance is equal to or less than 5% of the short-circuit impedance of the transformer.

The peak value of the short-circuit current shall be calculated in accordance with Sub-clause 2.2.3.

1.2.1.3 Typical values for the short-circuit impedance of transformers expressed as the impedance voltage at rated current (principal tapping) are given in Table I. If lower values are required, the ability of the transformer to withstand a short circuit shall be subject to agreement between the manufacturer and the purchaser.

1.2.1.4 The short-circuit apparent power of the system at the transformer location should be specified by the purchaser in his enquiry in order to obtain the value for the symmetrical short-circuit current to be used for the design and the tests.

If the short-circuit level is not specified, the values given in Table II may be used.

TABLE II

Short-circuit apparent power of the system which may be used in the absence of other specifications

Highest system voltage kV	Short-circuit apparent power MVA
7.2, 12, 17.5 and 24	500
36	1 000
52 and 72.5	3 000
100 and 123	6 000
145 and 170	10 000
245	20 000
300	30 000
420	40 000

1.2.2 Transformers with more than two windings and auto-transformers

The overcurrents in the windings, including stabilizing windings and auxiliary windings, shall be determined from the impedances of the transformer and the system(s). Account shall be taken of the effect of possible feedback from rotating machinery or from other transformers as well as of the different forms of system faults that can arise in service, e.g. line-to-earth faults and line-to-line faults associated with the relevant system and transformer earthing conditions. The characteristics of each system (at least the short-circuit level and the range of the ratio between the zero-sequence impedance and the positive-sequence impedance) shall be specified by the purchaser in his enquiry.

When the combined impedance of the transformer and the system(s) results in excessive overcurrent, the manufacturer shall advise the purchaser of the maximum overcurrent that the transformer can withstand. In this case, provision should be made by the purchaser to limit the short-circuit current to the overcurrent indicated by the manufacturer.

Stabilizing windings of three-phase transformers shall be capable of withstanding the overcurrents resulting from different forms of system faults that can arise in service associated with relevant system earthing conditions.

It may not be economical to design auxiliary windings to withstand short circuits on their terminals. In such a case, the effect of the overcurrents has to be limited by appropriate means, such as series reactors or, in some instances, fuses. Care has to be taken to guard against faults in the zone between the transformer and the protective apparatus.

In the case of single-phase transformers connected to form a three-phase bank, the stabilizing windings shall be capable of withstanding a short circuit on their terminals, unless the purchaser specifies that special precautions will be taken to avoid short circuits between phases.

1.2.3 Transformateurs survolteurs-dévolteurs

Les impédances des transformateurs survolteurs-dévolteurs peuvent être très faibles et, par conséquent, les surintensités dans les enroulements sont déterminées principalement par les caractéristiques du réseau à l'endroit où est installé le transformateur. Ces caractéristiques doivent être spécifiées par l'acheteur dans son appel d'offres.

Quant la combinaison des impédances du transformateur et du réseau conduit à une surintensité excessive, le constructeur doit informer l'acheteur de la surintensité maximale que peut supporter le transformateur. Dans ce cas, il convient que l'acheteur prenne des dispositions pour limiter le courant de court-circuit à la surintensité indiquée par le constructeur.

1.2.4 Transformateurs directement associés à d'autres appareils

Lorsqu'un transformateur est directement associé à d'autres appareils dont l'impédance limiterait le courant de court-circuit, on peut prendre en compte, après accord entre le constructeur et l'acheteur, la somme des impédances du transformateur, du réseau et des appareils directement associés.

Ceci s'applique, par exemple, aux transformateurs de centrale si le raccordement entre l'alternateur et le transformateur est exécuté de telle sorte que la possibilité d'un défaut entre phases ou entre deux phases et la terre se produisant à cet endroit soit négligeable.

Note. — Si le raccordement alternateur-transformateur est fait de cette façon, les conditions de court-circuit les plus sévères peuvent apparaître, dans le cas d'un transformateur de centrale à couplage étoile-triangle avec neutre à la terre, lorsqu'un défaut phase-terre se produit sur le réseau raccordé à l'enroulement connecté en étoile.

1.2.5 Transformateurs spéciaux

La tenue d'un transformateur à de fréquentes surintensités provenant des conditions d'exploitation ou d'une utilisation particulière (par exemple les transformateurs de four ou les transformateurs alimentant des appareils de traction) doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

1.2.6 Dispositif de changement de prises

Lorsque le transformateur en est muni, le dispositif de changement de prises doit être capable de supporter les mêmes surintensités dues aux courts-circuits que les enroulements.

1.2.7 Bornes neutres

La borne neutre des enroulements connectés en étoile ou en zigzag doit être conçue pour la surintensité la plus élevée qui peut la traverser.

