

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



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

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



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2012 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

IEC Central Office  
3, rue de Varembé  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### About the IEC

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

### About IEC publications

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

#### Useful links:

IEC publications search - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch).

### A propos de la CEI

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

### A propos des publications CEI

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

#### Liens utiles:

Recherche de publications CEI - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

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

Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch).



IEC 60076-18

Edition 1.0 2012-07

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



**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



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.**

# 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.

#### 2 Terms and definitions

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

##### 2.1

##### **frequency response**

amplitude ratio and phase difference between the voltages measured at two terminals of the test object over a range of frequencies when one of the terminals is excited by a voltage source

Note 1 to entry: The frequency response measurement result is a series of amplitude ratios and phase differences at specific frequencies over a range of frequency.

Note 2 to entry: The measured voltage is the voltage developed across an impedance and so it is also related to current.

##### 2.2

##### **frequency response analysis**

##### **FRA**

technique used to detect damage by the use of frequency response measurements

Note 1 to entry: The terms SFRA and IFRA are commonly used and refer to the use of either a swept frequency voltage source or an impulse voltage source. Provided the measuring equipment complies with the requirements of Clause 5, this standard can be applied to both techniques.

##### 2.3

##### **source lead**

lead connected to the voltage source of the measuring instrument used to supply an input voltage to the test object

##### 2.4

##### **reference lead**

$V_{in}$

lead connected to the reference channel of the measuring instrument used to measure the input voltage to the test object

##### 2.5

##### **response lead**

$V_{out}$

lead connected to the response channel of the measuring instrument used to measure the output voltage of the test object

**2.6****end-to-end measurement**

frequency response measurement made on a single coil (phase winding) with the source and reference ( $V_{in}$ ) leads connected to one end and the response ( $V_{out}$ ) lead connected to the other end

**2.7****capacitive inter-winding measurement**

frequency response measurement made on two adjacent coils (windings of the same phase) with the source and reference ( $V_{in}$ ) leads connected to one end of a winding, the response ( $V_{out}$ ) lead connected to one end of another winding and with the other winding ends floating

Note 1 to entry: This type of measurement is not applicable to windings which have common part or connection between them.

**2.8****inductive inter-winding measurement**

frequency response measurement made on two adjacent coils (windings of the same phase) with the source and reference ( $V_{in}$ ) leads connected to one end of the higher voltage winding, the response ( $V_{out}$ ) lead connected to one end of the other winding and with the other ends of both windings grounded

**2.9****end-to-end short circuit measurement**

frequency response measurement made on a single coil (phase winding) with the source and reference ( $V_{in}$ ) leads connected to one end, the response ( $V_{out}$ ) lead connected to the other end, and another winding of the same phase short-circuited

**2.10****baseline measurement**

frequency response measurement made on a test object to provide a basis for comparison with a future measurement on the same test object in the same configuration

**3 Purpose of frequency response measurements**

Frequency response measurements are made so that Frequency Response Analysis (FRA) can be carried out. FRA can be used to detect changes to the active part of the test object (windings, leads and core).

NOTE FRA is generally used to detect geometrical changes and electrical short-circuits in the windings, see Annex B.

Some examples of conditions that FRA can be used to assess are:

- damage following a through fault or other high current event (including short-circuit testing),
- damage following a tap-changer fault,
- damage during transportation, and
- damage following a seismic event.

Further information on the application of frequency response measurements is given in Annex C.

The detection of damage using FRA is most effective when frequency response measurement data is available from the transformer when it is in a known good condition (baseline measurement), so it is preferable to carry out the measurement on all large transformers either in the factory or when the transformer is commissioned at site or both. If a baseline

measurement is not available for a particular transformer, reference results may be obtained from either a similar transformer or another phase of the same transformer (see Annex B).

Frequency response measurements can also be used for power system modelling including transient overvoltage studies.

## 4 Measurement method

### 4.1 General

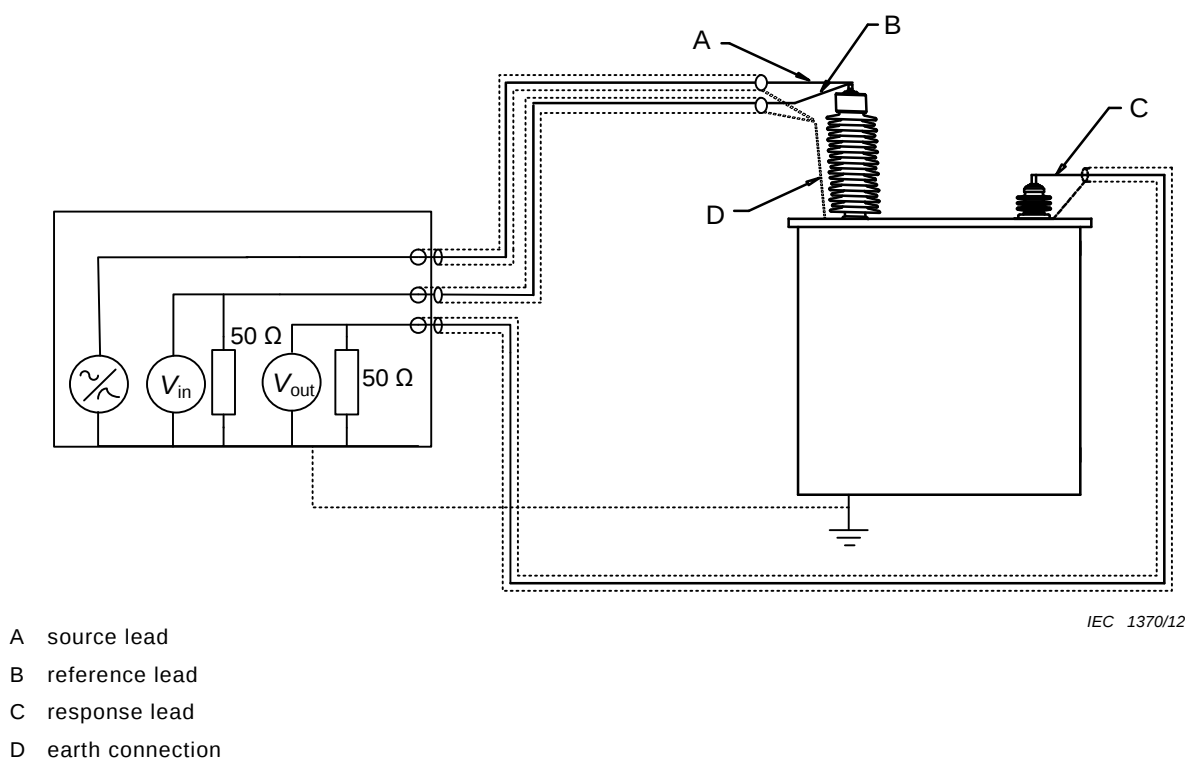
To make a frequency response measurement, a low voltage signal is applied to one terminal of the test object with respect to the tank. The voltage measured at this input terminal is used as the reference signal and a second voltage signal (the response signal) is measured at a second terminal with reference to the tank. The frequency response amplitude is the scalar ratio between the response signal ( $V_{out}$ ) and the reference voltage ( $V_{in}$ ) (presented in dB) as a function of the frequency. The phase of the frequency response is the phase difference between  $V_{in}$  and  $V_{out}$  (presented in degrees).

The response voltage measurement is made across an impedance of  $50\ \Omega$ . Any coaxial lead connected between the test object terminal and the voltage measuring instrument shall have a matched impedance. To make an accurate ratio measurement, the technical parameters of the reference and response channels of the measuring instrument and any measurement leads shall be identical.

NOTE 1 The characteristic impedance of the coaxial measuring leads is chosen to match the measuring channel input impedance to minimise signal reflections and reduce the influence of the coaxial lead on the measurement to the point where it has little or no practical effect on the measurement within the measurement frequency range. With a matched impedance lead, the measuring impedance is effectively applied at the test object terminal.

NOTE 2 As  $V_{out}/V_{in}$  varies over a wide range, it is expressed in decibels (dB). The relative voltage response in dB is calculated as  $20 \times \log_{10}(V_{out}/V_{in})$ , where  $(V_{out}/V_{in})$  is the scalar ratio.

An example of the general layout of the measurement method using coaxial measuring leads is shown in Figure 1.



**Figure 1 – Example schematic of the frequency response measurement circuit**

## 4.2 Condition of the test object during measurement

For factory and site measurements, the test object shall be fully assembled as for service complete with all bushings, but coolers and related auxiliaries do not need to be assembled. Liquid or gas filled transformers and reactors shall be filled with liquid or gas of the same type (similar relative permittivity) as that which is to be used in service. All busbars or other system or test connections shall be removed and there shall be no connections to the test object other than those being used for the specific measurement being performed. If internal current transformers are installed but not connected to a protection or measurement system, the secondary terminals shall be shorted and earthed. The core and frame to tank connections shall be complete and the tank shall be connected to earth.

If the transformer is not assembled in the factory in the service condition, for example if oil/air bushings are used in the factory and oil/SF<sub>6</sub> bushings are to be used in service then the FRA baseline measurement can only be performed at site. Transport configuration measurements may still be possible see below.

If special connections have been specified by the purchaser and are provided on the test object to enable a frequency response measurement to be made when it is arranged for transport, then additional measurements shall be made in the transport configuration (drained if required for transport) before transport and when delivered to site or as specified by the purchaser.

For site measurements, the test object shall be disconnected from the associated electrical system at all winding terminals and made safe for testing. Line, neutral and any tertiary line connections shall be disconnected but tank earth, auxiliary equipment and current transformer service connections shall remain connected. In the case where two connections to one corner of a delta winding are brought out, the transformer shall be measured with the delta closed (see also 4.4.4). In instances where it is impossible to connect directly to the terminal, then the connection details shall be recorded with the measurement data since the additional bus bars connected to the terminals may impact on the measurement results.

NOTE There may be a difference in the connection of current transformers (CTs) between measurements made on-site and those made in the factory, the change in frequency response between a transformer with shorted and earthed CTs and one with the CTs connected to a low impedance protection system is normally negligible.

If the transformer is directly connected to SF<sub>6</sub> insulated busbars then it may be possible to make the measurement by connecting to the disconnected earth connection of an earth switch. In this case, the measurement shall be made both directly on the terminals before the SF<sub>6</sub> busbar is assembled and using the earth switch.

When carried out in the factory, the measurement shall be conducted at approximately ambient temperature (for example not immediately following a temperature rise test). The temperature of the test object dielectric (normally top liquid temperature) during the measurement shall be recorded. For measurements made on-site the temperature is not controlled, and although extreme temperatures may have a minor effect this is normally not significant. The effect of temperature on frequency response measurements is illustrated in B.4.8.

It is recommended that if possible measurements on-site are not made whilst the test object temperature is changing rapidly for example immediately following oil treatment.

### **4.3 Measurement connection and checks**

#### **4.3.1 Measurement connection and earthing**

The methods of connection of the leads and lead earths to the test object are given in Annex A.

Poor connections can cause significant measurement errors, attention shall be paid to the continuity of the main and earth connections. The continuity of the main and earth connections shall be checked at the instrument end of the coaxial cable before the measurement is made. In particular, connections to bolts or flanges shall be verified to ensure that there is a good connection to the winding or the test object tank.

#### **4.3.2 Zero-check measurement**

If specified, a zero-check measurement shall be carried out as an additional measurement. Before measurements commence, all the measuring leads shall be connected to one of the highest voltage terminals and earthed using the normal method. A measurement is then made which will indicate the frequency response of the measurement circuit alone. The zero check measurement shall also be repeated on other voltage terminals if specified.

The zero-check measurement can provide useful information as to the highest frequency that can be relied upon for interpretation of the measurement. The zero-check measurement is not a calibration check and no attempt should be made to remove any deviations seen in the zero-check measurement from the measurement results.

#### **4.3.3 Repeatability check**

On completion of the standard measurements the measurement leads and earth connections shall be disconnected and then the first measurement shall be repeated and recorded.

This check is necessary to evaluate the repeatability and useable diagnostic frequency range under the specific conditions of the measurement.

#### **4.3.4 Instrument performance check**

To verify the performance of the instrument, one of the following three checks shall be made whenever the performance of the instrument is in doubt.

- a) Connect the source, reference and response channels of the instrument together using suitable low loss leads, check that the measured amplitude ratio is 0 dB  $\pm$  0,3 dB across the whole frequency range.

Connect the source and reference channels together and leave the response terminal open circuit, check that the measured amplitude ratio is less than -90 dB across the whole frequency range.

- b) The performance of the instrument may be checked by measuring the response of a known test object (test box) and checking that the measured amplitude ratio matches the expected response of the test object to within the requirements given in 5.1.2 over the whole frequency range. The test object shall have a frequency response that covers the attenuation range -10 dB to -80 dB.
- c) The correct operation of the instrument may be checked using a performance check procedure provided by the instrument manufacturer. This performance check procedure shall verify that the instrument is operating within the parameters given in 5.1.2 at least over an attenuation range of -10 dB to -80 dB over the whole frequency range.

## **4.4 Measurement configuration**

### **4.4.1 General**

For common transformer and reactor winding configurations, a standard set of measurements is given which is sufficient in the majority of cases to provide a baseline measurement. These measurements shall be made in all cases. Additional measurements may be specified if required either to provide some additional information under particular circumstances or to match previous measurements. Standard measurements on other types of transformers and reactors shall follow the following principles.

### **4.4.2 Principles for choosing the measurement configuration**

#### **4.4.2.1 Type of measurement**

The standard measurements shall be end-to-end measurements of each phase of each winding, with the phases and windings separated as far as possible and with all other terminals left floating. Additional measurements, where specified, can include capacitive inter-winding, inductive inter-winding, and end-to-end short circuit measurements.

#### **4.4.2.2 Tap-position**

For transformers and reactors with an on-load tap-changer (OLTC), the standard measurement on the tapped winding shall be

- a) on the tap-position with the highest number of effective turns in circuit, and
- b) on the tap-position with the tap winding out of circuit.

Other windings with a fixed number of turns shall be measured on the tap-position for the highest number of effective turns in the tap winding. Additional measurements may be specified at other tap-positions.

For auto-transformers with a line-end tap-changer, the standard measurements shall be:

- on the series winding with the minimum number of actual turns of the tap-winding in circuit (the tapping for the highest LV voltage for a linear potentiometer type tapping arrangement or the change-over position for a reversing type tapping arrangement, or the tapping for the lowest LV voltage in a linear separate winding tapping arrangement),
- on the common winding with the maximum number of effective turns of the tap-winding in circuit (the tapping for the highest LV voltage), and
- on the common winding with the minimum number of actual turns of the tap-winding in circuit (the tapping for the lowest LV voltage for a linear potentiometer or separate winding type tapping arrangement or the change-over position for a reversing type tapping arrangement).

NOTE 1 The choice of tap-position is intended to provide at least one measurement with and one without the tap winding in circuit so that any damage can be more easily identified as being in the tap-winding or the main winding.

For neutral or change-over positions, the direction of movement of the tap-changer shall be in the lowering voltage direction unless otherwise specified. The direction of movement (raise or lower) shall be recorded.

NOTE 2 The position of the change-over selector in reversing and coarse-fine arrangements has a profound effect on the measured frequency response.

For transformers with both an OLTC and a de-energised tap-changer (DETC), the DETC shall be in the service position if specified or otherwise the nominal position for the measurements at the OLTC positions described in 4.4.2.2.

For transformers fitted with a DETC, baseline measurements shall also be made on each position of the DETC with the OLTC (if fitted) on the position for maximum effective turns.

It is not recommended that the position of a DETC on a transformer that has been in service is changed in order to make a frequency response measurement, the measurement should be made on the 'as found' DETC tap position. It is therefore necessary to make sufficient baseline measurements to ensure that baseline data is available for any likely service ('as found') position of the DETC.

#### 4.4.3 Star- and auto-connected windings with a neutral terminal

For the standard measurement, the signal shall be applied to the line connection, or for series windings the higher voltage terminal. An additional measurement may be specified with the signal applied to the neutral terminal if this is required for compatibility with previous measurements. A star connected winding with the neutral not brought out shall be treated as a delta winding. The list of standard measurements for a star connected winding with taps is given in Table 1.

**Table 1 – Standard measurements for a star connected winding with taps**

| Measurement number | Source and reference lead ( $V_{in}$ ) connected to | Response lead ( $V_{out}$ ) connected to | Tap position               |
|--------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| 1                  | Line terminal phase 1                               | Neutral                                  | Max effective turns        |
| 2                  | Line terminal phase 2                               | Neutral                                  | Max effective turns        |
| 3                  | Line terminal phase 3                               | Neutral                                  | Max effective turns        |
| 4                  | Line terminal phase 1                               | Neutral                                  | Tap winding out of circuit |
| 5                  | Line terminal phase 2                               | Neutral                                  | Tap winding out of circuit |
| 6                  | Line terminal phase 3                               | Neutral                                  | Tap winding out of circuit |

#### 4.4.4 Delta windings and other windings without an accessible neutral

If delta windings can be split into individual phases (six bushings brought out) then the standard measurement shall be made with the windings split.

For large generator transformers where it is inconvenient to remove the phase to phase connections in service it is recommended that the baseline measurement in the factory and during commissioning is performed both with the delta open and closed.

Standard measurements shall be made on each phase in turn with the signal applied to the terminal with the lowest number or letter nearest the start of the alphabet first and the response measured on the next numbered or lettered terminal, and continuing in a cyclic rotation (see Table 2).

For delta tertiary or stabilising windings, the delta shall be closed.

For delta tertiary or stabilising windings that are earthed at one corner in service, the earth shall be removed if possible without removing liquid or gas.

**Table 2 – Standard measurements for delta connected winding without tap**

| Measurement number | Source and reference lead ( $V_{in}$ ) connected to | Response lead ( $V_{out}$ ) connected to |
|--------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1                  | A, U, R or 1                                        | B, V, S or 2                             |
| 2                  | B, V, S or 2                                        | C, W, T or 3                             |
| 3                  | C, W, T or 3                                        | A, U, R or 1                             |

#### 4.4.5 Zig-zag connected windings

Zig-zag connected windings shall be measured as star windings with a neutral connection.

NOTE The correspondence between the frequency responses of different phases of a zig-zag connected winding is not expected to be as close as would typically be expected for a star connected winding.

#### 4.4.6 Two-winding three-phase transformers

The standard measurements shall be one measurement of each phase of each winding, a total of six measurements for a transformer without taps and nine for a transformer with an on-load tap-changer.

#### 4.4.7 Three-phase auto-transformers

The standard measurements shall be one measurement of each phase of the series winding and the common winding separately with an additional measurement of the common winding for transformers with an on-load tap changer, a total of six measurements for a transformer without taps and nine for a transformer with an on-load tap-changer. If the transformer has a tertiary winding brought out to three line (phase) terminals an additional three measurements are required on this winding.

#### 4.4.8 Phase shifting transformers

The standard measurement shall be from input terminal to output terminal on each phase and from the neutral of the shunt winding to the output terminal on each phase, each on neutral tap and on each extreme tap, a total of 18 measurements. If the phase shifting transformer is of the two core type that has external interconnections that can be removed on site then it shall be treated as two separate transformers.

#### 4.4.9 Reactors

Series reactors shall be measured from input terminal to output terminal on each phase, a total of three measurements for a three-phase reactor. Shunt reactors shall be treated as a star winding on a transformer, a total of three measurements for a three-phase reactor without taps and six for a reactor with taps.

#### 4.4.10 Method for specifying additional measurements

Additional measurements, if required, shall be specified by giving the connection to each test object terminal (signal and reference, response, earthed, floating or connected together), the tap-position and the previous tap-position for each additional measurement. The format presented in Table 3 shall be used.

**Table 3 – Format for specifying additional measurements**

| Measurement | Tap | Previous tap | Source and reference ( $V_{in}$ ) | Response ( $V_{out}$ ) | Terminals earthed | Terminals connected together | Comments |
|-------------|-----|--------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------------|----------|
| 1           |     |              |                                   |                        |                   |                              |          |
| 2           |     |              |                                   |                        |                   |                              |          |
| 3           |     |              |                                   |                        |                   |                              |          |
| .           |     |              |                                   |                        |                   |                              |          |
| .           |     |              |                                   |                        |                   |                              |          |
| .           |     |              |                                   |                        |                   |                              |          |

The terminal identification entered in the table shall be those permanently marked on the test object and shall be shown on a diagram included in the specification.

Examples of particular measurement configurations using this format are given in Annex D.

#### **4.5 Frequency range and measurement points for the measurement**

The lowest frequency measurement shall be at or below 20 Hz.

The minimum highest frequency measurement for test objects with highest voltage > 72,5 kV shall be 1 MHz.

The minimum highest frequency measurement for test objects with highest voltage of  $\leq 72,5$  kV shall be 2 MHz.

It is recommended that a highest measurement frequency of at least 2 MHz is used for compatibility and simplicity for all test objects.

NOTE Reproducibility of the measurement is better at frequencies higher than 1 MHz with the shorter earth connections possible with smaller bushings and higher frequency information is more important for the diagnosis of physically smaller windings (see B.3).

Below 100 Hz, measurements shall be made at intervals not exceeding 10 Hz; above 100 Hz, a minimum of 200 measurements approximately evenly spaced on either a linear or logarithmic scale shall be made in each decade of frequency.

If the transformer operator does not require the low frequency information used to diagnose changes in the core, then a lower measurement frequency of not less than 5 kHz may be specified for the measurement.

### **5 Measuring equipment**

#### **5.1 Measuring instrument**

##### **5.1.1 Dynamic range**

The minimum dynamic range of the measuring instrument shall be +10 dB to -90 dB of the maximum output signal level of the voltage source at a minimum signal to noise ratio of 6 dB over the whole frequency range.

### 5.1.2 Amplitude measurement accuracy

The accuracy of the measurement of the ratio between  $V_{in}$  and  $V_{out}$  shall be better than  $\pm 0,3$  dB for all ratios between +10 dB and -40 dB and  $\pm 1$  dB for all ratios between -40 dB and -80 dB over the whole frequency range.

### 5.1.3 Phase measurement accuracy

The accuracy of the measurement of the phase difference between  $V_{in}$  and  $V_{out}$  shall be better than  $\pm 1^\circ$  at signal ratios between +10 dB and -40 dB, over the whole frequency range.

### 5.1.4 Frequency range

The minimum frequency range shall be 20 Hz to 2 MHz.

### 5.1.5 Frequency accuracy

The accuracy of the frequency (as reported in the measurement record) shall be better than  $\pm 0,1$  % over the whole frequency range.

