# IEC 60076-18

Edition 1.0 2012-07

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE

colour inside

## Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response

## Transformateurs de puissance – Partie 18: Mesure de la réponse en fréquence

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

X

ICS 29.180

ISBN 978-2-83220-222-7

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.**
**Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

# CONTENTS

FOREWORD ..... 5
1 Scope ..... 7
2 Terms and definitions ..... 7
3 Purpose of frequency response measurements ..... 8
4 Measurement method ..... 9
4.1 General ..... 9
4.2 Condition of the test object during measurement ..... 10
4.3 Measurement connection and checks ..... 11
4.3.1 Measurement connection and earthing ..... 11
4.3.2 Zero-check measurement ..... 11
4.3.3 Repeatability check ..... 11
4.3.4 Instrument performance check ..... 11
4.4 Measurement configuration ..... 12
4.4.1 General ..... 12
4.4.2 Principles for choosing the measurement configuration ..... 12
4.4.3 Star- and auto-connected windings with a neutral terminal ..... 13
4.4.4 Delta windings and other windings without an accessible neutral ..... 13
4.4.5 Zig-zag connected windings ..... 14
4.4.6 Two-winding three-phase transformers ..... 14
4.4.7 Three-phase auto-transformers ..... 14
4.4.8 Phase shifting transformers ..... 14
4.4.9 Reactors ..... 14
4.4.10 Method for specifying additional measurements ..... 14
4.5 Frequency range and measurement points for the measurement ..... 15
5 Measuring equipment ..... 15
5.1 Measuring instrument ..... 15
5.1.1 Dynamic range ..... 15
5.1.2 Amplitude measurement accuracy ..... 16
5.1.3 Phase measurement accuracy ..... 16
5.1.4 Frequency range ..... 16
5.1.5 Frequency accuracy ..... 16
5.1.6 Measurement resolution bandwidth ..... 16
5.1.7 Operating temperature range ..... 16
5.1.8 Smoothing of recorded data ..... 16
5.1.9 Calibration ..... 16
5.2 Measurement leads ..... 16
5.3 Impedance ..... 17
6 Measurement records ..... 17
6.1 Data to be recorded for each measurement ..... 17
6.2 Additional information to be recorded for each set of measurements ..... 18
Annex A (normative) Measurement lead connections ..... 20
Annex B (informative) Frequency response and factors that influence the measurement ..... 23
Annex C (informative) Applications of frequency response measurements ..... 37

Annex D (informative) Examples of measurement configurations ..... 39
Annex E (informative) XML data format ..... 43
Bibliography ..... 44

Figure 1 – Example schematic of the frequency response measurement circuit ..... 10
Figure A.1 – Method 1 connection ..... 21
Figure A.2 – Method 3 connection ..... 22
Figure B.1 – Presentation of frequency response measurements ..... 23
Figure B.2 – Comparison with a baseline measurement ..... 24
Figure B.3 – Comparison of the frequency responses of twin transformers ..... 24
Figure B.4 – Comparison of the frequency responses from sister transformers ..... 25
Figure B.5 – Comparison of the frequency responses of three phases of a winding ..... 25
Figure B.6 – General relationships between frequency response and transformer structure and measurement set-up for HV windings of large auto-transformer ..... 27
Figure B.7 – Effect of tertiary delta connection on the frequency response of a series winding ..... 28
Figure B.8 – Effect of star neutral connection on the tertiary winding response ..... 29
Figure B.9 – Effect of star neutral termination on series winding response ..... 29
Figure B.10 – Measurement results showing the effect of differences between phases in internal leads connecting the tap winding and OLTC ..... 30
Figure B.11 – Effect of measurement direction on frequency response ..... 30
Figure B.12 – Effect of different types of insulating fluid on frequency response ..... 31
Figure B.13 – Effect of oil filling on frequency response ..... 31
Figure B.14 – Effect of a DC injection test on the frequency response ..... 32
Figure B.15 – Effect of bushings on frequency response ..... 32
Figure B.16 – Effect of temperature on frequency response ..... 33
Figure B.17 – Examples of bad measurement practice ..... 34
Figure B.18 – Frequency response of a tap winding before and after partial axial collapse and localised inter-turn short-circuit with a photograph of the damage ..... 34
Figure B.19 – Frequency response of an LV winding before and after axial collapse due to clamping failure with a photograph of the damage [8] ..... 35
Figure B.20 – Frequency response of a tap winding with conductor tilting with a photograph of the damage [1] ..... 36
Figure D.1 – Winding diagram of an auto-transformer with a line-end tap changer ..... 40
Figure D.2 – Connection diagram of an inductive inter-winding measurement on a three-phase YNd1 transformer ..... 41
Figure D.3 – Connection diagram for a capacitive inter-winding measurement on a three-phase YNd1 transformer ..... 42
Figure D.4 – Connection diagram for an end-to-end short-circuit measurement on a three-phase YNd1 transformer ..... 42