2. Démonstration de la tenue au court-circuit

Note. — Les prescriptions de l'article 2 s'appliquent aux transformateurs immergés dans l'huile. Pour les transformateurs secs, de telles prescriptions doivent faire l'objet d'un accord entre constructeur et acheteur, compte tenu des principes énoncés à l'article 2 de la présente publication.

2.1 Tenue thermique au court-circuit

2.1.1 Généralités

Selon la présente norme, la tenue thermique au court-circuit est démontrée par le calcul.

2.1.2 Valeur du courant de court-circuit symétrique I pour les transformateurs à deux enroulements

Pour les transformateurs triphasés, la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique I est calculée comme suit:

$$I = \frac{U}{(Z_t + Z_s) \sqrt{3}}, \text{ en kiloampères} \quad (1)$$

où:

Z_s est l'impédance de court-circuit du réseau

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}, \text{ en ohms par phase} \quad (2)$$

1.2.3 *Booster transformers*

The impedances of booster transformers can be very low and, therefore, the overcurrents in the windings are determined mainly by the characteristics of the system at the location of the transformer. These characteristics shall be specified by the purchaser in his enquiry.

When the combined impedance of the transformer and the system results in excessive overcurrent, the manufacturer shall advise the purchaser of the maximum overcurrent that the transformer can withstand. In this case, provision should be made by the purchaser to limit the short-circuit current to the overcurrent indicated by the manufacturer.

1.2.4 *Transformers directly associated with other apparatus*

Where a transformer is directly associated with other apparatus, the impedance of which would limit the short-circuit current, the sum of the impedances of the transformer, the system and the directly-associated apparatus may, by agreement between the manufacturer and the purchaser, be taken into account.

This applies, for example, to generator transformers if the connection between generator and transformer is constructed in such a way that the possibility of line-to-line or double-earth faults in this region is negligible.

Note. — If the connection between generator and transformer is constructed in this way, the most severe short-circuit conditions may occur, in the case of a star-delta-connected generator transformer with earthed neutral, when a line-to-earth fault occurs on the system connected to the star-connected winding.

1.2.5 *Special transformers*

The ability of a transformer to withstand frequent overcurrents, arising from the method of operation or the particular application (e.g. furnace transformers and traction-feeding transformers) shall be subject to special agreement between the manufacturer and the purchaser.

1.2.6 *Tap-changing equipment*

Where fitted, tap-changing equipment shall be capable of carrying the same overcurrents due to short circuits as the windings.

1.2.7 *Neutral terminals*

The neutral terminal of windings with star or zigzag connection shall be designed for the highest overcurrent that can flow through this terminal.

2. **Demonstration of ability to withstand short circuit**

Note. — The requirements of Clause 2 apply to oil-immersed transformers. For dry-type transformers, such requirements are subject to agreement between the manufacturer and the purchaser, taking into account the principles established in Clause 2 of this publication.

2.1 *Thermal ability to withstand short circuit*

2.1.1 *General*

According to this standard, the thermal ability to withstand short circuit is demonstrated by calculation.

2.1.2 *Value of the symmetrical short-circuit current I for transformers with two windings*

The r.m.s. value of the symmetrical short-circuit current I is calculated for three-phase transformers as follows:

$$I = \frac{U}{(Z_t + Z_s) \sqrt{3}}, \text{ in kiloamperes} \quad (1)$$

where:

Z_s is the short-circuit impedance of the system

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}, \text{ in ohms per phase} \quad (2)$$

U_s est la tension nominale du réseau, en kilovolts, et S est la puissance apparente de court-circuit du réseau, en mégavoltampères

U et Z_t sont définies comme suit:

a) pour la prise principale:

U est la tension nominale U_N de l'enroulement considéré, en kilovolts

Z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur ramenée à l'enroulement considéré, et est calculée comme suit:

$$Z_t = \frac{u_z U_N^2}{100 S_N}, \text{ en ohms par phase} \quad (3)$$

où u_z est la tension de court-circuit à courant nominal et pour la température de référence, exprimée en pour-cent, et S_N est la puissance nominale du transformateur, en mégavoltampères;

b) pour les prises autres que la prise principale:

U est, sauf spécification contraire, la tension de prise * de l'enroulement en question pour la connexion de prise considérée, en kilovolts

Z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur, ramenée à l'enroulement et à la prise considérés, en ohms par phase.

Pour les transformateurs de la catégorie I, on néglige dans le calcul l'impédance du réseau si celle-ci est au plus égale à 5 % de l'impédance de court-circuit du transformateur (voir aussi le paragraphe 1.2.1.2).