### 5.1.6 Measurement resolution bandwidth

For measurements below 100 Hz, the maximum measurement resolution bandwidth (between -3 dB points) shall be 10 Hz; above 100 Hz, it shall be less than 10 % of the measurement frequency or half the interval between adjacent measuring frequencies whichever is less.

### 5.1.7 Operating temperature range

The instrument shall operate within the accuracy and other requirements over a temperature range of 0 to +45 °C.

### 5.1.8 Smoothing of recorded data

The output data recorded to fulfil the requirements of this standard shall not be smoothed by any method that uses adjacent frequency measurements, but averaging or other techniques to reduce noise using multiple measurements at a particular frequency or using measurements within the measurement resolution bandwidth for the particular measurement frequency are acceptable.

The data displayed on a screen or any output data provided in addition to that required by Clause 6 is not subject to the requirements of Clause 5, however it is recommended that the facility to view the data recorded in compliance with Clause 6 is provided.

### 5.1.9 Calibration

The instrument shall be calibrated to a traceable reference standard at regular intervals within a recognised quality system.

## 5.2 Measurement leads

Separate measurement leads shall be used for each of the source, reference and response connections. Coaxial leads used for the measurement shall be of equal lengths and shall have a characteristic impedance of 50  $\Omega$ . The signal attenuation caused by an individual lead shall be less than 0,3 dB at 2 MHz. The zero-check measurement made without a test object or earth leads shall result in an amplitude deviation at 2 MHz of less than 0,6 dB. The maximum lead length for a passive lead system shall be 30 m.

NOTE If an alternative measurement method is used to that shown in Figure 1, for example if a measuring impedance, head amplifier or active probe system is used close to the test object terminal, then the leads between the shunt, amplifier or probe and any other part of the instrument are not 'used for the measurement' in the

meaning of this Clause and they do not need to conform to this part of the specification provided they do not affect the measurement and the other requirements of Clause 5 are satisfied.

### 5.3 Impedance

The measurement impedance for the response voltage measurement shall be  $50\ \Omega \pm 2\%$  over the full frequency range.

If coaxial measurement leads are used, the input impedance of the reference and response voltage channels of the measuring instrument shall be  $50\ \Omega \pm 2\%$  over the full frequency range.

## 6 Measurement records

### 6.1 Data to be recorded for each measurement

Data shall be recorded as a single computer readable file for each measurement in XML 1.0 specification format. The following data shall be recorded with each measurement.

- a) Identifier, a unique sequence of letters and/or numbers to identify the test object, typically this would be the customer serial number or location number for the transformer or reactor.
- b) Date, the date on which the measurement was conducted in the format YYYY-MM-DD.
- c) Time, the time at which the measurement finished in the format HHhMM (where h is the letter h used as a delimiter) in 24 h format.
- d) Test object manufacturer, the manufacturer of the transformer or reactor being measured.
- e) Test object serial number, the unique number given to the transformer or reactor by the manufacturer.
- f) Measuring equipment, a unique identification for the measuring instrument manufacturer, measuring instrument model and an individual serial number for the instrument used
- g) The peak voltage used for the measurement.
- h) Reference terminal, the identification of the test object terminal to which the reference and source leads were connected.
- i) Response terminal, the identification of the test object terminal to which the response lead was connected.
- j) Terminals connected together, the identification of all test object terminals that were connected together during the measurement in the format terminal identifier 1-terminal identifier 2-terminal identifier 3, terminal identifier 4-terminal identifier 5-terminal identifier 6, and so on (for example A-B-C, D-E-F would indicate that terminals A, B and C were connected together and terminals D, E and F were separately connected together).
- k) Earthed terminals, the identifier of each terminal connected to the test object tank during the measurement separated by commas.
- l) OLTC tap position, the tap position indicated on the test object during the measurement.
- m) Previous OLTC tap position, the tap position from which the tap-changer was moved to reach the tap-position used during the measurement.
- n) DETC position, the position of the DETC as indicated on the test object during the measurement.
- o) Test object temperature, the temperature of the test object dielectric during the measurement (usually the top liquid temperature) in degrees Celsius.
- p) Fluid filled, yes or no depending on whether the test object was fully filled with the normal operating fluid during the measurement.
- q) Comments, free text to be used to state the condition of the test object during the measurement, typically this would be 'service' for the condition with busbars removed but all service bushings installed or 'transport' if special bushings for measurement in the transport configuration were used.

- r) Length of the unshielded connection for each lead if the connection of the coaxial leads was not directly to bushing terminals (any additional information required to repeat the measurement should be given).
- s) Measurement result (the frequency in Hz, the amplitude in dB and the phase in degrees) for each measurement frequency (the values shall be given as a text string in the format 1.2345E+04 for frequency and -1.2345E+01 for amplitude and phase).

Each file shall be named

identifier\_reference terminal\_response terminal\_tap position\_date\_time.xml.

EXAMPLE T1234a\_H0\_H1\_1\_2009-09-18\_14h33.xml

## 6.2 Additional information to be recorded for each set of measurements

An additional computer readable file shall be supplied for each set of measurements (measurements made on one test object on one occasion). This file shall include the following information.

### a) Test object data

- 1) Manufacturer
- 2) Year of manufacture
- 3) Manufacturer's serial number
- 4) Highest continuous rated power of each winding
- 5) Rated voltage for each windings
- 6) Short circuit impedance between each pair of windings
- 7) Rated frequency
- 8) Vector group, winding configuration / arrangement
- 9) Number of phases (single or three-phase)
- 10) Transformer or reactor type (e.g. GSU, phase shifter, transmission, distribution, furnace, industrial, railway, shunt, series, etc.)
- 11) Transformer configuration (e.g. auto, double wound, buried tertiary, etc.)
- 12) Transformer or reactor construction (e.g. core form, shell form), number of legs (3 or 5-leg), winding type, etc.
- 13) OLTC: number of taps, range and configuration (linear, reversing, coarse-fine, line-end, neutral-end, etc.)
- 14) DETC: number of positions, range, configuration, etc.
- 15) Organisation owning the test object
- 16) Test object identification (as given by the owner if any)
- 17) Any other information that may influence the result of the measurement

NOTE It is preferable to include a drawing of the test object nameplate including the winding schematic. In this case, if the above data is included, it does not need to be repeated.

### b) Location data

- 1) Location (e.g. site name, test field, harbour, etc.)
- 2) Bay identification reference if applicable
- 3) Notable surrounding conditions (e.g. live overhead line or energized busbars nearby)
- 4) Any other special features

### c) Measuring equipment data

- 1) Working principle of device (sweep or impulse)
- 2) Equipment name and model number

- 3) Manufacturer
  - 4) Equipment serial number
  - 5) Calibration date
  - 6) Any other special features of the equipment
- d) Test organization data
- 1) Company
  - 2) Operator
  - 3) Any additional information
- e) Measurement set-up data
- 1) Remanence of the core: was the measurement carried out immediately following a resistance or switching impulse test, or was it deliberately demagnetised?
  - 2) Whether the tank was earthed
  - 3) Measurement type (e.g. open circuit, short circuit, etc.)
  - 4) Length of braids used to ground the cable shields
  - 5) Length of coaxial cables
  - 6) Reason for measurement (e.g. routine, retest, troubleshooting, commissioning new transformer, commissioning used transformer, protection tripping, recommissioning, acceptance testing, warranty testing, bushing replacement, OLTC maintenance, fault operation, etc.)
  - 7) Any additional information
- f) Photographs of the test object as measured showing the position of the bushings and connections

## **Annex A** (normative)

### **Measurement lead connections**

#### **A.1 General**

This annex contains requirements for the method of connection of the measurement leads to the test object. Method 1 is the reference method preferred for repeatability beyond 1 MHz. Unless otherwise agreed, method 1 shall be used for baseline measurements. Method 2 which is an alternative configuration of the earth connections may be used when specified, or agreed to, by the transformer user for convenience when making the measurement. Method 3 covers alternative connections which may be used when specified by the transformer user when compatibility with previous measurements made according to method 3 is required.

NOTE In general the three methods may be expected to give identical results up to 500 kHz and results that are not identical, but can still be used for diagnostic purposes at frequencies up to 1 MHz.

#### **A.2 Common requirements for all measurements**

The details of the connections and connection method shall be given in the measurement record see Clause 6.

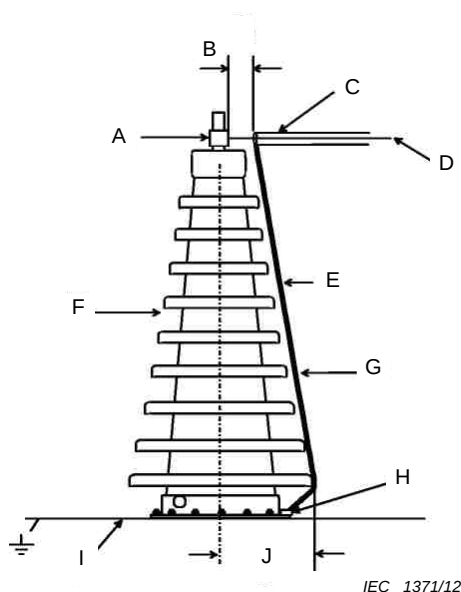
The connections to the terminal and the transformer tank shall be made using a repeatable, reliable and low resistance method.

Separate earth connections from the source and response leads shall be made to the tank, but the earth connections from the source and reference leads to the tank may be combined in a single conductor. The earth connection point shall be as close as practicable to the base of the bushing or terminal to which the measurement lead is connected.

#### **A.3 Method 1 (Figure A.1)**

The central conductor of the coaxial measurement leads shall be connected directly to the test object terminal using the shortest possible length of unshielded conductor. The shortest possible connection between the screen of the measuring lead and the flange at the base of the bushing shall be made using braid. A specific clamp arrangement or similar is required to make the earth connection as short as possible.

NOTE In general this method may be expected to give repeatable measurements up to 2 MHz.



- A connection clamp
- B unshielded length to be made as short as possible
- C measurement cable shield
- D central conductor
- E shortest braid
- F bushing
- G earth connection
- H earth clamp
- I tank
- J smallest loop

**Figure A.1 – Method 1 connection**

#### A.4 Method 2

Method 2 is identical to method 1 except that the earth connection from the measurement leads to the flange at the base of the bushing may be made using a fixed length wire or braid, so that the connection is not the shortest possible.

The position of the excess earth conductor length in relation to the bushing may affect amplitude (dB) measurements above 500 kHz and resonant frequencies above 1 MHz. This will have to be taken into account when comparing baseline and subsequent measurements.

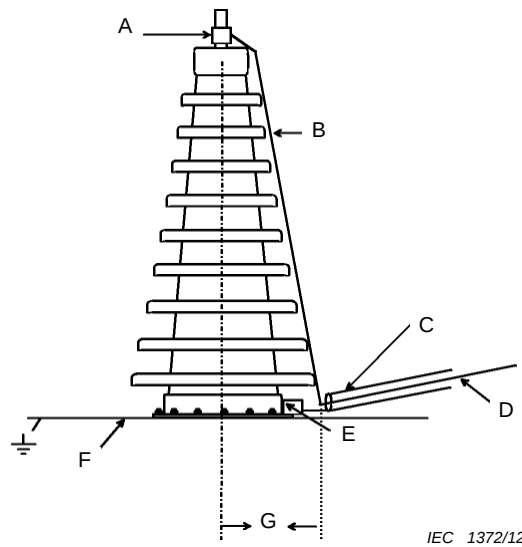
If it is not possible to connect to the flange at the base of the bushing and an alternative connection position is used then it may be expected that the measurement will be affected at frequencies above 500 kHz and particular care should be taken to document the connection arrangement and to ensure the same connection point is used to obtain repeatable measurements. This would not be a standard measurement.

#### A.5 Method 3 (Figure A.2)

In a method 3 connection, the screen of the coaxial measurement lead is connected directly to the test object tank at the base of the bushing and an unshielded conductor is used to connect the central conductor to the terminal at the top of the bushing.

**NOTE** If a method 3 connection is used for the response lead connection only then the results are comparable with method 1. This connection may be the most practical option if an external shunt (measuring impedance) is

used. If a common conductor is used for the signal and reference connections then the conductor is included in the measurement which will therefore differ from a method 1 measurement.



IEC 1372/12

- A connection clamp
- B shortest braid or wire
- C measurement cable shield
- D central conductor
- E earth clamp
- F tank
- G smallest loop

**Figure A.2 – Method 3 connection**

## Annex B (informative)

### Frequency response and factors that influence the measurement

#### B.1 Presentation of frequency response

Although both the amplitude and phase of the voltage ratio are recorded during frequency response measurements, generally only the amplitude information is presented and used for visual interpretation of the result. However, both amplitude and phase information may be necessary if the frequency response data is to be parameterised by an automatic system for example based on a pole-zero representation. The frequency response can be displayed on either a logarithmic or a linear scale as shown in Figure B.1. Each method has advantages but generally a logarithmic scale plot offers easy overall response trend analysis while a linear scale plot is useful for looking at discrete frequency bands and to compare small differences at particular frequencies.

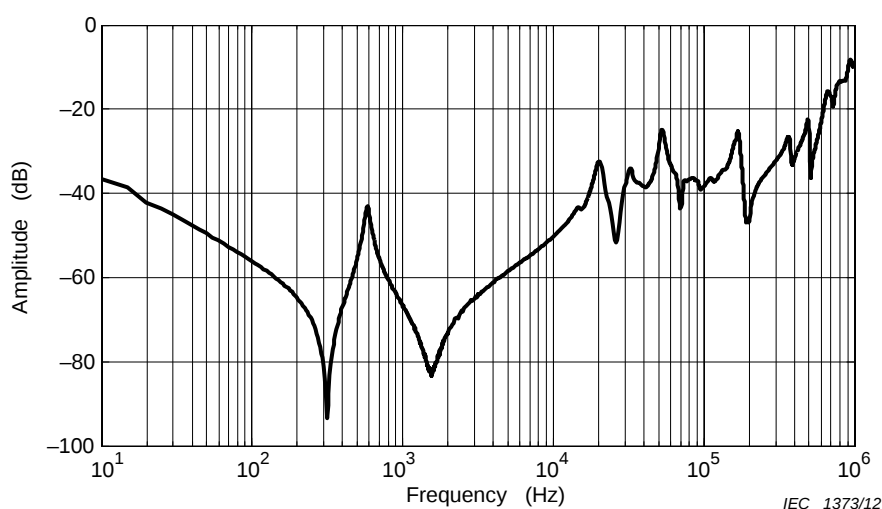


Figure B.1a) – Logarithmic scale

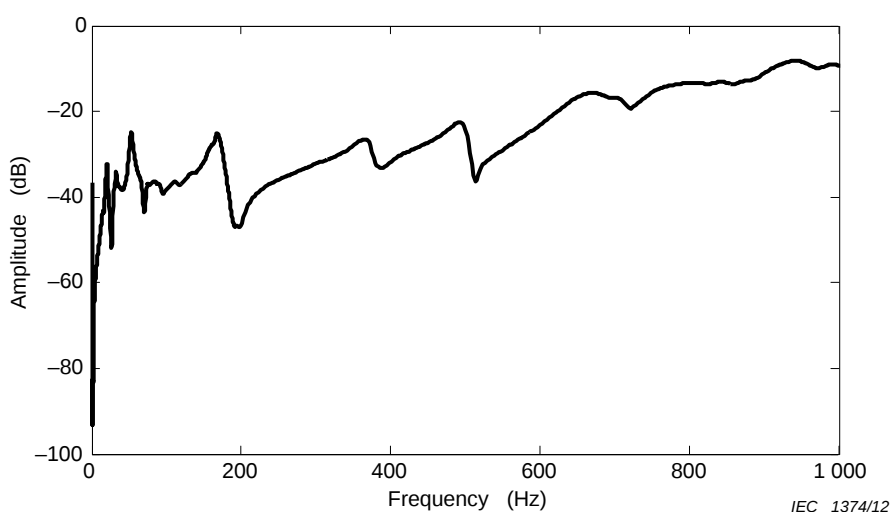
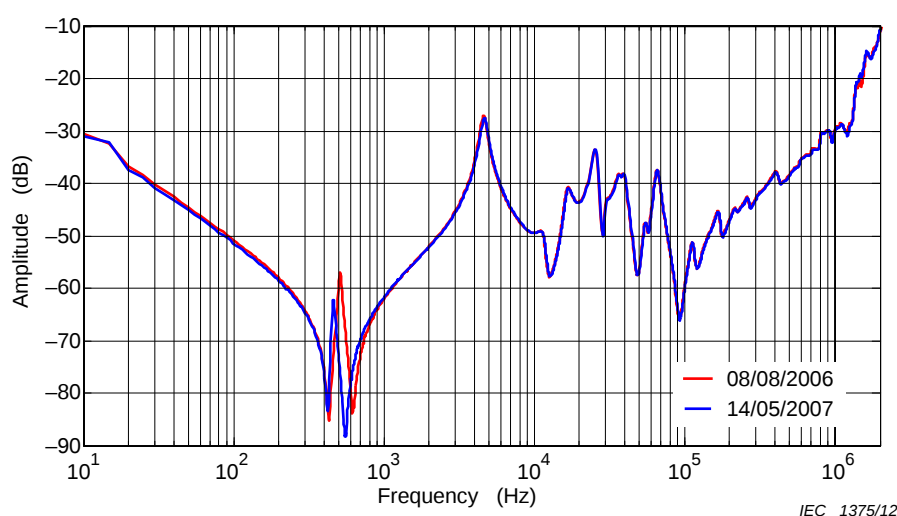


Figure B.1b) – Linear scale

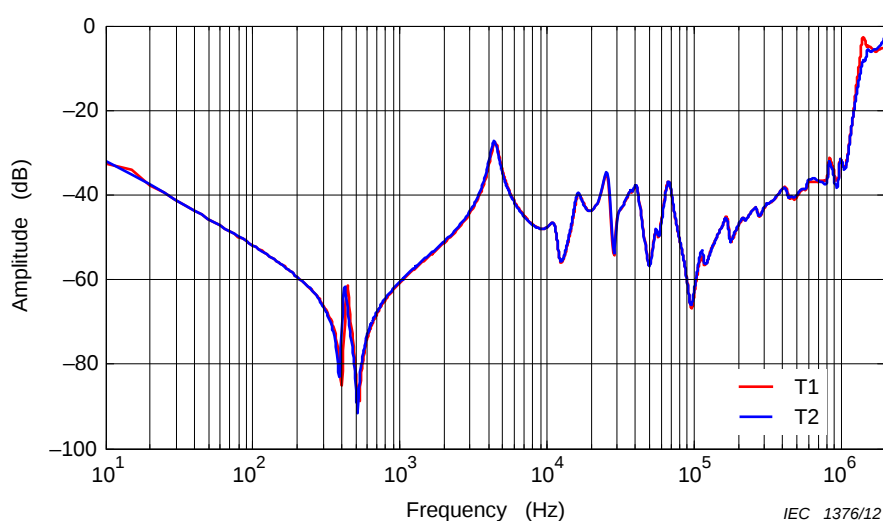
Figure B.1 – Presentation of frequency response measurements

## B.2 Frequency response comparison

In order to interpret a measured frequency response, a comparison is made between the measured response and a previous baseline measurement (if available), as shown in Figure B.2. If the baseline measurement is unavailable, comparison can be made with the response measured on a twin transformer (a transformer made to the same drawings from the same manufacturer) as shown in Figure B.3 [1], [2], [3].<sup>1</sup> Careful attention should be given when using responses from sister transformers (transformers with the same specification but with possible differences in winding configuration even from the same manufacturer) for comparison. Improvements and changes to the transformer design may have been introduced by a manufacturer over a period of time to outwardly similar units and this may cause different frequency responses as shown in Figure B.4 which could result in a false diagnosis of winding damage. For three-phase transformers, comparisons can also be made between the responses of the individual phases as shown in Figure B.5.

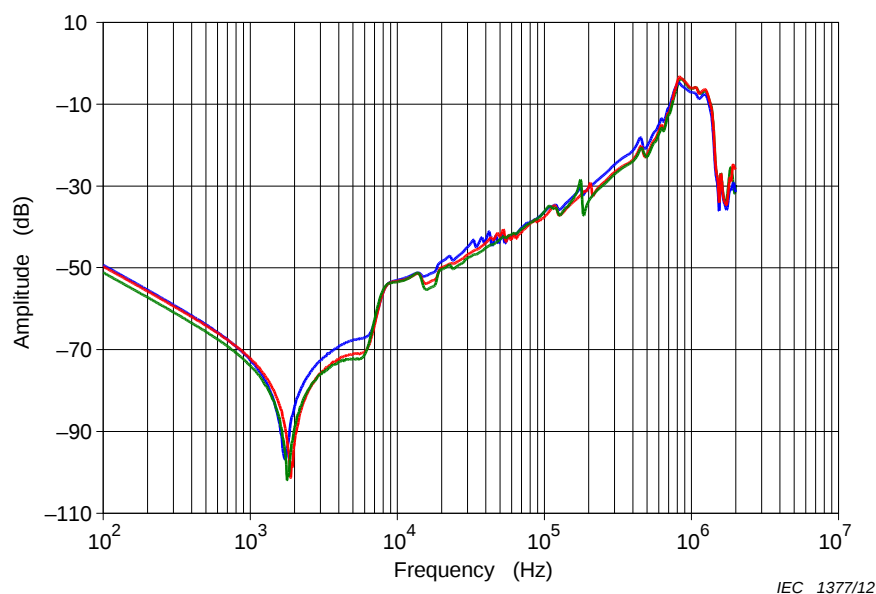


**Figure B.2 – Comparison with a baseline measurement**

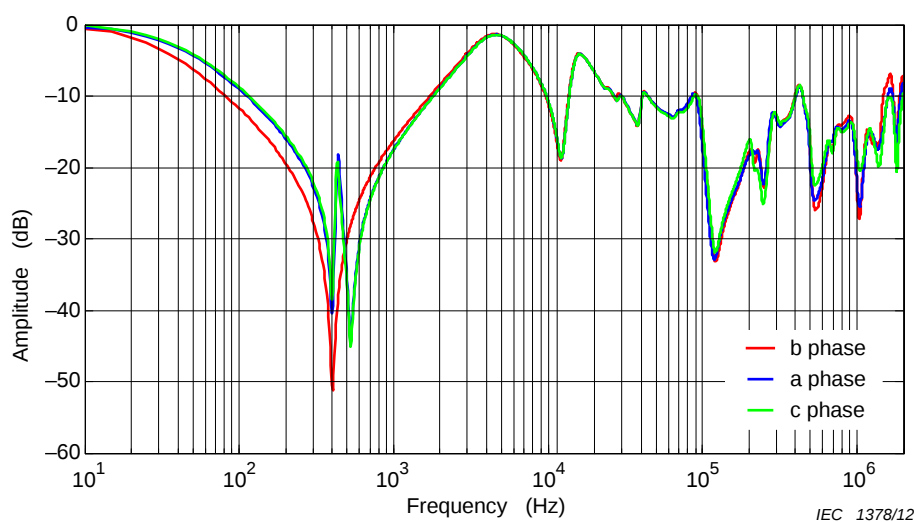


**Figure B.3 – Comparison of the frequency responses of twin transformers**

<sup>1</sup> Figures in square brackets refer to the Bibliography.