Table 1 – Standard measurements for a star connected winding with taps ..... 13
Table 2 – Standard measurements for delta connected winding without tap ..... 14
Table 3 – Format for specifying additional measurements ..... 15
Table D.1 – Standard end-to-end measurements on a three-phase auto-transformer ..... 39
Table D.2 – Tap-changer connections ..... 40

Table D.3 – Inductive inter-winding measurements on a three-phase YNd1 transformer.....41
Table D.4 – Capacitive inter-winding measurements on a three-phase YNd1 transformer.....41
Table D.5 – End-to-end short-circuit measurements on a three-phase YNd1 transformer.....42

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

# POWER TRANSFORMERS –

## Part 18: Measurement of frequency response

## FOREWORD

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

International Standard IEC 60076-18 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

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

| FDIS | Report on voting |
|---|---|
| 14/718/FDIS | 14/728/RVD |

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

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

A list of all parts of the IEC 60076 series can be found, under the general title *Power transformers*, on the IEC website.

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

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

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

# POWER TRANSFORMERS –

# Part 18: Measurement of frequency response

## 1 Scope

This part of the IEC 60076 series covers the measurement technique and measuring equipment to be used when a frequency response measurement is required either on-site or in the factory either when the test object is new or at a later stage. Interpretation of the result is not part of the normative text but some guidance is given in Annex B. This standard is applicable to power transformers, reactors, phase shifting transformers and similar equipment.

# SOMMAIRE

AVANT-PROPOS ..... 49
1 Domaine d'application ..... 51
2 Termes et définitions ..... 51
3 Objectif des mesures de réponse en fréquence ..... 52
4 Méthode de mesure ..... 53
4.1 Généralités ..... 53
4.2 État de l'objet soumis à essai pendant la mesure ..... 54
4.3 Connexions de mesure et contrôles ..... 55
4.3.1 Connexions de mesure et de mise à la terre ..... 55
4.3.2 Mesure de contrôle de zéro ..... 55
4.3.3 Contrôle de répétabilité ..... 56
4.3.4 Contrôle de performance de l'instrument ..... 56
4.4 Configuration de la mesure ..... 56
4.4.1 Généralités ..... 56
4.4.2 Principes de choix de la configuration de mesure ..... 56
4.4.3 Enroulements en étoile et auto-connectés avec une borne de neutre ..... 57
4.4.4 Enroulements en triangle et autres enroulements sans neutre accessible ..... 58
4.4.5 Enroulements connectés en zigzag ..... 58
4.4.6 Transformateurs triphasés à deux enroulements ..... 58
4.4.7 Autotransformateurs triphasés ..... 59
4.4.8 Transformateur déphaseurs ..... 59
4.4.9 Bobines d'inductance ..... 59
4.4.10 Méthode de spécification de mesures complémentaires ..... 59
4.5 Plage de fréquences et points de mesure pour la mesure ..... 59
5 Appareillage de mesure ..... 60
5.1 Instrument de mesure ..... 60
5.1.1 Plage dynamique ..... 60
5.1.2 Précision de la mesure d'amplitude ..... 60
5.1.3 Précision de la mesure de phase ..... 60
5.1.4 Plage de fréquences ..... 60
5.1.5 Précision de la fréquence ..... 60
5.1.6 Résolution de la mesure sur la bande passante ..... 60
5.1.7 Plage de températures de fonctionnement ..... 61
5.1.8 Lissage des données enregistrées ..... 61
5.1.9 Étalonnage ..... 61
5.2 Câbles de mesure ..... 61
5.3 Impédance ..... 61
6 Enregistrements des mesures ..... 61
6.1 Données à enregistrer pour chaque mesure ..... 61
6.2 Informations supplémentaires à enregistrer pour chaque ensemble de mesures ..... 62
Annexe A (normative) Connexions des câbles de mesure ..... 65
Annexe B (informative) Réponse en fréquence et facteurs ayant une influence sur la mesure ..... 68

Annexe C (informative) Applications des mesures de réponse en fréquence ..... 83
Annexe D (informative) Exemples de configurations de mesure ..... 85
Annexe E (informative) Format de données XML ..... 89
Bibliographie ..... 90