Si dans son appel d'offres, l'acheteur n'a pas spécifié la puissance de court-circuit du réseau, sa valeur peut être prise d'après le tableau II.

Note. — Pour les besoins du présent paragraphe, on a appelé Z_t l'impédance de court-circuit du transformateur qui est désignée par Z_k en Première partie du paragraphe 3.7.4.

2.1.3 Durée du courant de court-circuit symétrique I

Sauf spécification contraire de l'acheteur, la durée du courant I à utiliser dans le calcul concernant la tenue thermique au court-circuit est de 2 s.

Note. — Pour les autotransformateurs et pour les transformateurs avec un courant de court-circuit dépassant 25 fois le courant nominal, on peut adopter, après accord entre le constructeur et l'acheteur, une durée du courant de court-circuit inférieure à 2 s.

2.1.4 Valeur maximale admissible de la température moyenne la plus élevée θ_1

En se basant sur une température initiale d'enroulement θ_0 , définie comme étant la somme de la température ambiante maximale admissible et de l'échauffement correspondant au régime nominal mesuré par variation de résistance (ou, si cet échauffement n'est pas connu, l'échauffement limite correspondant à la classe de température de l'isolation de l'enroulement), la température moyenne la plus élevée θ_1 de l'enroulement, après le passage du courant de court-circuit symétrique I de valeur et de durée fixées aux paragraphes 2.1.2 et 2.1.3, ne doit pas dépasser la valeur θ_2 indiquée au tableau III quelle que soit la prise.

TABLEAU III

Valeurs maximales admissibles de la température moyenne de l'enroulement après court-circuit, θ_2

Type de transformateur	Classe de température de l'isolation	Valeur de θ_2	
		Cuivre	Aluminium
Immergé dans l'huile	A	250 °C	200 °C
Sec	A	180 °C	180 °C
	E	250 °C	200 °C
	B	350 °C	200 °C
	F et H	350 °C	—

* Pour la définition de « tension de prise », voir le paragraphe 3.5.3.3 de la Publication 76-1: Première partie: Généralités.

U_s is the rated voltage of the system, in kilovolts, and S is the short-circuit apparent power of the system, in megavoltamperes.

U and Z_t are defined as follows:

a) for the principal tapping:

U is the rated voltage U_N of the winding under consideration, in kilovolts

Z_t is the short-circuit impedance of the transformer referred to the winding under consideration, and is calculated as follows:

$$Z_t = \frac{u_z U_N^2}{100 S_N}, \text{ in ohms per phase} \quad (3)$$

where u_z is the impedance voltage at rated current and at the reference temperature, as a percentage, and S_N is the rated power of the transformer, in megavoltamperes;

b) for tappings other than the principal tapping:

U is, unless otherwise specified, the tapping voltage * of the tapping and the winding under consideration, in kilovolts

Z_t is the short-circuit impedance of the transformer referred to the winding and the tapping under consideration, in ohms per phase.

For transformers of category I, the impedance of the system is neglected in the calculations if it is equal to or less than 5% of the short-circuit impedance of the transformer (see also Sub-clause 1.2.1.2).

If the short-circuit power of the system is not specified by the purchaser in the enquiry, its value can be taken from Table II.

Note. — For the purposes of this sub-clause, the designation Z_t has been used for short-circuit impedance of the transformer which is designated by Z_k in Sub-clause 3.7.4. of Part 1.

2.1.3 Duration of the symmetrical short-circuit current I

The duration of the current I to be used for the calculation of the thermal ability to withstand short circuit is 2 s, unless otherwise specified by the purchaser.

Note. — For auto-transformers and for transformers with a short-circuit current exceeding 25 times the rated current, a short-circuit current duration below 2 s may be adopted after agreement between the manufacturer and the purchaser.

2.1.4 Maximum permissible value of the highest average temperature θ_1

On the basis of an initial winding temperature θ_0 , derived from the sum of the maximum permissible ambient temperature and the relevant temperature rise at rated conditions measured by resistance (or, if this temperature rise is not available, the temperature rise for the relevant temperature class of the insulation of the winding), the highest average temperature θ_1 of the winding, after loading with a symmetrical short-circuit current I of a value and duration as described in Sub-clauses 2.1.2 and 2.1.3, shall not exceed the value stated for θ_2 in Table III in any tapping position.

TABLE III

Maximum permissible values of average temperature of the winding after short circuit, θ_2

Transformer type	Temperature class of insulation	Value of θ_2	
		Copper	Aluminium
Oil-immersed	A	250 °C	200 °C
Dry	A	180 °C	180 °C
	E	250 °C	200 °C
	B	350 °C	200 °C
	F and H	350 °C	—

* For a definition of "tapping voltage", see Sub-clause 3.5.3.3 of Publication 76-1, Part 1: General.