**Figure B.4 – Comparison of the frequency responses from sister transformers**



**Figure B.5 – Comparison of the frequency responses of three phases of a winding**

The comparison of frequency response measurements is used to identify the possibility of problems in the transformer. Problems are indicated by the following criteria [4]:

- changes in the overall shape of the frequency response;
- changes in the number of resonances (maxima) and anti-resonances (minima);
- shifts in the position of the resonant frequencies.

The confidence in the identification of a problem in the transformer based on the above criteria will depend on the magnitude of the change when compared with the level of change to be expected for the type of comparison being made (baseline, twin, sister or phase). The possibility of the observed changes being due to a different measurement set-up or other variation shall also be considered in the diagnosis. When comparing phases of the same transformer quite significant differences are considered “normal” and could be due to different

internal lead lengths, different winding inter-connections and different proximities of the phases to the tank and the other phases. The earthing of windings and measurement leads can create variations and the tap changer position has a profound effect on the measurement. It is important to be able to determine or eliminate the variations caused by these factors to avoid a misleading diagnosis when interpreting frequency response measurement results.

Good measurement practice is critical to the effectiveness of the frequency response measurement when used as a diagnostic tool. Once variations are observed, correct diagnosis requires knowledge of the transformer structure and the behaviour of the transformer at high frequency. The following subclauses provide information on the general features of the frequency response and some examples of the factors that influence the frequency response. Some guidelines and recommendations are included to highlight the importance of good measurement practice and how to distinguish poor measurements. Information is also provided to help to distinguish the differences that may be caused by problems in the winding from the “normal” differences caused by transformer construction variations.

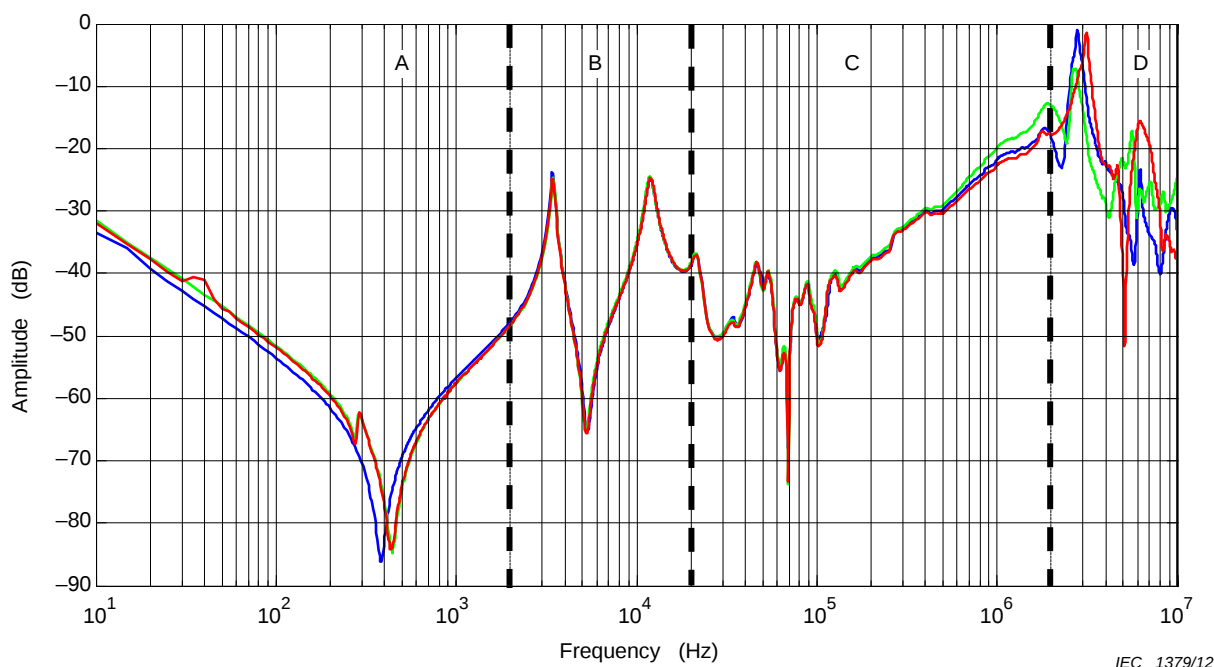
### **B.3 Fundamental understanding of frequency response characteristics**

Different frequency response characteristics can be expected for the various types of transformers, since a transformer's frequency response has a fundamental relationship with the core and winding structure. The frequency response can be divided into three regions, the lower frequency region dominated by the core, the middle frequencies dominated by the interactions between the windings and the higher frequency region controlled by the individual winding structure, internal connections and at the highest frequencies the measurement connection leads. These regions are illustrated using a frequency response from the HV winding of a large auto-transformer as an example in Figure B.6. Note that there is no generally applicable frequency limit for each region as this depends on the physical size of the transformer and the ratings of the windings. The limits shown in Figure B.6 are only used for highlighting the low, the medium and the high frequency regions for the particular transformer windings in the example. In the core influence region (up to about 2 kHz), the response is dominated by the core magnetising inductances and the bulk capacitances of the transformer. For three-phase three limb core-form power transformers, the middle phase would have a single anti-resonance in this frequency region due to the symmetrical magnetic reluctance paths seen by the middle phase of the core through the other two phases. The outer phases generally have two anti-resonances since they experience two different magnetic reluctance paths one through the nearest (middle) phase and one through the furthest phase (the other outer phase). Residual magnetization of the core also influences the frequency response in this region. Five limb cores will have a different response in this region.

The response in the intermediate frequency region (in between 2 kHz and 20 kHz) is mostly affected by the coupling between windings, which depends significantly on the arrangement and connections of the windings, for example delta connection, auto-transformer winding connection, single-phase or three-phase transformer configurations. For an auto-transformer winding such as shown in Figure B.6, the response in this range shows two distinct resonances, this is a characteristic feature of the response of auto-transformer windings [5].

In the winding structure influence (high frequency) region (in between 20 kHz and 1 MHz in this case), the response is determined by the winding leakage inductances together with the winding series and ground capacitances [6]. In this region, the series capacitance is the most influential factor in determining the shape of the response. Typically, the response of the HV winding of large power transformers with a high winding series capacitance (interleaved or intershield construction) shows a generic rising amplitude trend with few resonances and anti-resonances as shown in Figure B.6. On the other hand, the LV winding with low series capacitance generally shows flat amplitude trend and superimposed by a series of anti-resonances and resonances.

At the highest frequencies of above 1 MHz ( $> 72,5$  kV) or above 2 MHz ( $\leq 72,5$  kV), the response is less repeatable and is influenced by the measurement set-up, especially by the earthing connections, which effectively relies on the length of the bushing.



**Influence regions:**

- A core
- B interaction between windings
- C winding structure
- D measurement setup and lead (including earthing connection)

**Figure B.6 – General relationships between frequency response and transformer structure and measurement set-up for HV windings of large auto-transformer**

Due to the variations or repeatability problems (as illustrated by the curves in Figure B.6) that are caused by the measurement limitations and the uncertainties of the condition of the residual flux, the useful frequency ranges that are recommended for interpreting the frequency response are the intermediate frequency range and the winding structure influence region of the high frequency range. Typically, this is between 2 kHz and 1 MHz ( $> 72,5$  kV) or 2 MHz ( $\leq 72,5$  kV).

When making comparisons, the differences between the frequency responses in these regions may be caused by problems or faults in the transformer. However, differences can also be caused by other factors categorised as the following:

- different measurement set-up and practice;
- different transformer interconnections and conditions;
- transformer construction variations (when comparing sister units or using a comparison between phases).

The differences caused by these factors shall not be confused with the differences caused by the actual problem in transformer. Clause B.4 highlights some examples of the effect of some of the factors mentioned using measurement results. However, to demonstrate the effect of transformer constructional variation, it is easier to use an FRA simulation model. In this case, both the validated simulation result and the corresponding measurement result are shown to illustrate the effect [7]. It should be kept in mind that the purpose of transformer modeling and

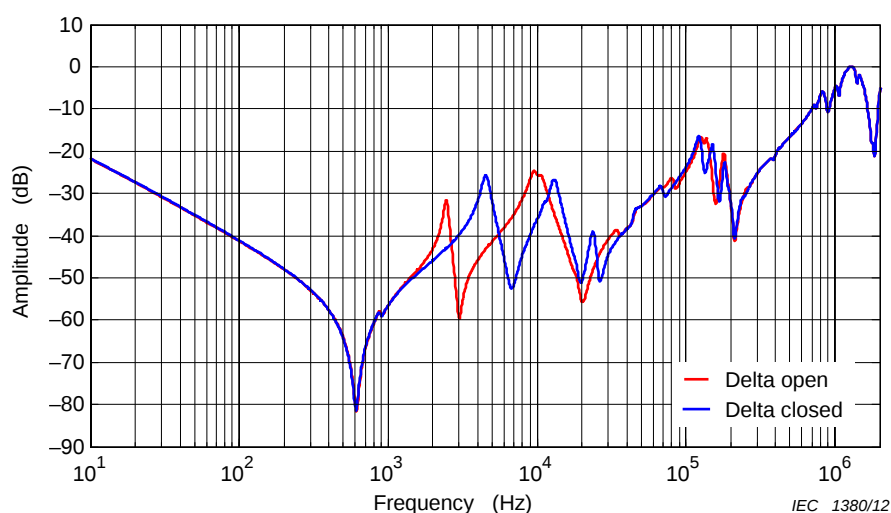
FRA simulation is not to provide “exact” matches with measured results; instead it is a tool to aid the understanding and interpretation of the measured results, especially when used to identify the features which are indicative of winding displacement and deformation.

## B.4 Factors that influence frequency responses

### B.4.1 Tertiary delta connections

The phases of star connected windings are only connected at the neutral (star-point), while the phases of a delta connected winding are directly linked at the line terminals. This direct coupling has a profound influence on the frequency response of the phases of a transformer with a delta winding particularly in the frequency region dominated by the interaction between windings. Figure B.7 shows the measurement results of the series winding of an auto-transformer with the tertiary delta connection both made and opened.

From Figure B.7, it is shown that when the tertiary delta connection is opened, the frequency response of the series winding is altered significantly, especially in the intermediate frequencies. This is due to significant changes in the inductive and capacitive coupling from the tertiary delta connection which causes the anti-resonances and resonances particularly in the frequency region influenced by the interaction between windings (in this case between 2 kHz and 20 kHz) to shift to lower frequencies.

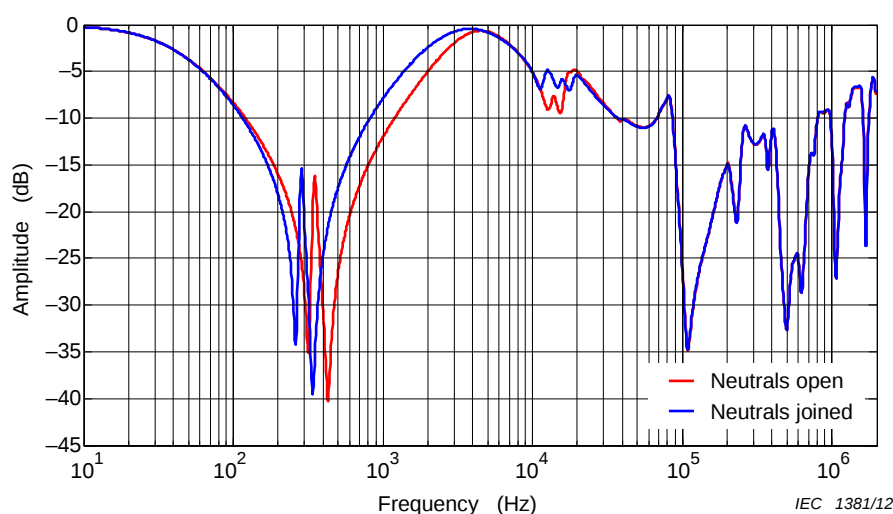


**Figure B.7 – Effect of tertiary delta connection on the frequency response of a series winding**

If the tertiary delta connection is made outside the tank and earthed, for better phase comparison (in case of no other reference measurement available) the earth connection should be removed leaving the delta connection intact. Otherwise the capacitive couplings among windings will be different for each phase, resulting in a very significant difference between the responses of three phases in the middle frequency range.

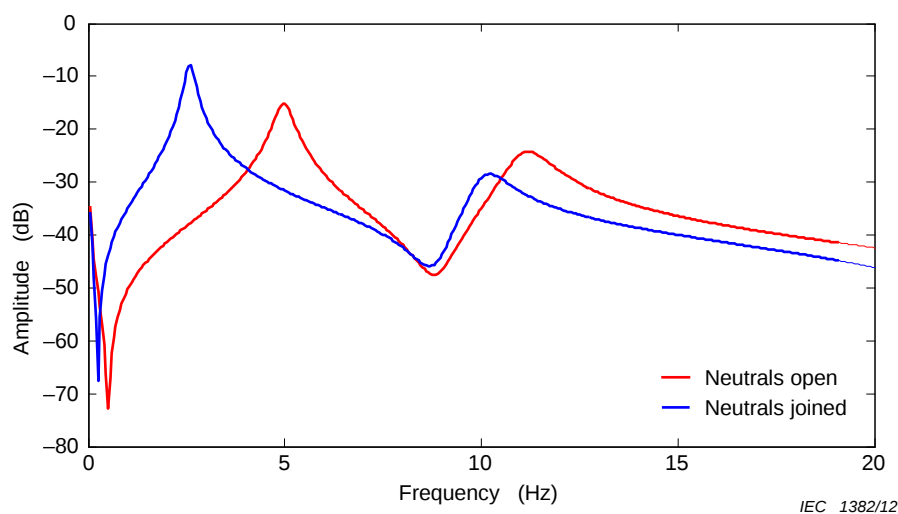
### B.4.2 Star neutral connection

If a three phase transformer has separate neutral terminals for each phase (external star-point) the neutral terminations can be either joined together or left individually floating during an FRA measurement. Figure B.8 shows a comparison of the measurement results of a tertiary winding with the neutrals joined and opened. Clearly, the frequency response of the tertiary winding is changed especially in the low and in the intermediate frequencies.



**Figure B.8 – Effect of star neutral connection on the tertiary winding response**

The frequency response of the series winding of an auto-transformer also show that the neutral connection influences the low and the intermediate frequencies, especially regarding the position of the resonances, as shown in Figure B.9.

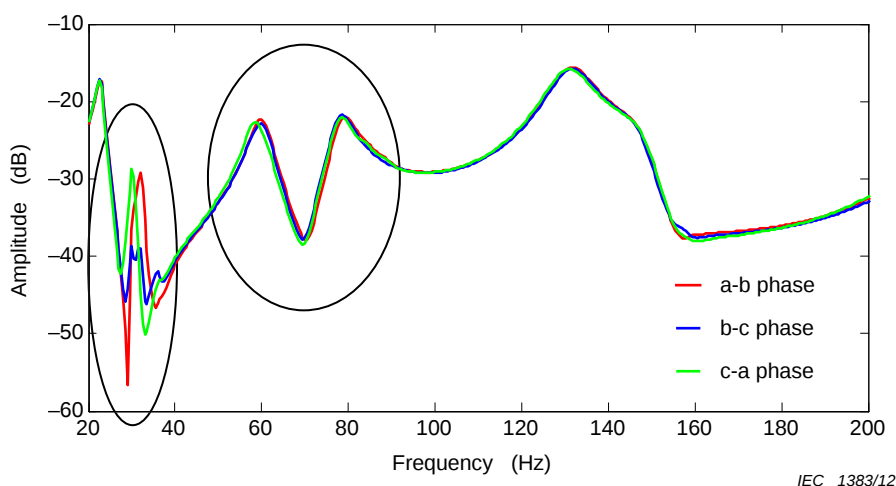


**Figure B.9 – Effect of star neutral termination on series winding response**

These examples show that it is important that the termination method is recorded so that the same termination connection is made for future frequency response measurements. Otherwise, the frequency responses could show discrepancies especially in the winding interaction frequency region (in this case between 2 kHz and 20 kHz) as shown in Figure B.9.

#### **B.4.3 Internal leads connecting the tap winding and the tap-changer**

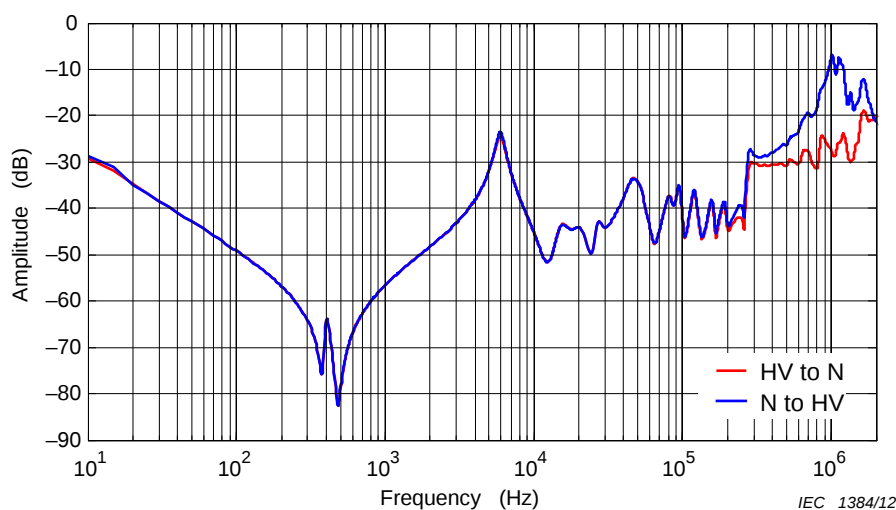
When making a comparison between phases, the responses away from the core influence region of the three phases often display subtle differences between each other. Possible reasons for this include manufacturing tolerances and internal lead effects. The internal tap leads that connect the tap-changer to the tap windings could vary in length. This could cause the lead capacitances of each phase to be different. Consequently, the response for each phase will be different for certain frequency ranges depending on the winding type. For a low voltage (LV) winding, subtle differences are observed in the response between 20 kHz and 200 kHz shown circled in Figure B.10.



**Figure B.10 – Measurement results showing the effect of differences between phases in internal leads connecting the tap winding and OLTC**

#### B.4.4 Measurement direction

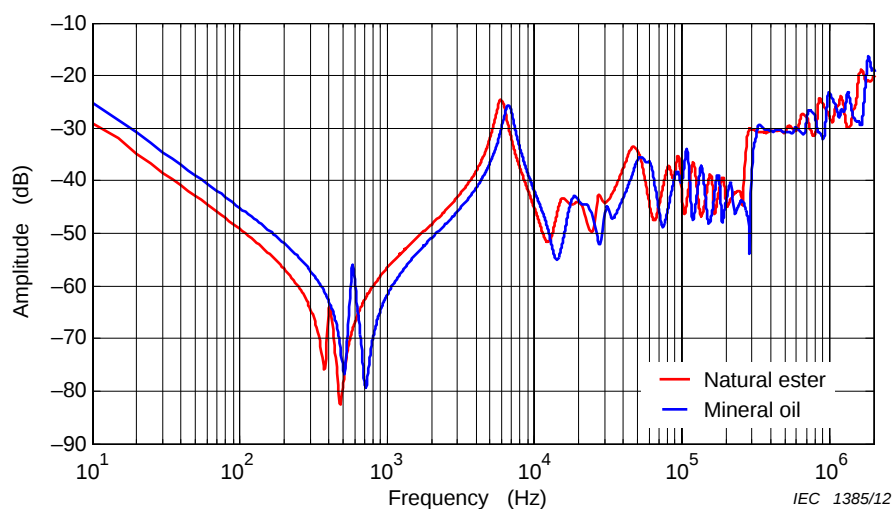
One of the important details that shall be included in the measurement method is which terminal the signal is being injected into and from which terminal the response measurement is being made. Comparing measurements made on the same winding phase but in different directions (line to neutral or neutral to line) can show discrepancies in the higher frequencies, as shown in Figure B.11. This illustrates why it is important to follow the measurement connections given in 4.4 or repeat the measurement connection used in the baseline measurement if different.



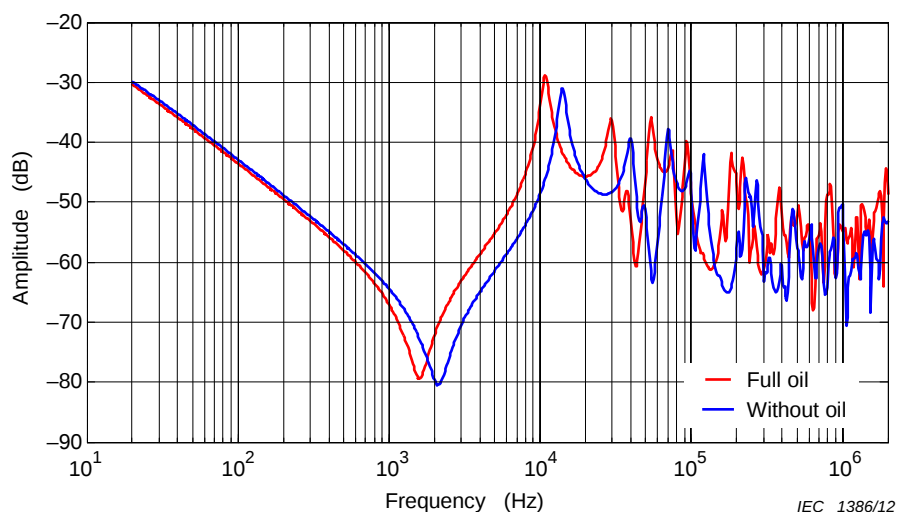
**Figure B.11 – Effect of measurement direction on frequency response**

#### B.4.5 Effect of different types of insulating fluid

The use of a different type of insulating fluid such as natural ester rather than mineral oil in the transformer can produce differences in the frequency response across the frequency range, as shown in Figure B.12. This is important especially when comparing sister units. A similar effect, but in the opposite frequency direction, occurs if the transformer is filled with air rather than insulating fluid, as shown in Figure B.13.