Figure 1 – Exemple de schéma du circuit de mesure de réponse en fréquence ..... 54
Figure A.1 – Connexion selon la méthode 1 ..... 66
Figure A.2 – Connexion selon la méthode 3 ..... 67
Figure B.1 – Présentations des mesures de réponse en fréquence ..... 68
Figure B.2 – Comparaison avec une mesure de référence ..... 69
Figure B.3 – Comparaison des réponses en fréquence de transformateurs identiques ..... 69
Figure B.4 – Comparaison des réponses en fréquence de transformateurs semblables ..... 70
Figure B.5 – Comparaison des réponses en fréquence des trois phases d'un enroulement ..... 70
Figure B.6 – Relations générales entre la réponse en fréquence, la structure du transformateur et l'installation de mesure pour les enroulements HT d'un grand autotransformateur ..... 72
Figure B.7 – Effet d'une connexion en triangle tertiaire sur la réponse en fréquence d'un enroulement série ..... 73
Figure B.8 – Effet d'une connexion de neutre en étoile sur la réponse de l'enroulement tertiaire ..... 74
Figure B.9 – Effet de la terminaison de neutre en étoile sur la réponse de l'enroulement série ..... 75
Figure B.10 – Résultats de mesure montrant l'effet des différences entre les phases des câbles internes reliant l'enroulement de prise et le changeur de prises en charge (OLTC) ..... 76
Figure B.11 – Effet du sens de la mesure sur la réponse en fréquence ..... 76
Figure B.12 – Effet de différents types de fluide d'isolation sur la réponse en fréquence ..... 77
Figure B.13 – Effet du remplissage d'huile sur la réponse en fréquence ..... 77
Figure B.14 – Effet d'un essai d'injection de courant continu sur la réponse en fréquence ..... 78
Figure B.15 – Effet des traversées sur la réponse en fréquence ..... 78
Figure B.16 – Effet de la température sur la réponse en fréquence ..... 79
Figure B.17 – Exemples de mauvaise pratique de mesure ..... 80
Figure B.18 – Réponse en fréquence d'un enroulement de prise avant et après affaissement axial partiel et court-circuit localisé entre spires avec une photographie du dommage ..... 80
Figure B.19 – Réponse en fréquence d'un enroulement BT avant et après affaissement axial dû à un défaut de serrage avec une photographie du dommage [8] ..... 81
Figure B.20 – Réponse en fréquence d'un enroulement de prise avec connexion basculée avec une photographie du dommage [1] ..... 82
Figure D.1 – Schéma des enroulements d'un autotransformateur avec un changeur de prise d'extrémité de ligne ..... 86
Figure D.2 – Schéma de connexion d'une mesure inductive entre enroulements sur un transformateur triphasé YNd1 ..... 87
Figure D.3 – Schéma de connexion d'une mesure capacitive entre enroulements sur un transformateur triphasé YNd1 ..... 88

Figure D.4 – Schéma de connexion pour une mesure entre extrémités avec court-circuit sur un transformateur triphasé YNd1 ..... 88

Tableau 1 – Mesures normales pour un enroulement connecté en étoile avec des prises ..... 58
Tableau 2 – Mesures normales pour un enroulement connecté en triangle sans prise ..... 58
Tableau 3 – Format de spécification de mesures complémentaires ..... 59
Tableau D.1 – Mesures normales entre extrémités sur un autotransformateur triphasé ..... 85
Tableau D.2 – Connexions d'un changeur de prise ..... 86
Tableau D.3 – Mesures inductives entre enroulements sur un transformateur triphasé YNd1 ..... 87
Tableau D.4 – Mesures capacitives entre enroulements sur un transformateur triphasé YNd1 ..... 87
Tableau D.5 – Mesures entre extrémités avec court-circuit sur un transformateur triphasé YNd1 ..... 88

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

# TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

## Partie 18: Mesure de la réponse en fréquence

## AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 60076-18 a été préparée par le Comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

| FDIS | Rapport de vote |
|---|---|
| 14/718/FDIS | 14/728/RVD |

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

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60076, présentées sous le titre général *Transformateurs de puissance,* peut être consultée sur le site web de la CEI.

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

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

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

# TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

# Partie 18: Mesure de la réponse en fréquence

## 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 couvre la technique de mesure et l'appareillage de mesure à utiliser lorsqu'une mesure de réponse en fréquence est requise, soit sur site, soit en usine, lorsque l'objet à soumettre à essai est neuf ou à un stade plus avancé. L'interprétation du résultat ne fait pas partie du texte normatif mais des directives sont données à l'Annexe B. La présente norme est applicable aux transformateurs de puissance, bobines d'inductance, transformateurs déphaseurs et appareillages similaires.