2.1.5 Calcul de la température θ_1

La température moyenne la plus élevée θ_1 atteinte par l'enroulement après court-circuit doit être calculée d'après la formule:

$$\theta_1 = \theta_0 + a \cdot J^2 \cdot t \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

dans laquelle:

θ_0 est la température initiale, en degrés Celsius

J est la densité de courant de court-circuit, en ampères par millimètre carré

t est la durée, en secondes

a est une fonction de $\frac{1}{2} (\theta_2 + \theta_0)$ conformément au tableau IV, où:

θ_0 est la température moyenne maximale admissible de l'enroulement, en degrés Celsius, indiquée au tableau III.

TABLEAU IV
Valeurs du facteur « a »

$\frac{1}{2} (\theta_2 + \theta_0)$	$a = \text{fonction de } \frac{1}{2} (\theta_2 + \theta_0)$	
$^\circ\text{C}$	Enroulements en cuivre	Enroulements en aluminium
140	7,41	16,5
160	7,80	17,4
180	8,20	18,3
200	8,59	19,1
220	8,99	—
240	9,38	—
260	9,78	—

2.1.6 Valeur du courant de court-circuit symétrique I pour les transformateurs à plus de deux enroulements et les autotransformateurs

Les surintensités sont calculées conformément au paragraphe 1.2.2. La température moyenne la plus élevée de chaque enroulement est calculée conformément aux paragraphes 2.1.3, 2.1.4 et 2.1.5 et ne doit pas dépasser les valeurs maximales admissibles données au tableau III.

2.2 Tenue mécanique au court-circuit

2.2.1 Généralités

Selon la présente norme, la tenue mécanique au court-circuit est démontrée par des essais ou par référence à des essais sur des transformateurs semblables.

Les essais de court-circuit sont des essais spéciaux (voir la Publication 76-1, paragraphe 3.11.3) exécutés conformément aux paragraphes ci-après.

Les transformateurs de la catégorie III ne peuvent pas normalement être essayés conformément à la présente norme.

Les conditions d'essais des transformateurs à plus de deux enroulements et des autotransformateurs doivent toujours faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

2.2.2 Conditions dans lesquelles est présenté le transformateur avant les essais de court-circuit

2.2.2.1 Sauf convention contraire, les essais sont exécutés sur un transformateur neuf prêt à être mis en service. Le montage des accessoires n'ayant aucune influence sur le comportement durant l'essai de court-circuit (par exemple les réfrigérants démontables) n'est pas exigé.

2.1.5 Calculation of the temperature θ_1

The highest average temperature θ_1 attained by the winding after short circuit shall be calculated by the formula:

$$\theta_1 = \theta_0 + a \cdot J^2 \cdot t \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

where:

θ_0 is the initial temperature, in degrees Celsius

J is the short-circuit current density, in amperes per square millimetre

t is the duration, in seconds

a is a function of $\frac{1}{2}(\theta_2 + \theta_0)$ in accordance with Table IV, where:

θ_2 is the maximum permissible average winding temperature, in degrees Celsius, as specified in Table III.

TABLE IV
Values of factor “a”

$\frac{1}{2}(\theta_2 + \theta_0)$	$a = \text{function of } \frac{1}{2}(\theta_2 + \theta_0)$	
$^\circ\text{C}$	Copper windings	Aluminium windings
140	7.41	16.5
160	7.80	17.4
180	8.20	18.3
200	8.59	19.1
220	8.99	—
240	9.38	—
260	9.78	—

2.1.6 Value of the symmetrical short-circuit current I for transformers with more than two windings and auto-transformers

The overcurrents are calculated in accordance with Sub-clause 1.2.2. The highest average temperature of each winding is calculated in accordance with Sub-clauses 2.1.3, 2.1.4 and 2.1.5 and shall not exceed the maximum permissible values given in Table III.

2.2 Dynamic ability to withstand short circuit

2.2.1 General

According to this standard, the dynamic ability to withstand short circuit is demonstrated by tests or by reference to tests on similar transformers.

Short-circuit tests are special tests (see Publication 76-1, Sub-clause 3.11.3) carried out in accordance with the following sub-clauses.

Transformers of category III normally cannot be tested in accordance with this standard.

The conditions of tests on transformers with more than two windings and auto-transformers are always subject to agreement between the manufacturer and the purchaser.

2.2.2 Condition of the transformer before the short-circuit tests

2.2.2.1 Unless otherwise agreed, the tests are carried out on a new transformer ready for service. The mounting of accessories having no influence on the behaviour during short circuit (e.g. detachable cooling equipment) is not required.

2.2.2.2 Préalablement aux essais de court-circuit, le transformateur doit avoir subi les essais individuels spécifiés dans la Publication 76-1.