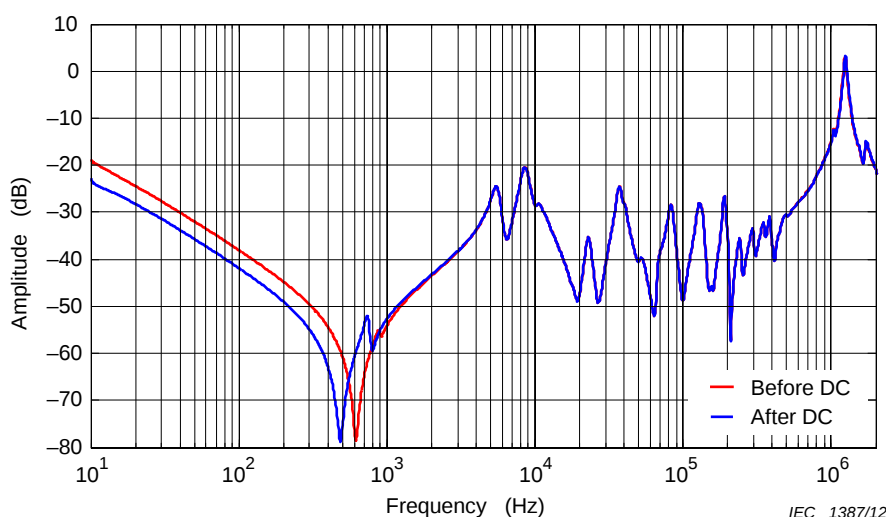
**Figure B.12 – Effect of different types of insulating fluid on frequency response**



**Figure B.13 – Effect of oil filling on frequency response**

#### B.4.6 Effect of DC injection tests and measurements

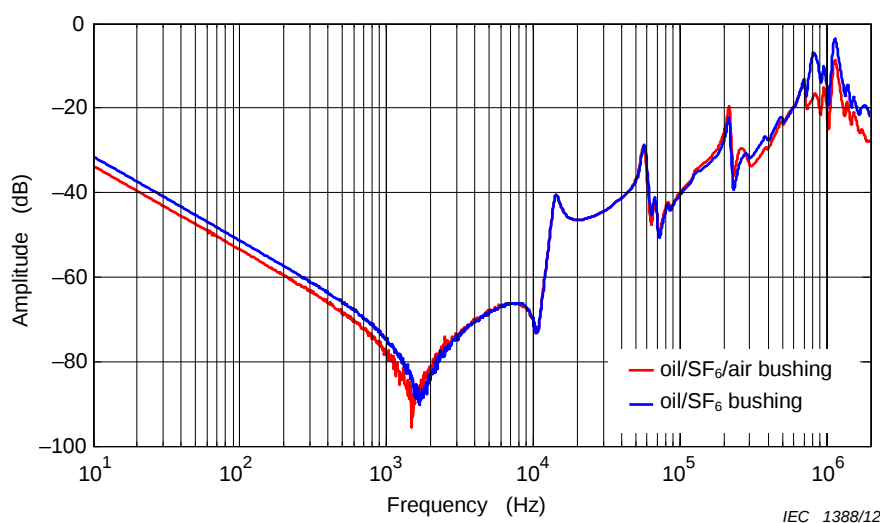
DC injection tests can cause discrepancies between frequency response measurements especially in the core influence region in the low frequency range as shown in Figure B.14. Therefore, it is desirable to arrange the test and measurement sequence such that the frequency response measurement is not made following a DC injection test that can leave residual magnetism in the core. Examples of such tests include switching impulse tests and winding resistance measurements.



**Figure B.14 – Effect of a DC injection test on the frequency response**

#### B.4.7 Effect of bushings

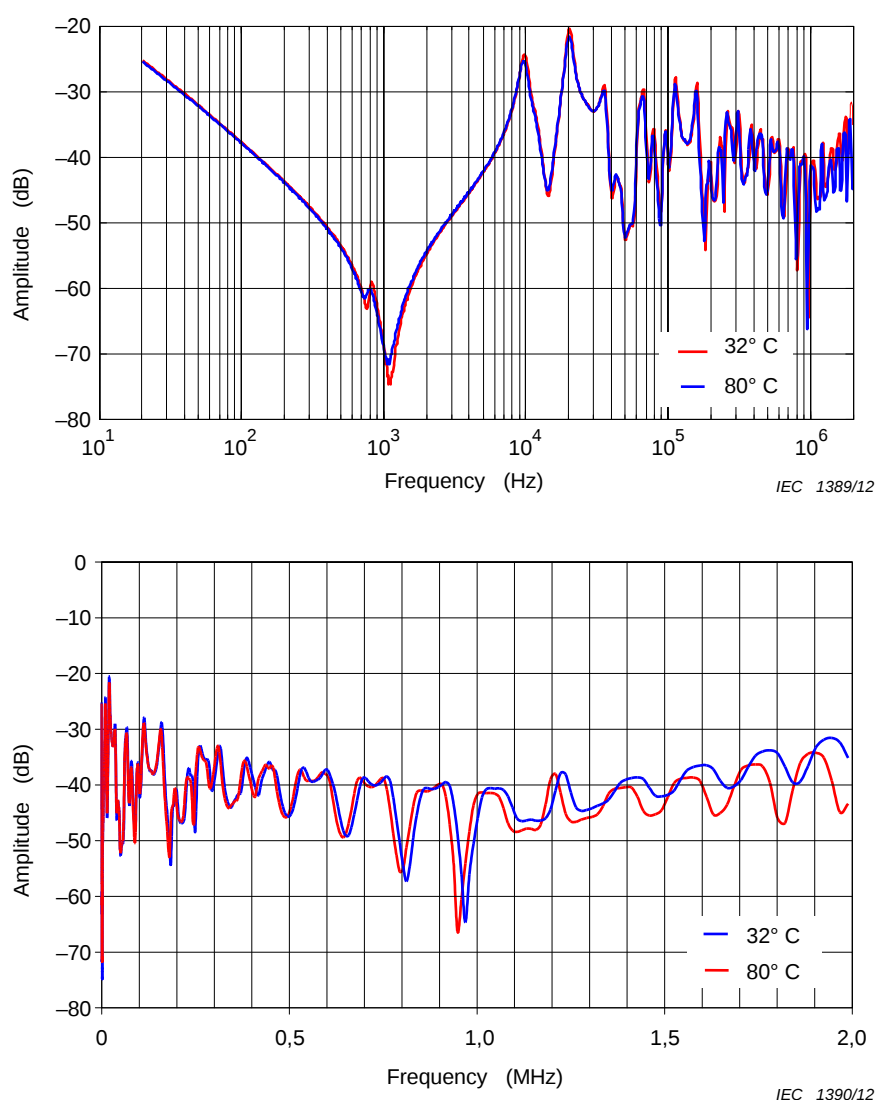
It is possible that different bushings are used during factory testing compared to those fitted at site. This may cause differences in the high frequencies, as shown in Figure B.15. Larger discrepancies may be expected in the high frequencies if the transformer is directly connected to the SF<sub>6</sub> insulated busbars and the measurement is made by connecting to the disconnected earth connection of an earth switch.



**Figure B.15 – Effect of bushings on frequency response**

#### B.4.8 Effect of temperature

Temperature affects the frequency response when the temperature variation is larger than about 50 °C, as shown in Figure B.16. The temperature differences cause changes in winding resistance and hence the amplitude of the frequency response. Changes in fluid density and dielectric constant with temperature together with possible physical expansion can also cause minor but consistent shifts in resonant frequencies across the frequency range.

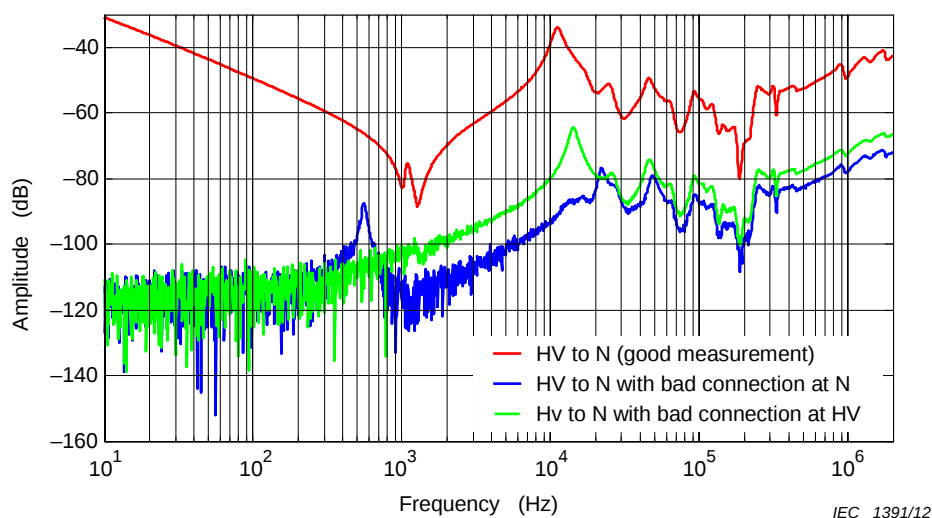


**Figure B.16 – Effect of temperature on frequency response**

#### B.4.9 Examples of bad measurements

Figure B.17 highlights some examples of frequency response measurements made with a bad contact or loose connection made deliberately at either side of the measurement terminals of a test object. From the results, it can be concluded that a bad contact or loose connection between the measurement terminals and the measurement leads will generally give noisy frequency responses in the lower frequency range and a lower (or more negative dB) amplitude trend.

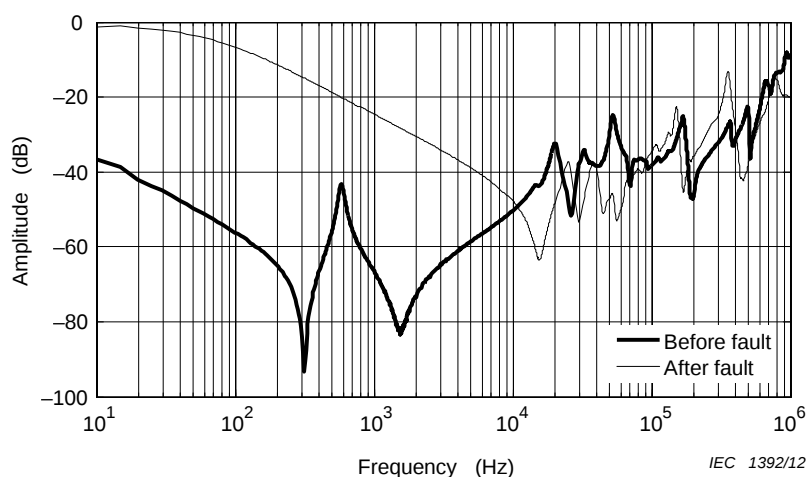
It is important that frequency response measurements are always made in a consistent way and that all details of the measurement method are systematically recorded. This will help to avoid false discrepancies and ensure the compatibility of frequency responses during comparison. Furthermore, if differences are observed when comparing with a baseline result, it is important to first verify the measurement by repeating to ensure that the differences are not caused by bad measurement practice or by making a different measurement connection. Again it is important to stress that all data relevant to each and every frequency response measurement is recorded in detail to enable possible discrepancies to be understood.



**Figure B.17 – Examples of bad measurement practice**

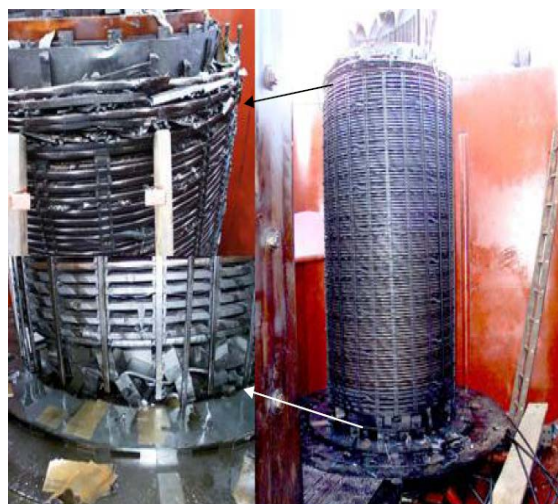
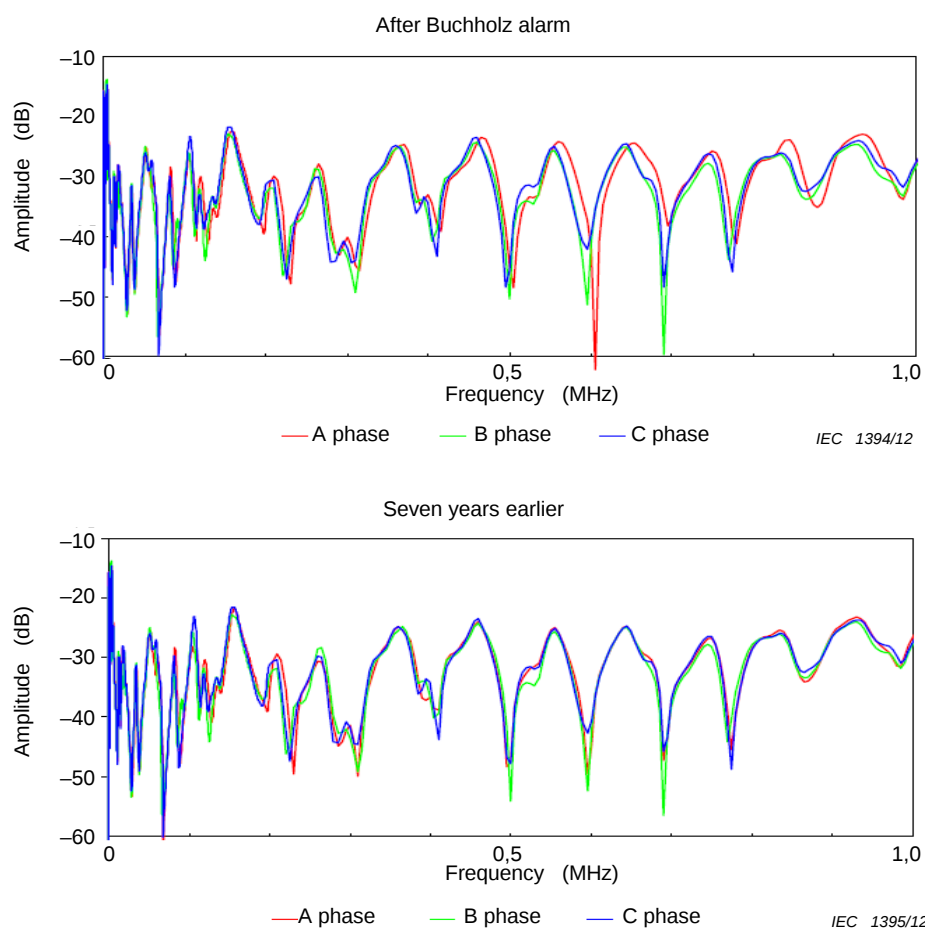
#### B.4.10 Evaluation of frequency response

If the measurements have been made in the same way systematically and no changes have been recorded regarding the condition of the transformer, then the discrepancies between the frequency responses may be caused by winding movement or deformation. Some of the examples of faults that have been detected by the frequency response measurement are outlined in Figure B.18, Figure B.19 and Figure B.20.



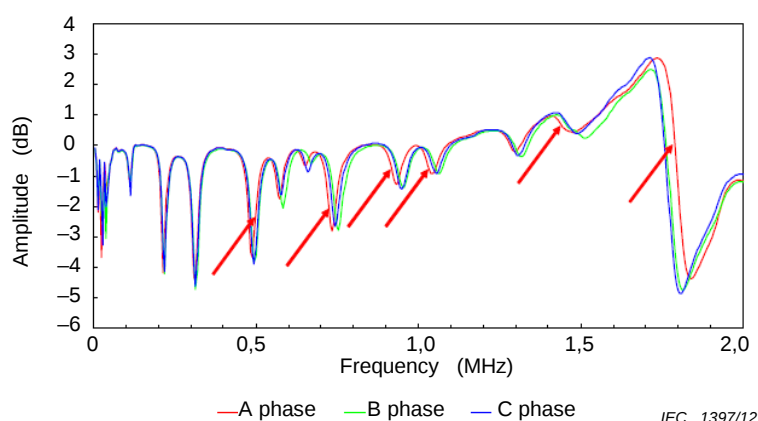
IEC 1393/12

**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**



IEC 1396/12

**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]**



**Figure B.20 – Frequency response of a tap winding with conductor tilting with a photograph of the damage [1]**

#### B.4.11 Conclusion

It is very useful to be able to identify the differences in frequency response in particular frequency regions or features of the frequency response that are expected to result from various types of transformer faults. Although many studies have been carried out to identify such relationships, the findings cannot be generalised across all types of transformer. A particular fault, which may have caused differences in a certain frequency region or to a frequency response feature in one transformer, may be detected in a different frequency region or cause a different response feature in another transformer if it has a different design and/or construction. The severity of the winding movement and deformation will influence the extent of the changes in the frequency response.

The most important step towards making a successful diagnosis with frequency response analysis is to ensure that the measurement is of good quality and the measurement records are systematically logged. These shall be in line with the normative text of this standard.

## **Annex C** (informative)

### **Applications of frequency response measurements**

#### **C.1 Transformer transportation**

The detection and evaluation of damage to a transformer during transportation is a commonly used application of frequency response measurements. The method can provide information about the mechanical condition of the core, the windings and the clamping structures with one set of measurements. All these parts are susceptible to transportation damage. There are however parts of the transformer that are also susceptible to transport damage that are not effectively checked by this measurement. In particular core to frame and tank insulation should also be checked.

As for all other applications of FRA, performing the measurements for comparison under the same conditions is important to get reliable results. Therefore if measurements during transport, or on arrival at site are to be made in the transport configuration then an initial measurement in this configuration is also needed. Usually the transformer will be equipped with bushing cover plates or preferably small transport bushings, which are strongly recommended to facilitate measurement in the transport configuration. Generally medium and large transformers are shipped without oil (depending on size, weight and environmental restrictions) so baseline data from factory or on-site measurements taken with the transformer full of oil cannot be used to compare with measurements taken in the transport configuration because the results will differ from each other. Similarly it shall be noted that measurements made in the transport configuration usually cannot be used as baseline data for future measurements in the operational condition. Measurements made to detect and evaluate damage during transport should generally follow the procedures in this document and they shall include an end-to-end open circuit measurement with all other terminals floating. Short circuit measurements are not able to sensitively detect problems in the core area. The measurement needs to be performed using frequency points that adequately cover the lowest frequency region of the frequency response, since this frequency region is related to the magnetic core which is especially vulnerable for transport damage.

After the initial measurement before the start of the transportation, measurements can be performed at any time during transit to check the integrity of the transformer. It is important to note that the frequency response measurement should be the last electrical test prior to transportation and the first test after arrival. Other tests in between, especially DC tests (e.g. a winding resistance test) may change the core magnetization status and hinder a reliable evaluation of the core integrity. The status of core magnetisation should be noted in the test documentation (whether the previous test was a winding resistance measurement or switching impulse test) along with tap-changer position and the oil level or filling medium if not oil. If the measurement has been performed shortly after draining the oil this fact should be noted, because of the effects of residual oil within the insulation. A subsequent measurement without oil may lead to inconclusive results since the residual oil may drain out of the windings during the transport which may lead to changes in the capacitance and therefore slightly shifted response curves.

It is important that the transportation configuration of the transformer is well documented and available to other testing personnel who have to perform repeat measurements. If there are more than one transportation configuration, then baseline data and configuration records will be required for each one. If the transformer undergoes several distinct transport legs on its journey, for example road, ship, railroad, crane off-loading etc. it may be important to determine where any damage occurred, so measurements before and after particular transport legs may be prudent particularly if they involve different legal custodies or insurance arrangements. After the receipt of the transformer at its final destination a measurement in the transport configuration should be performed to compare with the initial measurement to detect any damage that might have occurred during transportation. If this measurement shows

no abnormalities, another frequency response measurement with the transformer assembled and oil-filled as for service should be performed to be used as baseline data for future measurements. In all cases it is recommended that photographs are taken of the connections between the frequency response measuring equipment and the bushings.

## **C.2 Short-circuit test**

Frequency response measurements have proved to be an accurate way of detecting damage to windings caused by a short circuit test. This detection method is complimentary to a visual inspection, because it may reveal subtle changes to winding dimensions that are not easy to see, but some small displacements to leads etc. may not be easily detected using frequency response measurements.

If a frequency response measurement is used to indicate changes during a short circuit test then the following points should be observed.

The baseline measurement should be made at the short circuit test station before the short circuit test

It is recommended that short circuit measurements are included in the frequency response measurements for this application as this may help to determine if changes are due to core magnetization or winding distortion.

A measurement shall be made at the conclusion of the short circuit tests. It is recommended that frequency response measurements are also made between short-circuit applications to detect any incipient failure before the next short circuit application, but these may be carried out with one winding short circuited if more convenient,

The measurements before and after test should where possible be made using the same measuring equipment and the same measurement leads and measurement lead arrangement to eliminate as many potential sources of uncertainty about the cause of any observed variation as possible.

## Annex D (informative)

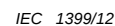
### Examples of measurement configurations

#### D.1 Standard end-to-end measurements on a three-phase auto-transformer with a line-end tap changer

The standard measurements for an auto-transformer with line-end tapplings are shown in Table D.1. Figure D.1 and Table D.2 shows the winding diagram and tap changer connections, the highest LV voltage being on tap position 1 and the change-over at tap position 10.

**Table D.1 – Standard end-to-end measurements on a three-phase auto-transformer**

| Measurement                                                                                                                                                           | Tap | Previous tap | Source and reference ( $V_{in}$ ) | Response ( $V_{out}$ ) | Terminals earthed | Terminals connected together | Comments                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                     | 10  | 9            | A                                 | a                      | none              | none                         | Series winding, no tap-winding in circuit   |
| 2                                                                                                                                                                     | 10  | 9            | B                                 | b                      | none              | none                         | ditto                                       |
| 3                                                                                                                                                                     | 10  | 9            | C                                 | c                      | none              | none                         | ditto                                       |
| 4                                                                                                                                                                     | 1   | 2            | a                                 | Na                     | none              | none                         | Common winding, full tap-winding in circuit |
| 5                                                                                                                                                                     | 1   | 2            | b                                 | Nb                     | none              | none                         | ditto                                       |
| 6                                                                                                                                                                     | 1   | 2            | c                                 | Nc                     | none              | none                         | ditto                                       |
| 7                                                                                                                                                                     | 10  | 9            | a                                 | Na                     | none              | none                         | Common winding, no tap-winding in circuit   |
| 8                                                                                                                                                                     | 10  | 9            | b                                 | Nb                     | none              | none                         | ditto                                       |
| 9                                                                                                                                                                     | 10  | 9            | c                                 | Nc                     | none              | none                         | ditto                                       |
| All terminals not specified in the table to be left floating, except delta windings with only two terminals brought out for closing the delta which should be closed. |     |              |                                   |                        |                   |                              |                                             |



### Table D.2 – Tap-changer connections

| Tap position number | Switch connects  | Low voltage across a, b, c |
|---------------------|------------------|----------------------------|
| 1                   | LV-13, 4-x       | Maximum voltage            |
| 10                  | LV-13/LV-3, LV-y | Rated voltage              |
| 19                  | LV-3, 12-x       | Minimum voltage            |

NOTE The change-over position (tap-position 10) has two possible winding connection configurations depending on whether the previous tap was tap 9 or tap 11, these will give different frequency responses. This is why it is very important to record and be consistent with the previous tap position.

D.2 Inductive inter-winding measurements

The inductive inter-winding measurements on a three-phase transformer (YNd1) are shown in Table D.3 and Figure D.2.

Table D.3 – Inductive inter-winding measurements on a three-phase YNd1 transformer

| Measurement | Tap | Source and reference ( $V_{in}$ ) | Response ( $V_{out}$ ) | Terminals earthed | Terminals connected together | Comments |
|-------------|-----|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------------|----------|
| 1           | Max | A                                 | a                      | N and b           | none                         |          |
| 2           | Max | B                                 | b                      | N and c           | none                         |          |
| 3           | Max | C                                 | c                      | N and a           | none                         |          |

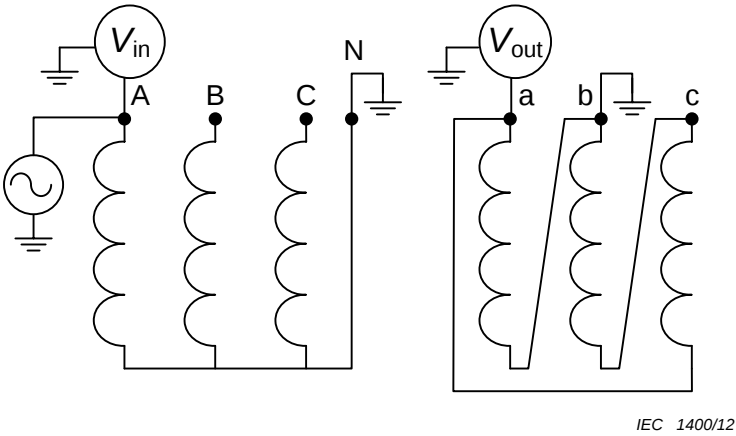


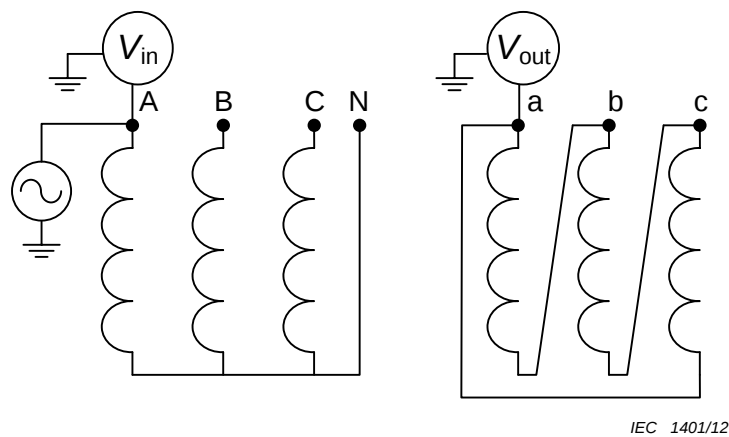
Figure D.2 – Connection diagram of an inductive inter-winding measurement on a three-phase YNd1 transformer

D.3 Capacitive inter-winding measurements

The capacitive inter-winding measurements on a three-phase transformer (YNd1) are shown in Table D.4 and Figure D.3.

Table D.4 – Capacitive inter-winding measurements on a three-phase YNd1 transformer

| Measurement | Tap | Source and reference ( $V_{in}$ ) | Response ( $V_{out}$ ) | Terminals earthed | Terminals connected together | Comments |
|-------------|-----|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------------|----------|
| 1           | Max | A                                 | a                      | none              | none                         |          |
| 2           | Max | B                                 | b                      | none              | none                         |          |
| 3           | Max | C                                 | c                      | none              | none                         |          |



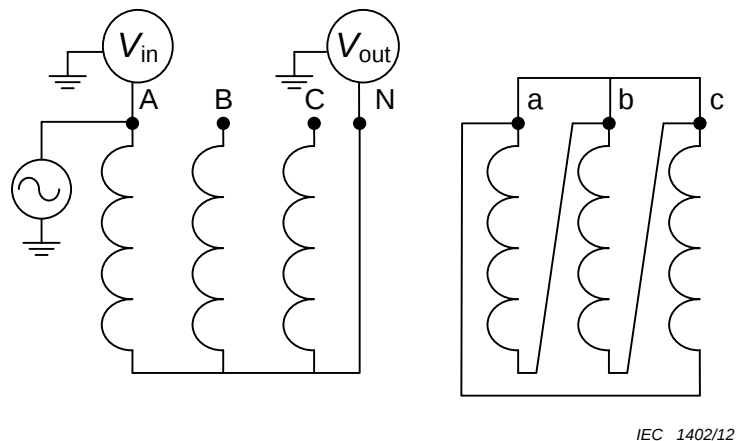
**Figure D.3 – Connection diagram for a capacitive inter-winding measurement on a three-phase YNd1 transformer**

**D.4 End-to-end short-circuit measurements**

The end-to-end short-circuit measurements on a three-phase transformer (YNd1) are shown in Table D.5 and Figure D.4.

**Table D.5 – End-to-end short-circuit measurements on a three-phase YNd1 transformer**

| Measurement | Tap | Source and reference ( $V_{in}$ ) | Response ( $V_{out}$ ) | Terminals earthed | Terminals connected together | Comments |
|-------------|-----|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------------------------|----------|
| 1           | Max | A                                 | N                      | none              | a-b-c                        |          |
| 2           | Max | B                                 | N                      | none              | a-b-c                        |          |
| 3           | Max | C                                 | N                      | none              | a-b-c                        |          |