Si les enroulements sont munis de prises, la réactance et éventuellement la résistance doivent avoir été mesurées pour les positions correspondant aux prises sur lesquelles les essais de court-circuit seront exécutés.

Toutes les mesures de réactances doivent être reproductibles avec un écart inférieur à $\pm 0,2\%$.

Un compte rendu mentionnant les résultats des essais individuels doit être disponible dès le début des essais de court-circuit.

2.2.2.3 Au commencement des essais de court-circuit, la température moyenne des enroulements doit être comprise entre 0 °C et 40 °C.

2.2.3 Valeur de crête i pour les transformateurs à deux enroulements

L'amplitude i de la première crête du courant asymétrique d'essai est calculée comme suit:

$$i = Ik\sqrt{2} \quad (5)$$

où le courant de court-circuit symétrique I est déterminé conformément aux paragraphes 1.2.1.2 et 2.1.2.

Le facteur $k\sqrt{2}$ dépend du rapport X/R , où:

X est la somme des réactances du transformateur et du réseau ($X_t + X_s$), en ohms

R est la somme des résistances du transformateur et du réseau ($R_t + R_s$), en ohms

Sauf spécification contraire, le facteur $k\sqrt{2}$ est limité à $1,8\sqrt{2} = 2,55$.

Le tableau V donne les facteurs à utiliser pour différentes valeurs de X/R .

TABLEAU V

Valeurs du facteur $k\sqrt{2}$

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	≥ 14
$k\sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55
<i>Note.</i> — Pour d'autres valeurs de X/R comprises entre 1 et 14, le facteur $k\sqrt{2}$ peut être déterminé par interpolation linéaire.										

Pour les transformateurs de la catégorie I et pour $Z_s \leq 0,05 Z_t$ (voir les paragraphes 1.2.1.2 et 2.1.2), X et R se rapportent au transformateur seul (X_t et R_t). Par contre pour $Z_s > 0,05 Z_t$, X et R se rapportent au transformateur et au réseau ($X_t + X_s$ et $R_t + R_s$).

Note. — Lorsque $Z_s \leq 0,05 Z_t$, on peut utiliser pour la prise principale u_x et u_r au lieu de X_t et R_t (en ohms), où:

u_x est la composante réactive de u_z , en pour-cent

u_r est la composante résistive, à la température de référence, de u_z , en pour-cent

u_z est la tension de court-circuit du transformateur, à la température de référence, en pour-cent

2.2.4 Valeur et durée du courant d'essai au court-circuit pour les transformateurs à deux enroulements

Le courant asymétrique dont la première crête est d'amplitude i (paragraphe 2.2.3) se transformera (si la durée de l'essai au court-circuit est suffisante) en courant symétrique I (paragraphe 2.1.2).

La valeur de crête du courant obtenue pendant l'essai ne doit pas s'écarter de plus de 5% de celle spécifiée, ni le courant symétrique de plus de 10%. La durée du courant pour les essais de court-circuit est spécifiée au paragraphe 2.2.5.4.

2.2.2.2 Prior to the short-circuit tests, the transformer shall be subjected to the routine tests which are specified in Publication 76-1.

If the windings are provided with tapplings, the reactance and, if required, the resistance also have to be measured for the tapping positions at which short-circuit tests will be carried out.

All the reactance measurements shall be to a reproducibility of at least $\pm 0.2\%$.

A report containing the results of the routine tests shall be available at the beginning of the short-circuit tests.

2.2.2.3 At the beginning of the short-circuit tests, the average temperature of the windings shall be between 0°C and 40°C

2.2.3 Peak value i for two-winding transformers

The amplitude i of the first peak of the asymmetrical test current is calculated as follows:

$$i = Ik\sqrt{2} \quad (5)$$

where the symmetrical short-circuit current I is determined in accordance with Sub-clauses 1.2.1.2 and 2.1.2.

The factor $k\sqrt{2}$ depends on the ratio X/R , where:

X is the sum of the reactances of the transformer and the system ($X_t + X_s$), in ohms

R is the sum of the resistances of the transformer and the system ($R_t + R_s$), in ohms

Unless otherwise specified, the factor $k\sqrt{2}$ is limited to $1.8\sqrt{2} = 2.55$.

Table V specifies the factors to be used for different values of X/R .

TABLE V
Values of factor $k\sqrt{2}$

X/R	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10	≥ 14
$k\sqrt{2}$	1.51	1.64	1.76	1.95	2.09	2.19	2.27	2.38	2.46	2.55
Note. — For other values of X/R between 1 and 14, the factor $k\sqrt{2}$ may be determined by linear interpolation.										

For transformers of category I and $Z_s \leq 0.05 Z_t$ (see Sub-clauses 1.2.1.2 and 2.1.2), X and R are related to the transformer only (X_t and R_t). For $Z_s > 0.05 Z_t$, on the other hand, X and R are related to the transformer and the system ($X_t + X_s$ and $R_t + R_s$).

Note. — When $Z_s \leq 0.05 Z_t$, instead of X_t and R_t (in ohms) u_x and u_r may be used for the principal tapping, where:

u_x is the reactive component of u_z , in per cent

u_r is the resistance component, at reference temperature, of u_z , in per cent

u_z is the impedance voltage of the transformer, at reference temperature, in per cent

2.2.4 Value and duration of the short-circuit test current for two-winding transformers

The asymmetrical current having a first peak of amplitude i (Sub-clause 2.2.3) will change (if the duration of the short-circuit test current is sufficiently long) into the symmetrical current I (Sub-clause 2.1.2).

The peak value of the current obtained in testing shall not deviate by more than 5% and the symmetrical current by more than 10% from the specified value. The duration of the current for short-circuit tests is specified in Sub-clause 2.2.5.4.

2.2.5 Conduite des essais de court-circuit pour les transformateurs à deux enroulements

2.2.5.1 Pour obtenir le courant d'essai prévu au paragraphe 2.2.4, la tension à vide de la source peut être plus élevée que la tension nominale de l'enroulement alimenté. La mise en court-circuit de l'enroulement peut, soit suivre, soit précéder (court-circuit préétabli) la mise sous tension de l'autre enroulement du transformateur.

Dans le premier cas, la tension ne doit pas dépasser 1,15 fois la tension nominale de l'enroulement.

Si la méthode du court-circuit préétabli est utilisée pour des transformateurs à enroulements concentriques simples, l'alimentation doit se faire par l'enroulement le plus éloigné du noyau, l'enroulement le plus près étant court-circuité de façon à éviter la saturation du noyau magnétique qui pourrait entraîner un appel de courant magnétisant excessif superposé au courant de court-circuit pendant les premières périodes.

Pour les transformateurs à enroulements alternés ou les transformateurs à enroulements concentriques doubles, la méthode du court-circuit préétabli n'est à utiliser qu'après accord entre le constructeur et l'acheteur.

2.2.5.2 Pour obtenir la valeur de la crête initiale du courant (paragraphe 2.2.3) dans l'enroulement de la phase en essai, l'instant d'enclenchement doit être réglé avec un enclencheur synchrone.

Pour vérifier les valeurs des courants d'essai i et I , on doit enregistrer ceux-ci à l'aide d'un oscillographe. Pour obtenir l'asymétrie maximale du courant dans un des enroulements de phase, l'enclenchement doit se produire au moment du passage à zéro de la tension appliquée à cet enroulement.

Notes 1. — Pour les enroulements connectés en étoile, l'asymétrie maximale est obtenue en enclenchant lorsque la tension de phase passe par zéro. Le facteur k de la valeur de crête i peut être déterminé à partir des oscillogrammes des courants de ligne. Pour les essais triphasés sur des enroulements connectés en triangle, cette condition est réalisée en enclenchant lorsque la tension entre phases passe par zéro. Une des méthodes de détermination du facteur k consiste à enclencher pendant les essais de réglage préliminaires lorsque la tension entre phases passe par son maximum. Dans ce cas, on trouve le facteur k à partir des oscillogrammes des courants de ligne.

Une autre méthode pour déterminer les courants de phase d'un enroulement connecté en triangle consiste à coupler, de façon adéquate, les enroulements secondaires des transformateurs de courant mesurant les courants de ligne. On peut faire en sorte que l'oscillographe enregistre les courants de phase.

2. — Pour les transformateurs à couplage étoile-zigzag de la catégorie I et à réglage à flux constant, ayant une valeur $u_x/u_r \leq 3$ (voir le paragraphe 2.2.3), les trois phases sont enclenchées simultanément sans utiliser d'enclencheur synchrone. Pour les autres transformateurs à couplage étoile-zigzag, les modalités d'enclenchement doivent faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

2.2.5.3 Pour les transformateurs triphasés, on doit utiliser une source d'alimentation triphasée pour autant que les prescriptions du paragraphe 2.2.4 peuvent être respectées. Sinon, on peut utiliser une source monophasée comme indiqué ci-dessous. Pour les enroulements connectés en triangle, la source monophasée est branchée entre deux sommets du triangle et la tension d'essai est la même que celle qu'il y aurait entre phases dans un essai triphasé. Pour les enroulements connectés en étoile, la source monophasée est branchée entre une borne de ligne et l'ensemble des deux autres réunies entre elles. La tension monophasée d'essai est égale à $\sqrt{3}/2$ fois la tension qu'il y aurait entre phases dans un essai triphasé.