**Figure D.4 – Connection diagram for an end-to-end short-circuit measurement on a three-phase YNd1 transformer**

## Annex E (informative)

### XML data format

The following XML data format should be used to share the measurement records.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!-- Version information should always be included in case the format changes in the
future. -->
- <IECFraFile version="1.0">
- <Transformer identifier="012345678">
  <Date>2009-10-01</Date>
  <Time>12h55</Time>
  <Manufacturer>ABCDEFGF</Manufacturer>
  <SerialNumber>012345678</SerialNumber>
</Transformer>
<!-- Optionally more information about the test object may be stored here: -->
- <MeasurementSetup>
  <MeasuringEquipment manufacturer="ABCDEF" instrument="FRAabcdef"
    serial="aabbccddeeff" />
  <PeakVoltage unit="V">12.3</PeakVoltage>
  <ReferenceTerminal>A</ReferenceTerminal>
  <ResponseTerminal>B</ResponseTerminal>
  <ConnectedTerminals>a1-b1-c1,a2-b2-c2</ConnectedTerminals>
  <EarthedTerminals />
  <!-- the "from" attribute holds the tap position from which the tap-changer
was moved to reach the tap-position used during the measurement -->
  <OLTC from="5">6</OLTC>
  <DETC />
  <TransformerTemperature unit="°C">45</TransformerTemperature>
  <FluidFilled>yes</FluidFilled>
  <LenghtOfUnshieldedConnection unit="mm">1200</LenghtOfUnshieldedConnection>
  <Comments>Use the "comments" section to provide any additional information that
may be required to repeat the measurement.</Comments>
</MeasurementSetup>
- <MeasurementResult>
  <Point frequency="1" amplitude="-30.1" phase="12.7" />
  <Point frequency="2" amplitude="-34.6" phase="22" />
</MeasurementResult>
</IECFraFile>
```

## Bibliography

- [1] CIGRE Working Group A2.26, Brochure 342, "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA)", Brochure 342, Paris, April 2008.
  - [2] A. Kraetge, M. Kruger, J. L. Velasquez, H. Viljoen and A. Dierks, "Aspects of Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers", *CIGRE 2009 6<sup>th</sup> Southern Africa Regional Conference*, Paper 504, 17-21 August 2009.
  - [3] J. Christian and K. Feser, "Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no.1, pp. 214-220, January 2004.
  - [4] S. A. Ryder, "Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements," in *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Boston, MA, USA, 7-10 April 2002, pp. 187-190.
  - [5] D. M. Sofian, Z. D. Wang, and J. Li, "Interpretation of Transformer FRA Responses – Part 2: Influence of Transformer Structure," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PP, no. 99, pp. 1-8, 28 June 2010.
  - [6] Z. D. Wang, J. Li, and D. M. Sofian, "Interpretation of Transformer FRA Responses – Part I: Influence of Winding Structure," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 703-710, April 2009.
  - [7] A. W. Darwin, D. M. Sofian, Z. D. Wang and P. N. Jarman, "Interpretation of Frequency Response Analysis (FRA) Results for Diagnosing Transformer Winding Deformation," *CIGRE 2009 6<sup>th</sup> Southern Africa Regional Conference*, Paper 503, 17-21 August 2009.
  - [8] J. A. Lapworth and P. N. Jarman, "UK Experience of the Use of Frequency Response Analysis (FRA) for Detecting Winding Movement Faults in Large Power Transformers," *CIGRE Transformers Colloquium*, 2-4 June 2003.
-



## 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 capacitatives 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.

#### 2 Termes et définitions

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

##### 2.1

##### **réponse en fréquence**

rapport d'amplitude et différence de phase entre les tensions mesurées aux deux bornes de l'objet soumis à essai sur une plage de fréquences lorsque l'une des bornes est excitée par une source de tension

Note 1 à l'article: Le résultat d'une mesure de réponse en fréquence est une série de rapports d'amplitude et de différences de phase à des fréquences spécifiques sur une plage de fréquences.

Note 2 à l'article: La tension mesurée est la tension qui se crée aux bornes d'une impédance et elle est également associée au courant.

##### 2.2

##### **analyse de la réponse en fréquence**

##### **FRA**

technique utilisée pour détecter un dommage utilisant des mesures de réponse en fréquence

Note 1 à l'article: Les termes SFRA et IFRA sont couramment utilisés et font référence à l'utilisation, soit d'une source de tension à balayage de fréquences, soit d'une source de tension de choc. À condition que l'appareillage de mesure soit conforme aux exigences de l'Article 5, la présente norme peut être appliquée à ces deux techniques.

##### 2.3

##### **connexion de source**

connexion reliée à la source de tension de l'instrument de mesure utilisé pour fournir une tension d'entrée à l'objet soumis à essai

##### 2.4

##### **connexion de référence**

##### **$V_{in}$**

connexion reliée au canal de référence de l'instrument de mesure utilisé pour mesurer la tension d'entrée de l'objet soumis à essai

##### 2.5

##### **connexion de réponse**

##### **$V_{out}$**

connexion reliée au canal de réponse de l'instrument de mesure utilisé pour mesurer la tension de sortie de l'objet soumis à essai

## 2.6

### mesure entre extrémités

mesure de réponse en fréquence effectuée sur une unique bobine (enroulement de phase), les connexions de source et de référence ( $V_{in}$ ) étant reliées à une extrémité et la connexion de réponse ( $V_{out}$ ) reliée à l'autre extrémité

## 2.7

### mesure capacitive entre enroulements

mesure de réponse en fréquence effectuée sur deux bobines adjacentes (enroulements de même phase), les connexions de source et de référence ( $V_{in}$ ) étant reliées à une extrémité d'un enroulement, la connexion de réponse ( $V_{out}$ ) reliée à une extrémité d'un autre enroulement et les extrémités des autres enroulements étant flottantes

Note 1 à l'article: Ce type de mesure ne s'applique pas aux enroulements ayant une partie ou une liaison commune entre eux.

## 2.8

### mesure inductive entre enroulements

mesure de réponse en fréquence effectuée sur deux bobines adjacentes (enroulements de même phase), les connexions de source et de référence ( $V_{in}$ ) étant reliées à une extrémité de l'enroulement de tension plus élevée, la connexion de réponse ( $V_{out}$ ) reliée à une extrémité de l'autre enroulement et les autres extrémités des deux enroulements étant reliées à la terre

## 2.9

### mesure entre extrémités avec court-circuit

mesure de réponse en fréquence effectuée sur une unique bobine (enroulement de phase), les connexions de source et de référence ( $V_{in}$ ) étant reliées à une extrémité, la connexion de réponse ( $V_{out}$ ) reliée à l'autre extrémité et un autre enroulement de la même phase court-circuité

## 2.10

### mesure de référence

mesure de réponse en fréquence effectuée sur l'objet soumis à essai pour fournir une base de comparaison avec une mesure ultérieure sur le même objet soumis à essai dans la même configuration

## 3 Objectif des mesures de réponse en fréquence

Les mesures de réponse en fréquence sont effectuées de manière à pouvoir réaliser l'analyse de la réponse en fréquence (FRA). La FRA peut être utilisée pour détecter des variations de la partie active des objets soumis à essai (enroulements, connexions et noyau).

NOTE La FRA est généralement utilisée pour détecter des modifications géométriques et des courts-circuits électriques dans les enroulements, voir Annexe B.

Certains exemples de conditions pouvant être évaluées en utilisant la FRA sont:

- un dommage faisant suite à un défaut franc ou à un autre événement de fort courant (y compris un essai de court-circuit),
- un dommage faisant suite à un défaut de changeur de prise,
- un dommage au cours du transport, et
- un dommage faisant suite à un événement sismique.

D'autres informations relatives à l'application des mesures de réponse en fréquence sont données à l'Annexe C.

La détection d'un dommage en utilisant la FRA est plus efficace lorsque les données de la mesure de réponse en fréquence sont disponibles pour le même transformateur lorsque celui-

ci est dans un bon état connu (mesure de référence), il est donc préférable d'effectuer la mesure sur tous les grands transformateurs, soit en usine, soit lorsque le transformateur est mis en service sur site, soit les deux. Si aucune mesure de référence n'est disponible pour un transformateur particulier, on peut obtenir des résultats de référence soit à partir d'un transformateur similaire, soit d'une autre phase du même transformateur (voir Annexe B).

On peut également utiliser les mesures de réponse en fréquence pour la modélisation de réseaux d'énergie, y compris des études de surtensions transitoires.

## 4 Méthode de mesure

### 4.1 Généralités

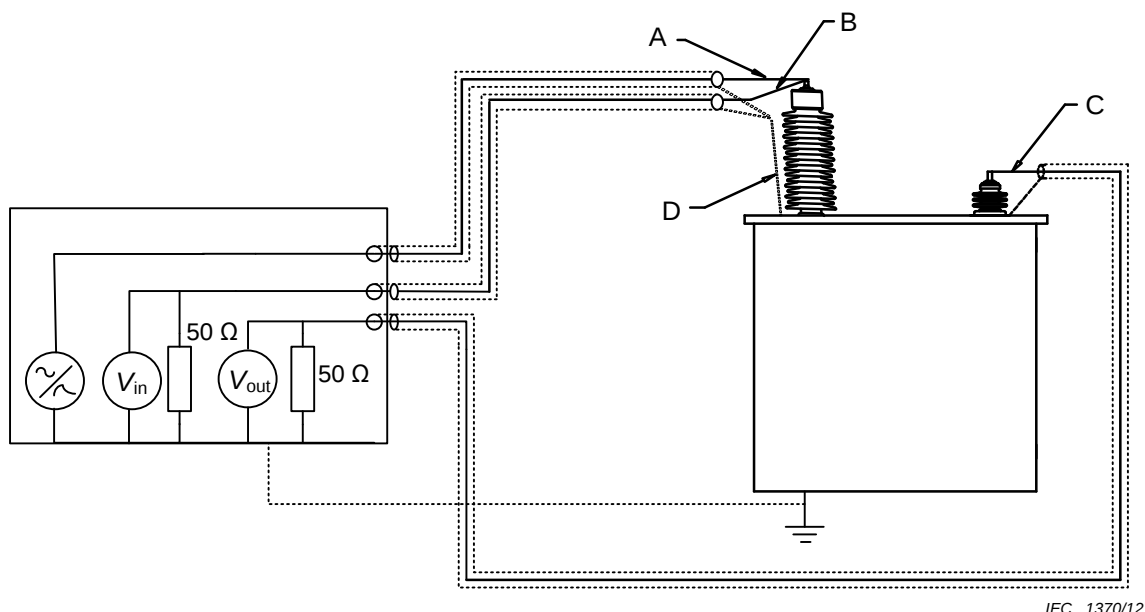
Pour effectuer une mesure de réponse en fréquence, un signal basse tension est appliqué à une borne de l'objet soumis à essai par rapport à la cuve. La tension mesurée sur cette borne d'entrée est utilisée comme signal de référence et un deuxième signal de tension (signal de réponse) est mesuré sur une deuxième borne en référence à la cuve. L'amplitude de la réponse en fréquence est le rapport scalaire entre le signal de réponse ( $V_{out}$ ) et la tension de référence ( $V_{in}$ ) (en dB) en fonction de la fréquence. La phase de la réponse en fréquence est la différence de phase entre  $V_{out}$  et  $V_{in}$  (en degrés).

La mesure de la tension de réponse est effectuée aux bornes d'une impédance de 50  $\Omega$ . Toute connexion coaxiale entre la borne de l'objet soumis à essai et l'instrument de mesure de tension doit comporter une impédance adaptée. Pour effectuer une mesure de rapport précise, les paramètres techniques des canaux de référence et de réponse de l'instrument de mesure et de toutes les connexions de mesure doivent être identiques.

NOTE 1 L'impédance caractéristique des connexions de mesure coaxiales est choisie de manière à être adaptée à l'impédance d'entrée du canal de mesure pour minimiser les réflexions de signal et réduire l'influence de la connexion coaxiale sur la mesure au point où elle a un effet pratique négligeable ou nul sur la mesure dans la plage de fréquences de la mesure. Avec une connexion d'impédance adaptée, l'impédance de mesure est effectivement appliquée à la borne de l'objet soumis à essai.

NOTE 2 Puisque  $V_{out}/V_{in}$  varie sur une plage importante, ce rapport est exprimé en décibels (dB). La réponse en tension relative en dB est calculée par  $20 \times \log_{10}(V_{out}/V_{in})$ , où ( $V_{out}/V_{in}$ ) est le rapport scalaire.

Un exemple de configuration générale de la méthode de mesure utilisant des connexions de mesure coaxiales est représentée à la Figure 1.



- A connexion de source
- B connexion de référence
- C connexion de réponse
- D connexion de terre

**Figure 1 – Exemple de schéma du circuit de mesure de réponse en fréquence**

#### 4.2 État de l'objet soumis à essai pendant la mesure

Pour des mesures en usine et sur site, l'objet soumis à essai doit être entièrement assemblé comme pour l'exploitation, complet avec toutes les traversées, mais il n'est pas nécessaire d'assembler les éléments de refroidissement et les accessoires associés. Les transformateurs et les bobines d'inductance remplis de liquide ou de gaz doivent être remplis de liquide ou de gaz du même type (permittivité relative similaire) que ceux qui seront utilisés en exploitation. Tous les jeux de barres ou connexions des autres systèmes ou d'essai doivent être enlevés et il ne doit y avoir aucune autre liaison sur l'objet soumis à essai que celles qui sont utilisées pour la mesure spécifique effectuée. Si des transformateurs de courant internes sont installés mais ne sont pas connectés à un système de protection ou de mesure, les bornes des secondaires doivent être court-circuitées et reliées à la terre. Les liaisons entre le noyau et la cuve et entre la carcasse et la cuve doivent être effectuées et la cuve doit être reliée à la terre.

Si le transformateur n'est pas assemblé en usine dans les conditions d'exploitation, si par exemple des traversées à huile/air sont utilisées en usine et que des traversées à huile/SF<sub>6</sub> doivent être utilisées en exploitation, la mesure de référence de FRA ne peut alors être effectuée que sur site. Les mesures de configuration de transport peuvent cependant être possibles, voir ci-dessous.

Si des connexions particulières ont été spécifiées par l'acheteur et sont fournies sur l'objet soumis à essai pour permettre d'effectuer une mesure de réponse en fréquence lorsque celui-ci est dans la configuration de transport, des mesures additionnelles doivent alors être effectuées dans la configuration de transport (vidangé si nécessaire pour le transport) avant le transport et lors de la livraison sur site ou comme spécifié par l'acheteur.

Pour les mesures sur site, l'objet soumis à essai doit être déconnecté du réseau électrique associé sur toutes les bornes des enroulements et doit être sécurisé pour l'essai. La phase, le neutre et toutes les liaisons de lignes tertiaires doivent être déconnectés mais la terre de la

cuve, le matériel auxiliaire et les connexions de service du transformateur de courant doivent rester connectés. Si deux connexions sur un coin d'un enroulement triangle sont sorties, le transformateur doit être mesuré triangle fermé (voir également 0). S'il est impossible d'effectuer une liaison directe à la borne, les détails des liaisons doivent alors être notés avec les données de mesure, car des jeux de barres supplémentaires reliés aux bornes peuvent influencer sur les résultats des mesures.

NOTE Il peut y avoir une différence dans la connexion des transformateurs de courant (CT) entre les mesures effectuées sur site et celles qui sont effectuées en usine, la différence de réponse en fréquence entre un transformateur avec des CT court-circuités et reliés à la terre et un transformateur avec les CT connectés à un réseau de protection à basse impédance est normalement négligeable.

Si le transformateur est directement connecté à des jeux de barres isolées par SF<sub>6</sub>, il est alors possible d'effectuer la mesure par liaison à la connexion de terre déconnectée d'un sectionneur de mise à la terre. Dans ce cas, la mesure doit être effectuée à la fois directement sur les bornes avant d'assembler le jeu de barres à SF<sub>6</sub> et en utilisant le sectionneur de mise à la terre.

Lorsqu'elle est effectuée en usine, la mesure doit être réalisée approximativement à la température ambiante (elle ne doit pas être réalisée par exemple juste après un essai d'échauffement). La température du diélectrique de l'objet soumis à essai (normalement, la température du liquide supérieur) pendant la mesure doit être notée. Pour des mesures effectuées sur site, la température n'est pas régulée et bien que des températures extrêmes puissent avoir un effet minime, celui-ci est normalement négligeable. L'effet de la température sur les mesures de réponse en fréquence est illustré en B.4.8.

Il est recommandé que les mesures possibles sur site ne soient pas effectuées pendant que la température de l'objet soumis à essai change rapidement, par exemple immédiatement suivant un traitement d'huile.

### **4.3 Connexions de mesure et contrôles**

#### **4.3.1 Connexions de mesure et de mise à la terre**

Les méthodes de liaison des connexions et la mise à la terre des connexions de l'objet soumis à essai sont données à l'Annexe A.

Des connexions de mauvaise qualité peuvent entraîner des erreurs de mesure significatives, il faut prêter attention à la continuité des connexions principales et des connexions de mise à la terre. Côté instrument de mesure, la continuité de la connexion principale et celle de la connexion de mise à la terre doivent être contrôlées à l'extrémité du câble coaxial avant d'effectuer la mesure. Côté objet soumis à essai, on doit vérifier les connexions aux boulons ou aux brides pour s'assurer que la connexion à l'enroulement et la cuve est de bonne qualité.

#### **4.3.2 Mesure de contrôle de zéro**

Si celle-ci est spécifiée, une mesure de contrôle de zéro doit être effectuée en tant que mesure complémentaire. Avant de commencer les mesures, toutes les connexions de mesure doivent être reliées à l'une des bornes de plus haute tension et reliées à la terre en utilisant la méthode normale. Une mesure est alors effectuée, indiquant la réponse en fréquence du circuit de mesure seul. La mesure de contrôle de zéro doit également être répétée sur les autres bornes de tension si cela est spécifié.

La mesure de contrôle de zéro peut procurer des informations utiles sur la fréquence la plus élevée sur laquelle on peut se baser pour l'interprétation de la mesure. La mesure de contrôle de zéro ne constitue pas un essai d'étalonnage et aucune tentative ne devrait être effectuée afin de corriger les résultats d'une mesure à partir de déviations rencontrées lors de la mesure de contrôle de zéro.

### 4.3.3 Contrôle de répétabilité

À la fin des mesures normales, les connexions de mesure et les liaisons de terre doivent être déconnectées et la première mesure doit alors être répétée et notée.

Ce contrôle est nécessaire pour évaluer la répétabilité et la plage de fréquences de diagnostic utilisable dans les conditions spécifiques de la mesure.

### 4.3.4 Contrôle de performance de l'instrument

Pour vérifier la performance de l'instrument, l'un des trois contrôles suivants doit être réalisé à chaque fois que l'on a un doute sur la performance de l'instrument.

- a) Relier ensemble les canaux source, de référence et de réponse de l'instrument, en utilisant des connexions convenables à faibles pertes, vérifier que le rapport d'amplitude mesuré est de  $0 \text{ dB} \pm 0,3 \text{ dB}$  sur toute la plage de fréquences.

Connecter ensemble les canaux source et de référence et laisser en circuit ouvert la borne de réponse, vérifier que le rapport d'amplitude mesuré est inférieur à  $-90 \text{ dB}$  sur toute la plage de fréquences.

- b) La performance de l'instrument peut être contrôlée en mesurant la réponse d'un objet soumis à essai connu (boîte d'essai) et en vérifiant que le rapport d'amplitude mesuré correspond à la réponse attendue de l'objet soumis à essai dans les exigences données en 5.1.2 sur toute la plage de fréquences. L'objet soumis à essai doit avoir une réponse en fréquence qui couvre la plage d'atténuation de  $-10 \text{ dB}$  à  $-80 \text{ dB}$ .
- c) On peut vérifier le bon fonctionnement de l'instrument en utilisant une procédure de contrôle de performance fournie par le fabricant de l'instrument. Cette procédure de contrôle de performance doit vérifier que l'instrument fonctionne avec les paramètres donnés en 5.1.2 au moins sur une plage d'atténuation de  $-10 \text{ dB}$  à  $-80 \text{ dB}$  sur toute la plage de fréquences.

## 4.4 Configuration de la mesure

### 4.4.1 Généralités

Pour des configurations courantes d'enroulements de transformateurs et de bobines d'inductance, un ensemble normal de mesures est fourni, celui-ci étant suffisant dans la majorité des cas pour fournir une mesure de référence. Ces mesures doivent être effectuées dans tous les cas. D'autres mesures peuvent être spécifiées si nécessaire, soit pour fournir certaines informations supplémentaires dans des cas particuliers, soit pour confirmer les mesures précédentes. Les mesures normales sur les autres types de transformateurs et de bobines d'inductance doivent suivre les principes suivants.

### 4.4.2 Principes de choix de la configuration de mesure

#### 4.4.2.1 Types de mesure

Les mesures normales doivent être des mesures entre extrémités de chaque phase de chaque enroulement, les phases et les enroulements étant séparés dans la mesure du possible et toutes les autres bornes étant laissées flottantes. Des mesures complémentaires, le cas échéant, peuvent inclure des mesures capacitives entre enroulements, inductives entre enroulements et entre extrémités avec court-circuit.

#### 4.4.2.2 Position du changeur des prises

Pour les transformateurs et les bobines d'inductance comportant un changeur de prise en charge (OLTC), la mesure normale sur l'enroulement à prises doit s'effectuer

- a) sur la position de prise ayant le plus grand nombre de spires effectives en circuit, et
- b) sur la position de prise avec l'enroulement de prises hors circuit.

Les autres enroulements ayant un nombre de spires fixe doivent être mesurés sur la position de prise avec le plus grand nombre de spires effectives dans l'enroulement de prise. Des mesures complémentaires peuvent être spécifiées pour d'autres positions de prise.

Pour les autotransformateurs avec un changeur de prises en extrémité de ligne, les mesures normales doivent être effectuées:

- sur l'enroulement série avec le nombre minimum de spires réelles de l'enroulement de prise en circuit (prise pour la tension BT la plus haute pour un agencement de prise de type potentiométrique linéaire ou position de changement pour un agencement de prise du type à inversion, ou la prise pour la tension BT la plus basse pour un agencement de prise linéaire à enroulement séparé),
- sur l'enroulement commun avec le nombre maximum de spires effectives de l'enroulement de prise en circuit (prise pour la tension BT la plus haute), et
- sur l'enroulement commun avec le nombre minimum de spires réelles de l'enroulement de prise en circuit (prise pour la tension BT la plus basse pour un agencement de prise de type potentiométrique linéaire ou à enroulement séparé ou position de changement pour un agencement de prise du type à inversion).

NOTE 1 Le choix d'une position de prise est destiné à fournir au moins une mesure avec et une mesure sans enroulement de prise en circuit de façon à pouvoir identifier plus facilement qu'un dommage se produit dans l'enroulement de prise ou dans l'enroulement principal.

Pour des positions de neutre ou de changement, le sens du mouvement du changeur de prise doit être dans la direction de la diminution de tension sauf spécification contraire. Le sens du mouvement (montée ou descente) doit être noté.

NOTE 2 La position du sélecteur de changement dans des agencements d'inversion et de réglage précis a un effet considérable sur la réponse en fréquence mesurée.

Pour les transformateurs comportant à la fois un OLTC et un changeur de prise hors tension (DETC), le DETC doit être dans la position de service, si cela est spécifié ou sinon dans la position nominale pour la plage de mesures dans les différentes positions de l'OLTC décrites en 4.4.2.2.

Pour les transformateurs équipés d'un DETC, les mesures de référence doivent aussi être effectuées pour chaque position du DETC avec l'OLTC (si installé) dans la position avec le maximum de spires effectives.

Pour effectuer une mesure de réponse en fréquence, il n'est pas recommandé de modifier la position d'un DETC sur un transformateur ayant été en service, il convient d'effectuer la mesure sur la position du DETC « telle quelle ». Il est donc nécessaire d'effectuer un nombre suffisant de mesures de référence pour s'assurer que les données de référence sont disponibles pour toute position de service probable (« telle quelle ») du DETC.

#### **4.4.3 Enroulements en étoile et auto-connectés avec une borne de neutre**

Pour la mesure normale, le signal doit être appliqué à la connexion de ligne ou pour les enroulements en série, à la borne de plus haute tension. Une mesure complémentaire peut être spécifiée, le signal étant appliqué à la borne de neutre si celle-ci est requise pour la compatibilité avec des mesures précédentes. Un enroulement connecté en étoile dont le neutre n'est pas sorti, doit être traité comme un enroulement en triangle. La liste des mesures normales pour un enroulement connecté en étoile avec des prises est donnée dans le Tableau 1.

**Tableau 1 – Mesures normales pour un enroulement connecté en étoile avec des prises**

| Numéro de mesure | Connexions de source et de référence ( $V_{in}$ ) reliées à | Connexion de réponse ( $V_{out}$ ) reliée à | Position de prise                 |
|------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1                | Borne de ligne, phase 1                                     | Neutre                                      | Maximum de spires effectives      |
| 2                | Borne de ligne, phase 2                                     | Neutre                                      | Maximum de spires effectives      |
| 3                | Borne de ligne, phase 3                                     | Neutre                                      | Maximum de spires effectives      |
| 4                | Borne de ligne, phase 1                                     | Neutre                                      | Enroulement de prise hors circuit |
| 5                | Borne de ligne, phase 2                                     | Neutre                                      | Enroulement de prise hors circuit |
| 6                | Borne de ligne, phase 3                                     | Neutre                                      | Enroulement de prise hors circuit |

#### 4.4.4 Enroulements en triangle et autres enroulements sans neutre accessible

Si les enroulements en triangle peuvent être divisés en phases individuelles (six traversées sorties), la mesure normale doit alors être effectuée avec les enroulements divisés.

Pour les transformateurs de génératrices de grande taille, lorsqu'il est malcommode d'enlever en service les liaisons entre phases, il est recommandé d'effectuer la mesure de référence en usine et lors de la mise en service, le triangle étant ouvert et fermé.

Les mesures normales doivent être effectuées tour à tour sur chaque phase, le signal étant appliqué à la borne ayant le plus petit numéro ou la lettre la plus proche du début de l'alphabet en premier et la réponse étant mesurée sur la borne ayant le numéro ou la lettre qui suit et en poursuivant selon une rotation cyclique (voir Tableau 2).

Pour des enroulements en triangle tertiaires ou de stabilisation, le triangle doit être fermé.

Pour des enroulements en triangle tertiaires ou de stabilisation qui sont reliés à la terre sur un coin en service, la terre doit être enlevée si possible sans enlever de liquide ou de gaz.

**Tableau 2 – Mesures normales pour un enroulement connecté en triangle sans prise**

| Numéro de mesure | Connexions de source et de référence ( $V_{in}$ ) reliées à | Connexion de réponse ( $V_{out}$ ) reliée à |
|------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1                | A, U, R ou 1                                                | B, V, S ou 2                                |
| 2                | B, V, S ou 2                                                | C, W, T ou 3                                |
| 3                | C, W, T ou 3                                                | A, U, R ou 1                                |

#### 4.4.5 Enroulements connectés en zigzag

Les enroulements connectés en zigzag doivent être mesurés comme des enroulements en étoile avec une connexion de neutre.

NOTE On ne s'attend pas à ce que la correspondance entre les réponses en fréquence des différentes phases d'un enroulement connecté en zigzag soit aussi proche que ce qui serait généralement attendu pour un enroulement connecté en étoile.

#### 4.4.6 Transformateurs triphasés à deux enroulements

Les mesures normales doivent être constituées d'une mesure de chaque phase de chaque enroulement, totalisant six mesures pour un transformateur sans prise et neuf mesures pour un transformateur avec un changeur de prise en charge.

#### 4.4.7 Autotransformateurs triphasés

Les mesures normales doivent être constituées d'une mesure de chaque phase de l'enroulement série et l'enroulement commun séparément avec une mesure supplémentaire de l'enroulement commun pour les transformateurs avec un changeur de prise en charge, totalisant six mesures pour un transformateur sans prise et neuf mesures pour un transformateur avec un changeur de prise en charge. Si le transformateur comporte un enroulement tertiaire sorti sur trois bornes de ligne (phase), trois mesures supplémentaires sont requises sur cet enroulement.

#### 4.4.8 Transformateur déphaseurs

La mesure normale doit être effectuée d'une borne d'entrée à une borne de sortie sur chaque phase et du neutre de l'enroulement shunt à la borne de sortie sur chaque phase, chacune sur une prise de neutre et sur chaque prise extrême, totalisant 18 mesures. Si le transformateur déphaseur est du type à deux noyaux, comportant des interconnexions externes pouvant être enlevées sur site, celui-ci doit alors être traité comme deux transformateurs séparés.

#### 4.4.9 Bobines d'inductance

Les bobines d'inductance série doivent être mesurées d'une borne d'entrée à une borne de sortie sur chaque phase, totalisant trois mesures pour une bobine d'inductance triphasée. Les bobines d'inductance shunt doivent être traitées comme un enroulement en étoile d'un transformateur, totalisant trois mesures pour une bobine d'inductance triphasée sans prise et six pour une bobine d'inductance avec prises.

#### 4.4.10 Méthode de spécification de mesures complémentaires

Le cas échéant, des mesures complémentaires doivent être spécifiées en indiquant la connexion à chaque borne de l'objet soumis à essai (signal et référence, réponse, mise à la terre, flottantes ou connectées ensemble), la position de prise et la position de prise précédente pour chaque mesure complémentaire. Le format présenté au Tableau 3 doit être utilisé.

**Tableau 3 – Format de spécification de mesures complémentaires**

| Mesure | Prise | Prise précédente | Source et référence ( $V_{in}$ ) | Réponse ( $V_{out}$ ) | Bornes à la terre | Bornes connectées ensemble | Commentaires |
|--------|-------|------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| 1      |       |                  |                                  |                       |                   |                            |              |
| 2      |       |                  |                                  |                       |                   |                            |              |
| 3      |       |                  |                                  |                       |                   |                            |              |
| .      |       |                  |                                  |                       |                   |                            |              |
| .      |       |                  |                                  |                       |                   |                            |              |
| .      |       |                  |                                  |                       |                   |                            |              |

L'identification des bornes entrées dans le tableau doit correspondre à celle qui est marquée de manière indélébile sur l'objet soumis à essai et doit être présentée sur un schéma inclus dans la spécification.

Des exemples de configurations de mesure particulières utilisant ce format sont donnés à l'Annexe D.

#### 4.5 Plage de fréquences et points de mesure pour la mesure

La mesure à la fréquence la plus basse doit être effectuée à 20 Hz ou en dessous.

La mesure à la fréquence minimale la plus haute pour les objets soumis à essai avec la tension la plus haute > 72,5 kV doit être effectuée à 1 MHz.

La mesure à la fréquence minimale la plus haute pour les objets soumis à essai avec la tension la plus haute ≤ 72,5 kV doit être effectuée à 2 MHz.

Il est recommandé d'utiliser une fréquence de mesure la plus haute d'au moins 2 MHz pour la compatibilité et la simplicité pour tous les objets soumis à essai.

**NOTE** La reproductibilité de la mesure est meilleure à des fréquences supérieures à 1 MHz en utilisant les plus courtes connexions de terre possibles sur des traversées de plus petite dimension et l'information haute fréquence est plus importante pour le diagnostic d'enroulements physiquement plus petits (voir B.3).

En dessous de 100 Hz, les mesures doivent être effectuées par intervalles ne dépassant pas 10 Hz; au-dessus de 100 Hz, un minimum de 200 mesures approximativement régulièrement espacées sur une échelle linéaire ou logarithmique doivent être effectuées dans chaque décade de fréquences.

Si l'utilisateur du transformateur n'a pas besoin des informations de basse fréquence utilisées pour diagnostiquer des modifications dans le noyau, une fréquence de mesure inférieure qui n'est pas inférieure à 5 kHz peut être spécifiée pour la mesure.

## **5 Appareillage de mesure**

### **5.1 Instrument de mesure**

#### **5.1.1 Plage dynamique**

La plage dynamique minimale de l'instrument de mesure doit être comprise entre +10 dB et -90 dB du niveau maximum du signal de sortie de la source de tension pour un rapport signal sur bruit minimum de 6 dB sur toute la plage de fréquences.

#### **5.1.2 Précision de la mesure d'amplitude**

La précision de la mesure du rapport entre  $V_{in}$  et  $V_{out}$  doit être meilleure que  $\pm 0,3$  dB pour tous les rapports compris entre +10 dB et -40 dB et que  $\pm 1$  dB pour tous les rapports compris entre -40 dB et -80 dB sur toute la plage de fréquences.

#### **5.1.3 Précision de la mesure de phase**

La précision de la mesure de la différence de phase entre  $V_{in}$  et  $V_{out}$  doit être meilleure que  $\pm 1^\circ$  pour tous les rapports compris entre +10 dB et -40 dB sur toute la plage de fréquences.

#### **5.1.4 Plage de fréquences**

La plage de fréquences minimale doit être de 20 Hz à 2 MHz.

#### **5.1.5 Précision de la fréquence**

La précision de la fréquence (indiquée dans le rapport de mesure) doit être meilleure que  $\pm 0,1$  % sur toute la plage de fréquences.

#### **5.1.6 Résolution de la mesure sur la bande passante**

Pour les mesures en dessous de 100 Hz, la résolution maximale de la mesure sur la bande passante (entre les points à -3 dB) doit être de 10 Hz; au-dessus de 100 Hz, elle doit être inférieure à 10 % de la fréquence de mesure ou à la moitié de l'intervalle entre des fréquences de mesure adjacentes, en prenant la plus faible des deux valeurs.

### 5.1.7 Plage de températures de fonctionnement

L'instrument doit fonctionner en respectant la précision et les autres exigences sur une plage de températures de 0 à +45 °C.

### 5.1.8 Lissage des données enregistrées

Pour satisfaire aux exigences de la présente norme, les données de sortie enregistrées ne doivent pas être lissées par une méthode utilisant des mesures à des fréquences adjacentes, mais en moyennant ou par d'autres techniques permettant de diminuer le bruit en utilisant des mesures multiples à une fréquence particulière ou en utilisant des mesures à l'intérieur de la résolution de la mesure sur la bande passante pour cette fréquence de mesure particulière sont acceptables.

Les données de sortie affichées à l'écran ou toutes autres données de sortie additionnelles fournies en complément de celles requises par l'Article 6 ne sont pas sujettes aux exigences de l'Article 5, toutefois il est recommandé qu'une fonction soit disponible afin de visualiser les données enregistrées suivant les règles de l'Article 6.

### 5.1.9 Étalonnage

L'instrument doit être étalonné à intervalles réguliers par rapport à une norme de référence traçable dans un système qualité reconnu.

## 5.2 Câbles de mesure

Trois câbles de mesure séparés doivent être utilisés pour la source, la référence et la réponse. Les câbles coaxiaux utilisés pour la mesure doivent être de longueur égale et doivent avoir une impédance caractéristique de 50  $\Omega$ . L'affaiblissement du signal provoqué par un câble seul doit être inférieur à 0,3 dB à 2 MHz. La mesure de contrôle de zéro effectuée sans objet soumis à essai ou connexions de terre doit produire un écart d'amplitude à 2 MHz inférieur à 0,6 dB. La longueur maximale des câbles pour un système à connexion passive doit être de 30 m.

NOTE Si une méthode de mesure alternative à celle illustrée à la Figure 1 est utilisée, par exemple si une impédance de mesure, un amplificateur d'entrée ou un capteur actif est utilisé près de l'objet soumis à essai, alors les connexions entre le shunt, l'amplificateur ou le capteur et toute autre composante de l'instrument ne sont pas « utilisées pour la mesure » au sens de cet Article et elles ne doivent pas se conformer à cette partie de la spécification à condition qu'elles n'affectent pas la mesure et que les autres exigences de l'Article 5 soient respectées.

## 5.3 Impédance

L'impédance de mesure de la tension de réponse doit être de 50  $\Omega \pm 2\%$  sur toute la plage de fréquences.

Si des connexions coaxiales de mesure sont utilisées, l'impédance d'entrée des canaux de tension de l'instrument de mesure doit être de 50  $\Omega \pm 2\%$  sur toute la plage de fréquences.

## 6 Enregistrements des mesures

### 6.1 Données à enregistrer pour chaque mesure

Pour chaque mesure, les données doivent être enregistrées dans un fichier unique lisible par ordinateur, dans le format de spécification XML 1.0. Les données suivantes doivent être enregistrées à chaque mesure.

- a) Identifiant, séquence unique de lettres et/ou de chiffres pour identifier l'objet soumis à essai, celui-ci est généralement le numéro de série du client ou le numéro d'emplacement du transformateur ou de la bobine d'inductance.
- b) Date, date à laquelle la mesure a été effectuée, au format AAAA-MM-JJ.

- c) Heure, heure à laquelle la mesure s'est terminée, au format HHhMM (h étant la lettre h utilisée comme délimiteur) dans un format sur 24 heures.
- d) Fabricant de l'objet soumis à essai, fabricant du transformateur ou de la bobine d'inductance mesuré(e).
- e) Numéro de série de l'objet soumis à essai, numéro unique attribué par le fabricant au transformateur ou à la bobine d'inductance.
- f) Matériel de mesure, identification unique du fabricant de l'instrument de mesure, modèle de l'instrument de mesure et numéro de série individuel de l'instrument utilisé.
- g) La tension crête utilisée pour la mesure.
- h) Borne de référence, identification de la borne de l'objet soumis à essai à laquelle ont été connectées les câbles de référence et de source.
- i) Borne de réponse, identification de la borne de l'objet soumis à essai à laquelle a été connectée le câble de réponse.
- j) Bornes connectées ensemble, identification de toutes les bornes de l'objet soumis à essai ayant été connectées ensemble pendant la mesure dans le format suivant: identifiant de borne 1-identifiant de borne 2-identifiant de borne 3, identifiant de borne 4-identifiant de borne 5-identifiant de borne 6, et ainsi de suite (A-B-C, D-E-F par exemple indiquerait que les bornes A, B et C ont été connectées ensemble et que les bornes D, E et F ont été connectées ensemble séparément).
- k) Bornes reliées à la terre, identifiant de chaque borne connectée à la cuve de l'objet soumis à essai pendant la mesure, séparé par des virgules.
- l) Position de prise OLTC, position de prise indiquée sur l'objet soumis à essai pendant la mesure.
- m) Position de prise OLTC précédente, position de prise à partir de laquelle le changeur de prise a été déplacé pour atteindre la position de prise utilisée pendant la mesure.
- n) Position DETC, position du DETC indiquée sur l'objet soumis à essai pendant la mesure.
- o) Température de l'objet soumis à essai, température du diélectrique de l'objet soumis à essai pendant la mesure (habituellement température du liquide supérieur) en degrés Celsius.
- p) Rempli de fluide, oui ou non selon que l'objet soumis à essai a été entièrement rempli de fluide de fonctionnement normal pendant la mesure.
- q) Commentaires, texte libre à utiliser pour indiquer l'état de l'objet soumis à essai pendant la mesure, celui-ci sera généralement « service » pour l'état avec les jeux de barres enlevés mais toutes les traversées de services installées ou « transport » si des traversées spéciales pour la mesure dans la configuration de transport ont été utilisées.
- r) Longueur de la connexion non blindée pour chaque câble si le branchement des câbles coaxiaux n'était pas direct, vers les bornes de traversée (il convient de mentionner toute information complémentaire requise pour répéter la mesure).
- s) Résultat de mesure (fréquence en Hz, amplitude en dB et phase en degrés) pour chaque fréquence de mesure (les valeurs doivent être données par une chaîne textuelle au format 1.2345E+04 pour la fréquence et -1.2345E+01 pour l'amplitude et la phase).

Chaque fichier doit être nommé

identifiant\_borne de référence\_borne de réponse\_position de prise\_date\_heure.xml.

EXEMPLE T1234a\_H0\_H1\_1\_2009-09-18\_14h33.xml

## 6.2 Informations supplémentaires à enregistrer pour chaque ensemble de mesures

Un fichier supplémentaire lisible par ordinateur doit être fourni pour chaque ensemble de mesures (mesures effectuées sur un objet soumis à essai à une occasion). Ce fichier doit inclure les informations suivantes.

- a) Données de l'objet soumis à essai

- 1) Fabricant
- 2) Année de fabrication
- 3) Numéro de série du fabricant
- 4) Puissance assignée continue la plus élevée de chaque enroulement
- 5) Tension assignée pour chaque enroulement
- 6) Impédance de court-circuit entre chaque paire d'enroulements
- 7) Fréquence assignée
- 8) Groupe vectoriel, configuration/agencement des enroulements
- 9) Nombre de phases (monophasé ou triphasé)
- 10) Type de transformateur ou de bobine d'inductance (par exemple, GSU, déphaseur, transmission, distribution, four, industriel, ferroviaire, shunt, série, etc.)
- 11) Configuration du transformateur (par exemple, autotransformateur, double enroulement, tertiaire enfoui, etc.)
- 12) Construction du transformateur ou de la bobine d'impédance (par exemple à colonnes, cuirassé), nombre de colonnes (3 ou 5 colonnes), type d'enroulement, etc.
- 13) OLTC: nombre de prises, plage et configuration (linéaire, inversion, réglage grossier-fin, extrémité de ligne, extrémité de neutre, etc.)
- 14) DETC: nombre de positions, plage, configuration, etc.
- 15) Organisme propriétaire de l'objet soumis à essai
- 16) Identification de l'objet soumis à essai (fournie par le propriétaire s'il y a lieu)
- 17) Toute autre information pouvant avoir une influence sur le résultat de la mesure

NOTE Il est préférable d'inclure un dessin de la plaque signalétique de l'objet soumis à essai, incluant le schéma des enroulements. Dans ce cas, si les données ci-dessus sont incluses, il n'est pas nécessaire de les répéter.

b) Données d'emplacement

- 1) Emplacement (par exemple, nom du site, lieu d'essai, port, etc.)
- 2) Référence d'identification d'armoire le cas échéant
- 3) Conditions d'environnement notables (par exemple, lignes aériennes sous tension ou jeux de barres sous tension à proximité)
- 4) Toute autre propriété particulière

c) Données de l'appareillage de mesure

- 1) Principe de fonctionnement du dispositif (à balayage ou à chocs)
- 2) Nom de l'appareillage et numéro de modèle
- 3) Fabricant
- 4) Numéro de série de l'appareillage
- 5) Date d'étalonnage
- 6) Toute autre propriété particulière de l'appareillage

d) Données d'organisation de l'essai

- 1) Société
- 2) Opérateur
- 3) Toute information complémentaire

e) Données de l'installation de mesure

- 1) Rémanence du noyau: la mesure e-t-elle été effectuée immédiatement à la suite d'un essai de résistance ou de choc, ou a-t-il été volontairement démagnétisé?
- 2) Cuve reliée ou non à la terre
- 3) Type de mesure (par exemple, circuit ouvert, court-circuit, etc.)

- 4) Longueur des tresses utilisées pour relier les blindages des câbles à la terre
  - 5) Longueur des câbles coaxiaux
  - 6) Motif de la mesure (par exemple, routine, nouvel essai, dépannage, mise en service d'un nouveau transformateur, mise en service d'un transformateur d'occasion, déclenchement de protection, remise en service, essai d'acceptation, essai de garantie, remplacement de traversée, maintenance OLTC, opération de défaut, etc.)
  - 7) Toute information complémentaire
- f) Photographie de l'objet soumis à essai tel que mesuré en montrant la position des traversées et des connexions