Notes 1. — Les essais avec une alimentation monophasée s'appliquent principalement aux transformateurs des catégories II et III, et présentent rarement un intérêt pour les transformateurs de la catégorie I.

2. — Pour les enroulements connectés en étoile et à isolation non uniforme, il convient de s'assurer que l'isolement du neutre est suffisant pour un essai en monophasé.
3. — Si, pour des enroulements connectés en étoile, on ne dispose pas d'une puissance suffisante pour faire l'essai en monophasé tel que décrit ci-dessus, et si le neutre est sorti, le constructeur et l'acheteur peuvent convenir de faire un essai monophasé avec alimentation entre une borne de ligne et le neutre.

2.2.5.4 En l'absence de spécification particulière, le nombre d'essais pour les transformateurs monophasés ou triphasés est déterminé comme suit, compte non tenu des essais préliminaires de réglage exécutés à moins de 70% du courant spécifié et faits pour s'assurer du déroulement correct de l'essai en ce qui concerne l'instant d'enclenchement, l'ajustage du courant, l'amortissement et la durée.

Pour les transformateurs monophasés de la catégorie I, le nombre d'essais doit être de trois, la durée de chacun étant égale à 0,5 s avec une tolérance $\pm 10\%$. Sauf spécification contraire, pour les transformateurs monophasés avec prises, chacun des trois essais est fait sur une position différente du changeur de prises soit: un essai sur la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé, un essai sur la prise principale et un essai sur la position correspondant au rapport de transformation le plus bas.

2.2.5 Short-circuit testing procedure for transformers with two windings

2.2.5.1 In order to obtain a test current according to Sub-clause 2.2.4, the no-load voltage of the source may be higher than the rated voltage of the winding supplied. The short-circuiting of the winding may either follow or precede (pre-set short circuit) the application of the voltage to the other winding of the transformer.

In the first case, the voltage shall not exceed 1.15 times the rated voltage of the winding.

If the pre-set short circuit is used for transformers with single-concentric windings, the supply should be connected to the winding further from the core, the winding nearer to the core being short-circuited in order to avoid saturation of the magnetic core, which could result in an excessive flow of magnetizing current being superimposed on the short-circuit current during the first few cycles.

For transformers with sandwich windings or transformers with double-concentric windings, the pre-set short-circuit method shall be used only after agreement between the manufacturer and the purchaser.

2.2.5.2 To obtain the initial peak value of the current (Sub-clause 2.2.3) in the phase winding under test, the moment of switching on shall be adjusted by means of a synchronous switch.

In order to check the values of the test currents i and I , these currents shall always be recorded by an oscillograph. In order to obtain the maximum asymmetry of the current in one of the phase windings, the switching-on must occur at the moment the voltage of this winding passes through zero.

Notes 1. — For star-connected windings, the maximum asymmetry is obtained by switching on when the phase voltage passes through zero. The factor k of the peak value i can be determined from the oscillograms of the line currents. For three-phase tests on delta-connected windings, this condition is obtained by switching on when the line-to-line voltage passes through zero. One of the methods of determining the factor k is by switching on during the preliminary adjustment tests at a maximum of the line-to-line voltage. In this case, the factor k is found from the oscillograms of the line currents.

Another method for determining the phase currents in a delta-connected winding is by suitably interconnecting the secondary windings of the current transformers measuring the line currents. The oscillograph can be made to record the phase currents.

2. — For transformers with star-zigzag connection belonging to category I and with constant flux voltage variation, having a value for $u_x/u_r \leq 3$ (see Sub-clause 2.2.3), the three phases are switched on simultaneously without the use of a synchronous switch. For other transformers with star-zigzag connection, the method of switching on is subject to agreement between the manufacturer and the purchaser.

2.2.5.3 For three-phase transformers, a three-phase supply should be used, as long as the requirements in Sub-clause 2.2.4 can be met. If this is not the case, a single-phase supply, as described below, may be used. For delta-connected windings, the single-phase supply is provided between two corners of the delta and the voltage during the test has to be the same as the voltage between phases during a three-phase test. For star-connected windings, the single-phase voltage is supplied between one line terminal and the other two line terminals connected together. The single-phase voltage during the test has to be equal to $\sqrt{3}/2$ times the voltage between phases during a three-phase test.

Notes 1. — The use of the tests with single-phase supply applies mainly to transformers of category II or III and is seldom of interest for category I transformers.

2. — For star-connected windings with non-uniform insulation, it is necessary to check whether or not the insulation of the neutral is sufficient for single-phase testing.
3. — If, for star-connected windings, the power supply is insufficient for the single-phase testing described above and the neutral is available, the manufacturer and the purchaser may agree upon the use of single-phase tests between a line terminal and the neutral.

2.2.5.4 In the absence of any particular specification, the number of tests on three-phase and single-phase transformers is determined as follows, not including preliminary adjustment tests carried out at less than 70% of the specified current to check the proper functioning of the test set-up with regard to the moment of switching on, the current setting, the damping and the duration.

For category I single-phase transformers, the number of tests shall be three, the duration of each test being 0.5 s with a tolerance of $\pm 10\%$. Unless otherwise specified, each of the three tests on a single-phase transformer with tapplings is made in a different position of the tap-changer, i.e., one test in the position corresponding to the highest voltage ratio, one test on the principal tapping and one test in the position corresponding to the lowest voltage ratio.

Pour les transformateurs triphasés de la catégorie I, le nombre total d'essais doit être de neuf, à raison de trois sur chaque colonne, la durée de chaque essai étant de 0,5 s avec une tolérance de $\pm 10\%$. Sauf spécification contraire, les essais sur chacune des colonnes pour les transformateurs à prises sont faits sur des positions différentes du changeur de prises soit: trois essais sur la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé sur l'une des colonnes extrêmes, trois essais sur la prise principale sur la colonne du milieu et trois essais sur la position correspondant au rapport de transformation le plus bas sur l'autre des colonnes extrêmes.

Pour les transformateurs des catégories II et III, le constructeur et l'acheteur devront chaque fois convenir du nombre d'essais, de leur durée et des positions du changeur de prises.

2.2.6 Détection des défauts et sanction des essais au court-circuit

2.2.6.1 Avant les essais de court-circuit, on doit effectuer les essais et mesures mentionnés au paragraphe 2.2.2 et on doit inspecter le dispositif de protection par détection de gaz (si le transformateur en est muni). Ces essais et mesures sont destinés à servir de référence pour la détection des défauts.

2.2.6.2 Pendant chaque essai (y compris les essais préliminaires), on doit enregistrer à l'oscillographe:

- la tension appliquée (entre les bornes de ligne);
- les courants (voir les notes après le paragraphe 2.2.5.2).

Ensuite, on doit procéder à un examen visuel du transformateur essayé.

Note. — On peut utiliser des moyens de détection supplémentaires, par exemple enregistrement oscillographique des flux de fuite radiaux au moyen de bobines auxiliaires, indications données par les bruits et, en particulier, enregistrement du courant entre la cuve (isolée) et la terre.

2.2.6.3 Après chaque essai, on examine les oscillogrammes pris pendant l'essai ainsi que les dispositifs de protection par détection de gaz. Il est nécessaire de mesurer la réactance de court-circuit après chaque essai.

Notes 1. — On peut utiliser des moyens de détection supplémentaires tels que mesure de résistance, comparaison d'oscillogrammes de tensions de choc par rapport à ceux pris à l'état initial (méthode des chocs basse tension), essai à vide (pour détecter un court-circuit entre spires).

2. — Toute différence entre les résultats d'une mesure faite avant et après l'essai peut être l'indice d'un défaut possible. Il est particulièrement important de suivre tout au long des essais successifs les variations de la réactance mesurée après chaque essai, variations qui peuvent être continues ou qui peuvent tendre vers une valeur stable.

2.2.6.4 Après achèvement des essais, le transformateur et, s'il y en a un, le dispositif de protection par détection de gaz, doivent être inspectés. Les résultats des mesures de réactance de court-circuit et les oscillogrammes pris aux différents stades des essais doivent être examinés pour y rechercher toute indication d'anomalie éventuelle pendant les essais, et notamment toute indication de variation de la réactance de court-circuit.

A ce stade, des procédures différentes sont suivies selon que le transformateur est de catégorie I ou de catégorie II ou III (voir les points a) et b)):

a) Transformateurs de catégorie I

On doit répéter tous les essais individuels.

Les essais diélectriques individuels doivent être faits à 75% de la valeur d'essai initiale à moins qu'une valeur plus élevée n'ait été adoptée par accord entre constructeur et acheteur.

Le transformateur doit alors être décuvé pour inspection de la partie active, afin de déceler des défauts visibles éventuels tels que des changements de position de connexions qui, malgré des essais individuels satisfaisants, pourraient mettre en danger la sécurité de fonctionnement du transformateur.

Le transformateur est estimé avoir subi avec succès les essais de court-circuit si premièrement les essais individuels ont été répétés avec succès, deuxièmement les résultats des essais de court-circuit, les mesures durant les essais de court-circuit et l'inspection après décuvage ne révèlent aucun défaut (déplacements, déformations d'enrou-