## **Annexe A** (normative)

### **Connexions des câbles de mesure**

#### **A.1 Généralités**

La présente annexe contient les exigences concernant la méthode de connexions des câbles de mesure d'un objet soumis à essai. La Méthode 1 est la méthode de référence privilégiée pour assurer une répétabilité au-delà de 1 MHz. Sauf accord contraire, la méthode 1 doit être utilisée pour les mesures de référence. La Méthode 2, qui utilise une autre configuration des connexions de terre, peut être utilisée lorsque cela est spécifié ou accepté par l'utilisateur du transformateur pour des raisons de commodité dans l'exécution de la mesure. La Méthode 3 couvre les autres types de connexions pouvant être utilisées quand cela est spécifié par l'utilisateur du transformateur lorsque la compatibilité avec les mesures précédemment effectuées selon la Méthode 3 sont requises.

NOTE En général, les trois méthodes donnent des résultats identiques jusqu'à 500 kHz et des résultats non identiques, mais pouvant toujours être utilisés pour effectuer des diagnostics, pour des fréquences allant jusqu'à 1 MHz.

#### **A.2 Exigences communes pour toutes les mesures**

Les détails de connexion et la méthode de connexion doivent être mentionnés dans l'enregistrement de mesure, voir Article 6.

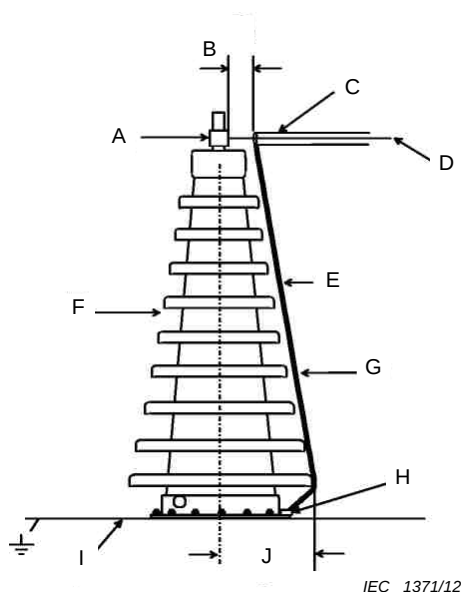
Les connexions à la borne et à la cuve du transformateur doivent être réalisées en utilisant une méthode reproductible, fiable et de faible résistance.

Les connexions de terre des câbles de source et de réponse doivent être séparées de la cuve. Cependant, les connexions de terre pour les câbles de source et de référence peuvent être combinées dans un conducteur unique. Le point de connexion de terre doit être aussi près que possible de la base de la traversée ou de la borne à laquelle la connexion de mesure est raccordée.

#### **A.3 Méthode 1 (Figure A.1)**

Le conducteur central des câbles coaxiaux de mesure doit être directement relié à la borne de l'objet soumis à essai en utilisant la longueur la plus courte possible de conducteur non blindé. La connexion la plus courte possible entre le blindage du câble de mesure et la bride à la base de la traversée doit être réalisée en utilisant une tresse. Un aménagement de serrage spécifique ou équivalent est requis pour rendre la liaison à la terre aussi courte que possible.

NOTE Cette méthode fournit généralement des mesures reproductibles jusqu'à 2 MHz.



- A pince de connexion
- B longueur non blindée à réaliser aussi courte que possible
- C blindage du câble de mesure
- D conducteur central
- E tresse la plus courte
- F traversée
- G connexion de terre
- H pince de terre
- I cuve
- J boucle la plus petite

**Figure A.1 – Connexion selon la méthode 1**

#### A.4 Méthode 2

La méthode 2 est identique à la méthode 1 excepté que la connexion à la terre depuis les câbles de mesure jusqu'à la bride à la base de la traversée peut être réalisée en utilisant un fil ou une tresse de longueur fixe. La connexion n'est pas la plus courte possible.

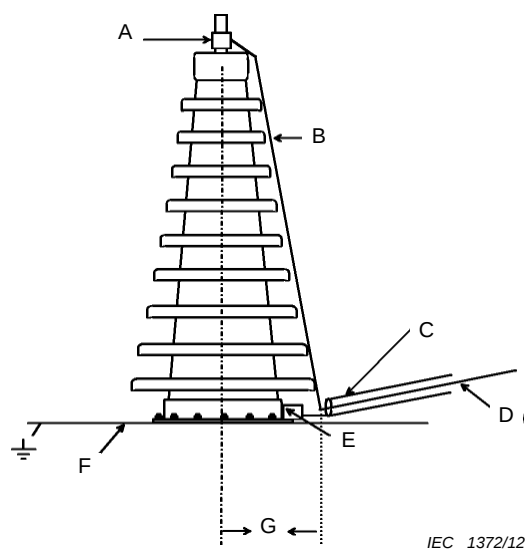
La position de la longueur de conducteur de terre supplémentaire par rapport à la traversée peut avoir une influence sur les mesures d'amplitude (dB) supérieure à 500 kHz et des fréquences de résonance supérieures à 1 MHz. Ceci devra être pris en compte lors de la comparaison de la mesure de référence et des mesures suivantes.

S'il n'est pas possible de se raccorder sur la bride à la base de la traversée et qu'une position alternative de connexion est utilisée alors il peut être attendu que la mesure sera affectée à des fréquences supérieures à 500 kHz et des précautions particulières devraient être prises afin de documenter la configuration de connexion et de s'assurer que le même point de connexion sera utilisé pour obtenir des mesures répétitives. Cela ne devrait pas constituer une mesure normalisée.

#### A.5 Méthode 3 (Figure A.2)

Pour la méthode 3, le blindage du câble coaxial de mesure est directement relié à la cuve de l'objet soumis à essai à la base de la traversée et un conducteur non blindé est utilisé pour relier le conducteur central à la borne en haut de la traversée.

NOTE Seulement si une connexion est faite selon la méthode 3 pour la connexion des câbles de réponse, les résultats peuvent être comparés à ceux de la méthode 1. Cette connexion peut être l'option la plus pratique si un shunt externe (impédance de mesure) est utilisé. Si un conducteur commun pour les connexions du signal et de référence est utilisé, le conducteur est alors inclus dans la mesure. La mesure sera donc différente d'une mesure faite avec la méthode 1.



- A pince de connexion
- B tresse ou fil le plus court
- C blindage du câble de mesure
- D conducteur central
- E pince de terre
- F cuve
- G boucle la plus petite

**Figure A.2 – Connexion selon la méthode 3**

## Annexe B (informative)

### Réponse en fréquence et facteurs ayant une influence sur la mesure

#### B.1 Présentation de la réponse en fréquence

Bien qu'à la fois l'amplitude et la phase du rapport de tension soient enregistrées pendant les mesures de réponse en fréquence, seules les informations d'amplitude sont généralement présentées et utilisées pour une interprétation visuelle du résultat. Toutefois, aussi bien les informations d'amplitude que de phase peuvent être nécessaires si les données de réponse en fréquence doivent être paramétrées par un système automatique basé par exemple sur une représentation pôle-zéro. La réponse en fréquence peut être affichée sur une échelle logarithmique ou linéaire, comme représenté à la Figure B.1. Chaque méthode a ses avantages mais un tracé sur une échelle logarithmique permet une analyse aisée de la tendance de la réponse globale tandis qu'un tracé sur une échelle linéaire est utile pour examiner des bandes de fréquences discrètes et pour comparer de petites différences à des fréquences particulières.

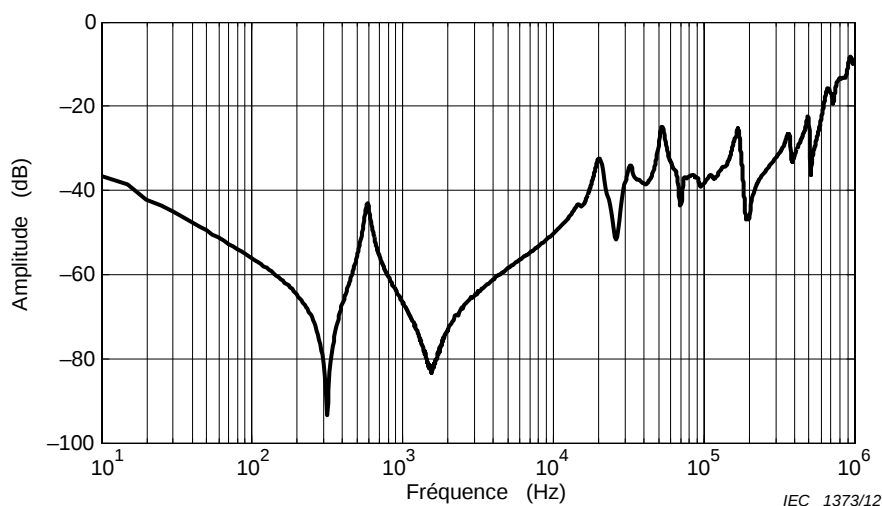


Figure B.1a) – Echelle logarithmique

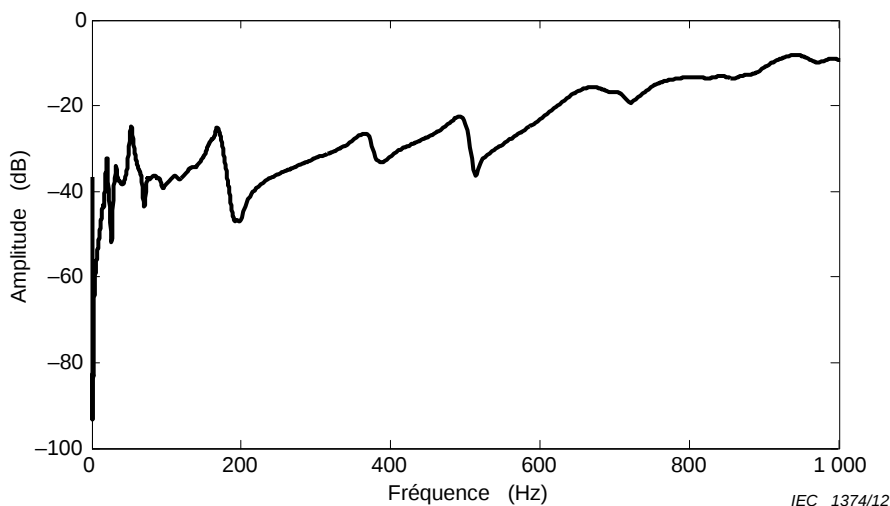


Figure B.1b) – Echelle linéaire

Figure B.1 – Présentations des mesures de réponse en fréquence

## B.2 Comparaison des réponses en fréquence

Pour interpréter les résultats d'une réponse en fréquence, une comparaison entre la réponse mesurée et une mesure de référence antérieure (si elle est disponible) est effectuée, comme représenté à la Figure B.2. Si la mesure de référence est indisponible, une comparaison avec la réponse mesurée sur un transformateur identique (transformateur réalisé avec les mêmes plans provenant du même fabricant) peut être effectuée, comme représenté à la Figure B.3 [1], [2], [3].<sup>1</sup> Il convient d'apporter une attention particulière à cette comparaison lorsque des réponses de transformateurs semblables (transformateur ayant la même spécification mais avec des différences possibles de configuration d'enroulement, même provenant du même fabricant) sont utilisées. Des améliorations et des modifications de la conception d'un transformateur peuvent avoir été apportées par un fabricant à des unités en apparence similaires pendant une certaine période et ceci peut produire des réponses en fréquence différentes, comme représenté à la Figure B.4. Cela peut entraîner un diagnostic erroné d'un dommage éventuel aux enroulements. Pour les transformateurs triphasés, les comparaisons peuvent également être effectuées entre les réponses des phases, comme représenté à la Figure B.5.

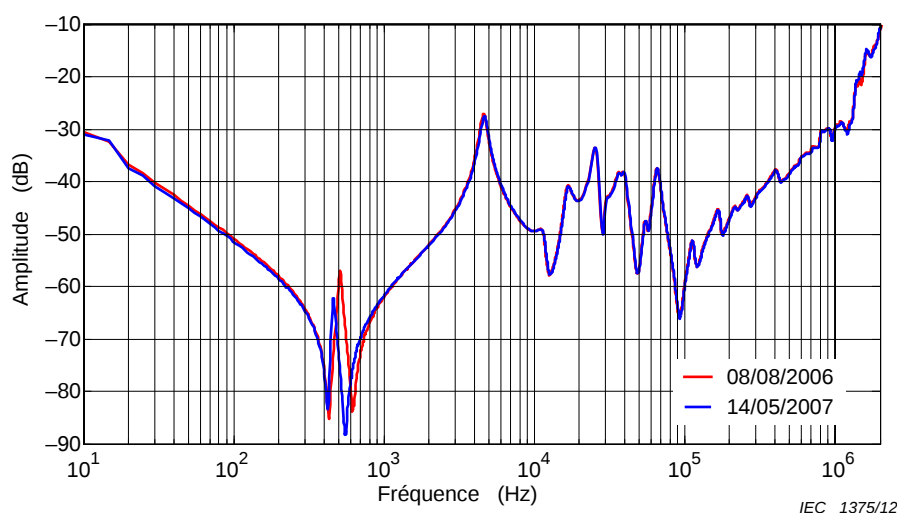


Figure B.2 – Comparaison avec une mesure de référence

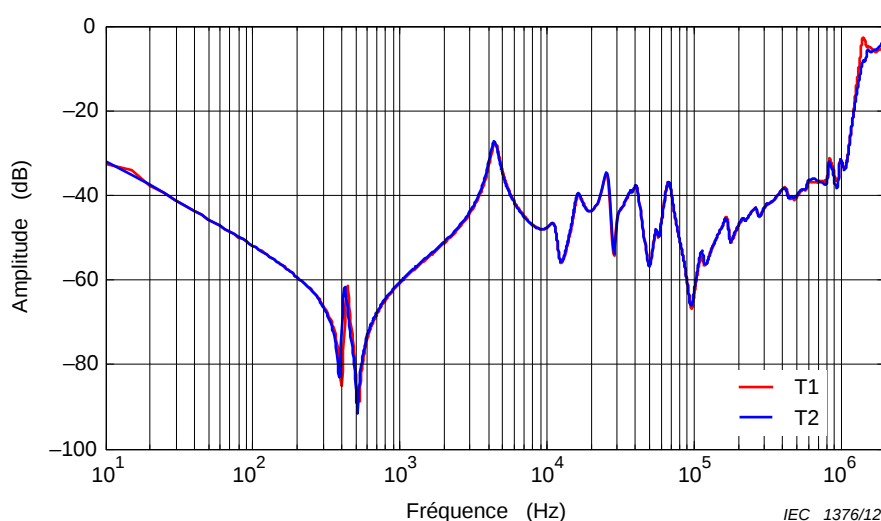
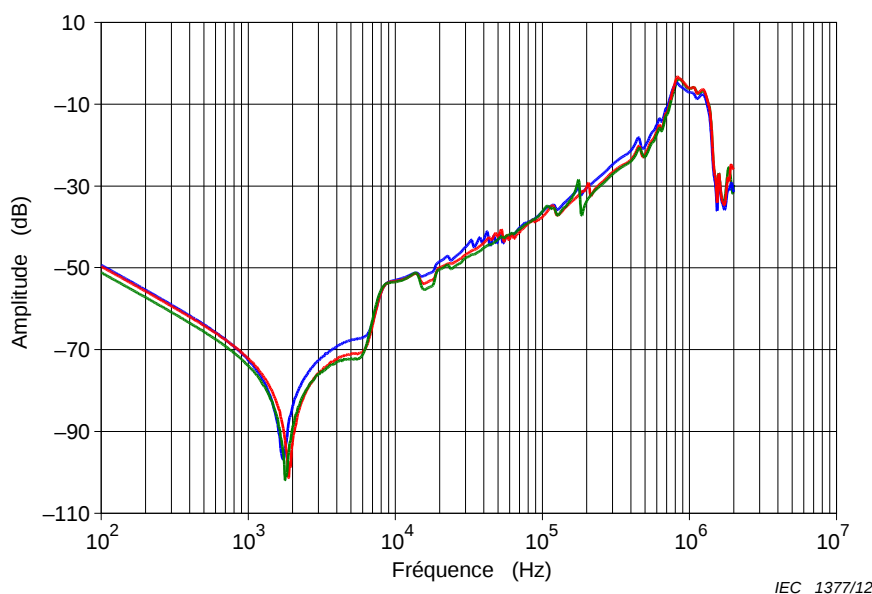
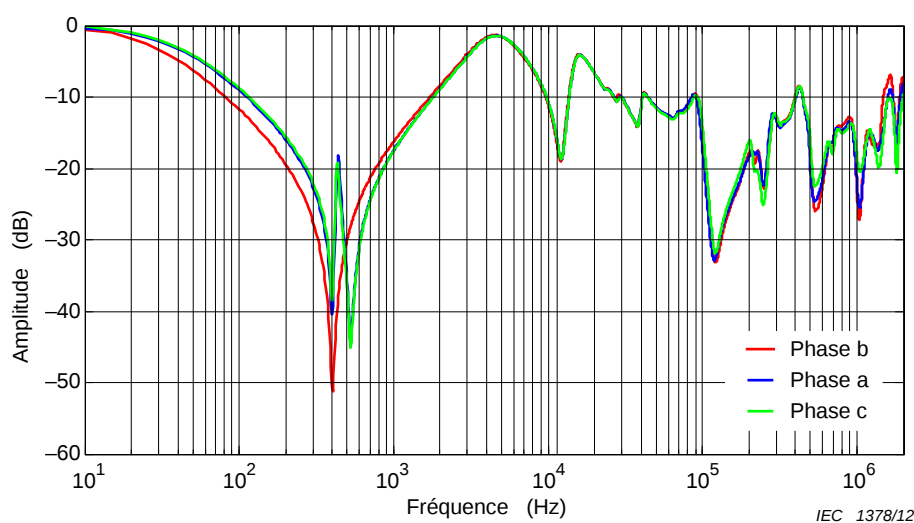


Figure B.3 – Comparaison des réponses en fréquence de transformateurs identiques

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets réfèrent à la Bibliographie.



**Figure B.4 – Comparaison des réponses en fréquence de transformateurs semblables**



**Figure B.5 – Comparaison des réponses en fréquence des trois phases d'un enroulement**

La comparaison des mesures de réponse en fréquence est utilisée pour identifier d'éventuels problèmes dans le transformateur. Les problèmes sont indiqués par les critères suivants [4]:

- variations de la forme globale de la réponse en fréquence;
- modifications du nombre de résonances (maxima) et d'antirésonances (minima);
- décalages de la position des fréquences de résonance.

L'assurance dans l'identification d'un problème dans le transformateur, basée sur les critères ci-dessus, dépendra de l'importance de la variation par rapport au niveau de variation attendu pour le type de comparaison effectuée (référence antérieure, identique, semblable ou phase). La possibilité pour que les changements observés soient dus à une installation de mesure différente ou à une autre variable doit également être considérée dans le diagnostic. Lors de la comparaison des phases du même transformateur, des différences relativement significatives sont considérées comme « normales » et peuvent être dues à des longueurs de

câbles internes différentes, des interconnexions de câblage différentes et des distances différentes entre les phases et la cuve ou entre les phases entre elles. La mise à la terre des enroulements et des câbles de mesure peut avoir une influence sur la mesure et la position du changeur de prise a un effet considérable sur cette dernière. Il est important de pouvoir déterminer ou éliminer les variations de mesure provoquées par ces facteurs afin d'éviter un diagnostic erroné lors de l'interprétation des résultats de mesure de réponse en fréquence.

Une bonne pratique de mesure est cruciale pour l'efficacité de la mesure de réponse en fréquence lorsque celle-ci est utilisée comme outil de diagnostic. Lorsque des variations sont observées, un diagnostic correct nécessite la connaissance de la structure du transformateur et du comportement du transformateur aux fréquences élevées. Les articles qui suivent donnent des informations sur les caractéristiques générales de la réponse en fréquence et certains exemples de facteurs pouvant avoir une influence sur la réponse en fréquence. Certaines directives et recommandations sont incluses pour souligner l'importance d'une bonne pratique de mesure et la façon de distinguer des mesures de mauvaise qualité. Des informations sont également fournies pour faciliter la distinction des différences pouvant être provoquées par des problèmes dans l'enroulement par rapport à des différences « normales » produites par des variantes de construction du transformateur.

### **B.3 Compréhension fondamentale des caractéristiques de réponse en fréquence**

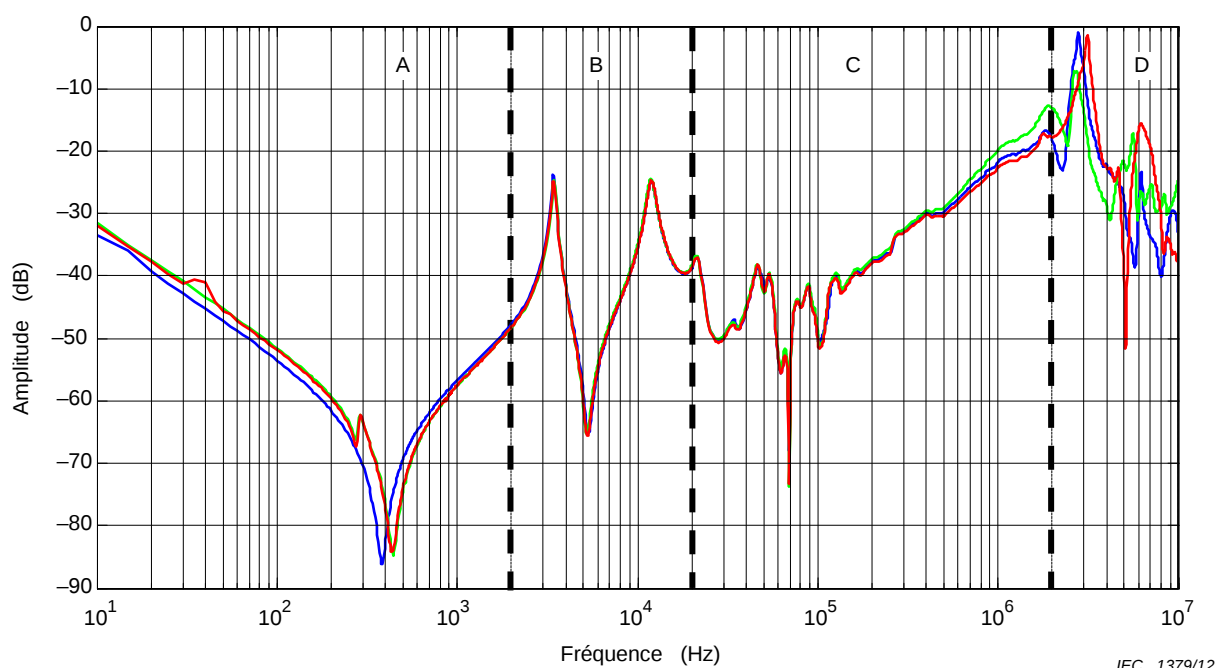
Pour les divers types de transformateurs, des caractéristiques de réponse en fréquence différentes peuvent être attendues. En effet la réponse en fréquence d'un transformateur présente une relation fondamentale avec la structure du noyau et des enroulements. La réponse en fréquence peut être divisée en trois régions, la région des fréquences basses dominée par le noyau, la région des fréquences moyennes dominée par les interactions entre les enroulements et la région des fréquences hautes régie par la structure individuelle des enroulements, les connexions internes et aux fréquences les plus élevées, les connexions des câbles de mesure. Ces régions sont définies en utilisant la réponse en fréquence de l'enroulement HT d'un grand autotransformateur dans le cas de l'exemple de la Figure B.6. Il est bon de remarquer qu'il n'y a généralement pas de limite de fréquence applicable pour chaque région et que celle-ci dépend des dimensions physiques du transformateur et des valeurs assignées des enroulements. Les limites représentées à la Figure B.6 ne sont utilisées que pour mettre en évidence les régions de fréquences basses, moyennes et hautes, dans le cas particuliers des enroulements du transformateur de l'exemple. Dans la région d'influence du noyau (jusqu'à 2 kHz environ), la réponse est dominée par les inductances de magnétisation du noyau et une grande partie de la partie capacitive du transformateur. Pour les transformateurs de puissance triphasés de type trois colonnes, la phase médiane présente une unique antirésonance dans cette région de fréquences en raison des chemins de réluctance magnétique symétriques vus par la phase médiane du noyau à travers les deux autres phases. Les phases extérieures ont généralement deux antirésonances, car elles passent par deux chemins de réluctance magnétique différents, l'un à travers la phase la plus proche (médiane) et l'autre à travers la phase la plus éloignée (l'autre phase extérieure). La magnétisation résiduelle du noyau a également une influence sur la réponse en fréquence dans cette région. Les transformateurs de type cinq colonnes ont également une réponse différente dans cette région.

La réponse dans la région des fréquences intermédiaires (entre 2 kHz et 20 kHz) est principalement influencée par le couplage entre les enroulements, qui dépend de façon significative de l'agencement et des connexions des enroulements, par exemple une connexion en triangle, une connexion d'enroulement d'autotransformateur, des configurations de transformateurs en monophasés ou triphasés. Pour un enroulement d'autotransformateur tel que celui représenté à la Figure B.6, la réponse dans cette plage montre deux résonances distinctes, ceci est une propriété caractéristique de la réponse des enroulements d'un autotransformateur [5].

Dans la région d'influence de la structure des enroulements (haute fréquence) (entre 20 kHz et 1 MHz dans ce cas), la réponse est déterminée par les inductances de fuite des

enroulements, ainsi que par les capacités en série et à la terre des enroulements [6]. Dans cette région, la capacité série est le facteur ayant la plus grande influence pour déterminer la forme de la réponse. La réponse de l'enroulement HT de transformateurs de forte puissance avec une capacité série importante des enroulements (construction entrelacée ou inter-blindage) montre typiquement une tendance d'amplitude croissante générique avec peu de résonances et d'antirésonances, comme représenté à la Figure B.6. D'autre part, l'enroulement BT avec une faible capacité série présente généralement une tendance d'amplitude plate et superposée à une série d'antirésonances et de résonances.

Aux fréquences les plus élevées, supérieures à 1 MHz (> 72,5 kV) ou supérieures à 2 MHz ( $\leq 72,5$  kV), la réponse est moins reproductible et subit l'influence de l'installation de mesure, en particulier par les connexions de mise à la terre, dépendant effectivement de la longueur de la traversée.



IEC 1379/12

Régions d'influence

- A noyau
- B interaction entre les enroulements
- C structure des enroulements
- D installation et connexion de mesure (incluant la connexion à la terre)

**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**

En raison des variations ou des problèmes de reproductibilité (comme illustré par les courbes de la Figure B.6) qui sont provoqués par les limitations de mesure et les incertitudes sur l'état du flux résiduel, les plages de fréquences utiles recommandées pour interpréter la réponse en fréquence sont la plage des fréquences intermédiaires et la région d'influence de la structure des enroulements de la plage des hautes fréquences. Celle-ci est généralement comprise entre 2 kHz et 1 MHz (>72,5 kV) ou 2 MHz ( $\leq 72,5$  kV).

Lorsqu'on effectue des comparaisons, les différences entre les réponses en fréquence dans ces régions peuvent être provoquées par des problèmes ou des défauts dans le transformateur. Des différences peuvent toutefois être également provoquées par d'autres facteurs dans les catégories suivantes:

- différences de montage et de pratique de mesure;
- différences d'interconnexions et d'état du transformateur;
- variantes de construction du transformateur (lorsqu'on compare des unités semblables ou lorsqu'on utilise une comparaison entre phases).

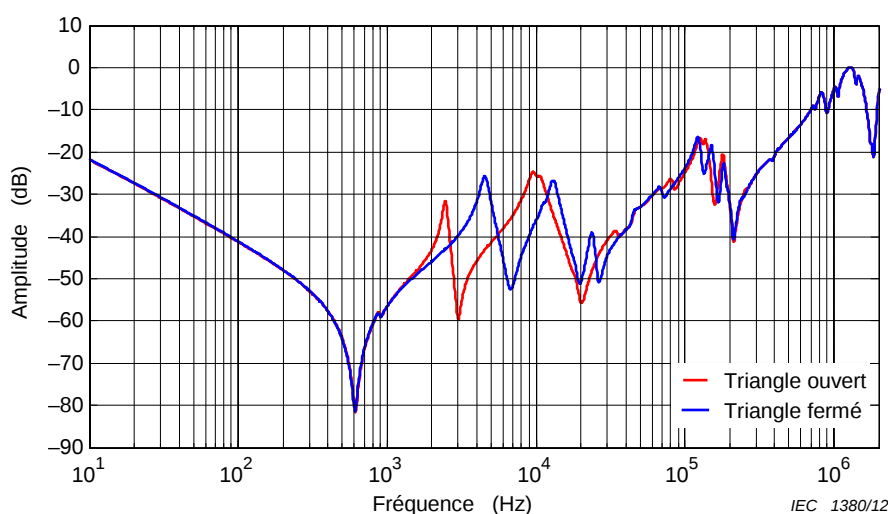
Les différences provoquées par ces facteurs ne doivent pas être confondues avec les différences provoquées par le problème réel dans le transformateur. L'Article B.4 met en évidence certains exemples de l'effet de certains des facteurs mentionnés en utilisant les résultats de mesure. Toutefois, pour démontrer les effets des variantes de construction d'un transformateur, il est plus facile d'utiliser un modèle de simulation FRA. Dans ce cas, le résultat de simulation validé et le résultat de mesure correspondant sont représentés pour mettre en évidence cet effet [7]. Il convient de garder à l'esprit que le but de la modélisation du transformateur et de la simulation FRA n'est pas de fournir des correspondances « exactes » avec les résultats mesurés; il s'agit plutôt d'un outil destiné à aider à la compréhension et à l'interprétation des résultats de mesure, en particulier lorsqu'ils sont utilisés pour identifier les caractéristiques indicatives d'un déplacement et d'une déformation des enroulements.

## B.4 Facteurs ayant une influence sur les réponses en fréquence

### B.4.1 Connexions en triangle tertiaire

Les phases des enroulements connectés en étoile sont uniquement connectées au neutre (point neutre) tandis que les phases d'un enroulement connecté en triangle sont directement reliées aux bornes de ligne. Le couplage direct a une influence considérable sur la réponse en fréquence des phases du transformateur avec un enroulement en triangle en particulier dans la région des fréquences dominée par l'interaction entre les enroulements. La Figure B.7 montre les résultats de mesure de l'enroulement série d'un autotransformateur, la connexion en triangle tertiaire étant réalisée et ouverte.

On voit d'après la Figure B.7 que lorsque la connexion en triangle tertiaire est ouverte, la réponse en fréquence de l'enroulement en série est modifiée de façon significative, en particulier aux fréquences intermédiaires. Ceci est dû à des modifications significatives de couplage inductif et capacitif depuis la connexion en triangle tertiaire qui provoque les antirésonances et résonances en particulier dans la région des fréquences subissant l'influence de l'interaction entre les enroulements (ici entre 2 kHz et 20 kHz) qui se décalent vers les fréquences inférieures.

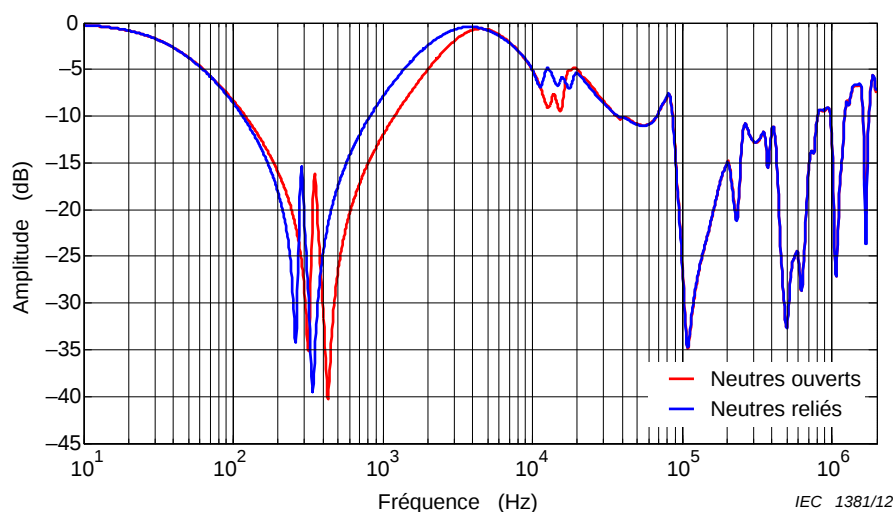


**Figure B.7 – Effet d'une connexion en triangle tertiaire sur la réponse en fréquence d'un enroulement série**

Si la connexion en triangle tertiaire est réalisée en dehors de la cuve et est reliée à la terre, pour mieux comparer les phases (dans le cas où aucune autre mesure de référence n'est disponible), il convient d'enlever la connexion de terre en laissant la connexion en triangle intacte. Sinon, les couplages capacitifs entre les enroulements seront différents pour chaque phase, ce qui aura pour conséquence une différence très significative entre les réponses des trois phases dans la plage des fréquences moyennes.

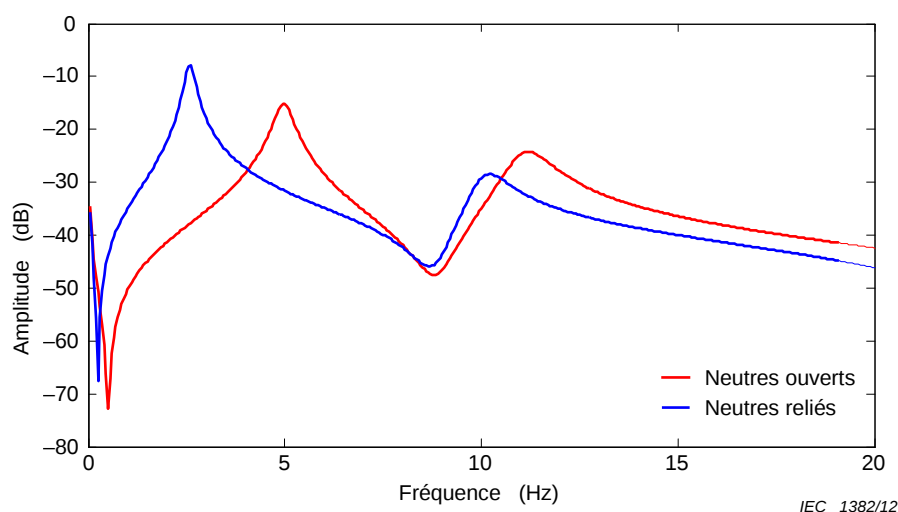
#### B.4.2 Connexion de neutre en étoile

Si un transformateur triphasé possède des bornes de neutre séparées pour chaque phase (point neutre externe), celles-ci peuvent être, soit raccordées ensemble soit laissées individuellement flottantes pendant une mesure de FRA. La Figure B.8 montre une comparaison des résultats de mesure d'un enroulement tertiaire avec les neutres reliés et ouverts. La réponse en fréquence de l'enroulement tertiaire est clairement modifiée, en particulier aux fréquences basses et aux fréquences intermédiaires.



**Figure B.8 – Effet d'une connexion de neutre en étoile sur la réponse de l'enroulement tertiaire**

La réponse en fréquence de l'enroulement série d'un autotransformateur montre également que la connexion de neutre a une influence sur les fréquences basses et intermédiaires, en particulier en ce qui concerne la position des résonances, comme représenté à la Figure B.9.

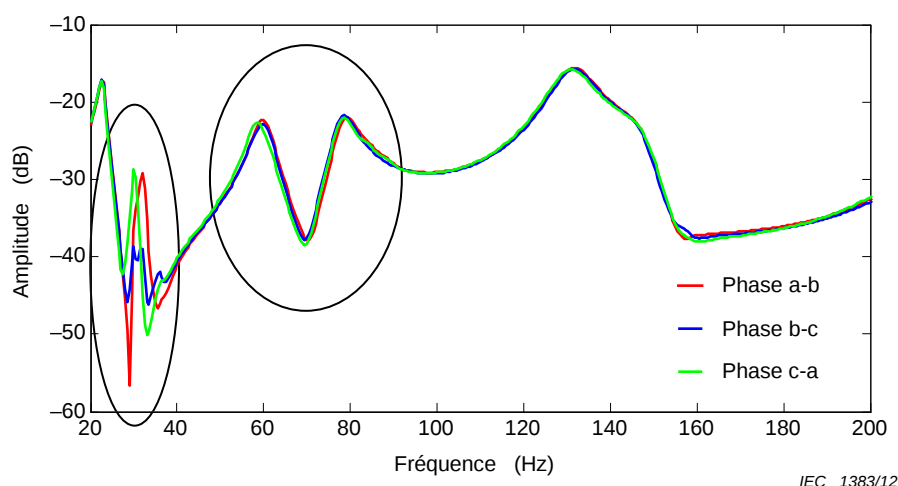


**Figure B.9 – Effet de la terminaison de neutre en étoile sur la réponse de l'enroulement série**

Ces exemples montrent qu'il est important de noter la méthode de branchement de façon à effectuer le même câblage pour les mesures futures de réponse en fréquence. Sinon, les réponses en fréquence pourraient présenter des écarts en particulier dans la région des fréquences d'interaction avec les enroulements (dans ce cas, entre 2 kHz et 20 kHz), comme représenté à la Figure B.9.

#### **B.4.3 Câbles internes reliant l'enroulement de prise et le changeur de prise**

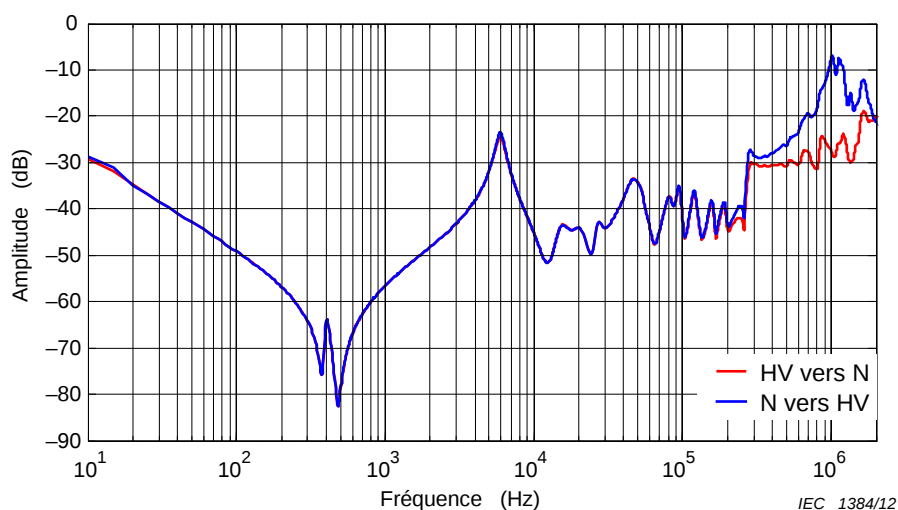
Lorsqu'une comparaison entre phases est effectuée, les réponses éloignées de la région d'influence du noyau des trois phases présentent souvent des différences minimales entre elles. Les raisons probables sont les tolérances de fabrication et les effets des câbles internes. La longueur des connecteurs de prise internes reliant le changeur de prise aux enroulements de prise peut varier. Ceci peut avoir pour conséquence des différences de capacité des câbles de chaque phase. En conséquence, la réponse pour chaque phase sera différente pour certaines plages de fréquences en fonction du type d'enroulement. Pour un enroulement basse tension (BT), des différences minimales dans la réponse entre 20 kHz et 200 kHz sont observées. Celles-ci sont représentées encadrées sur la Figure B.10.



**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)**

#### B.4.4 Sens de la mesure

L'un des détails importants qui doit être inclus dans la méthode de mesure est la borne dans laquelle le signal est injecté et la borne à partir de laquelle la mesure de réponse est effectuée. Des mesures comparatives effectuées sur la même phase d'enroulement mais dans des directions différentes (ligne par rapport au neutre ou neutre par rapport à la ligne) peuvent présenter des écarts aux fréquences les plus élevées, comme représenté à la Figure B.11. Ceci illustre la raison pour laquelle il est important de suivre les connexions de mesure indiquées en 4.4 ou de reproduire la connexion de mesure utilisée dans la mesure de référence si elle est différente.

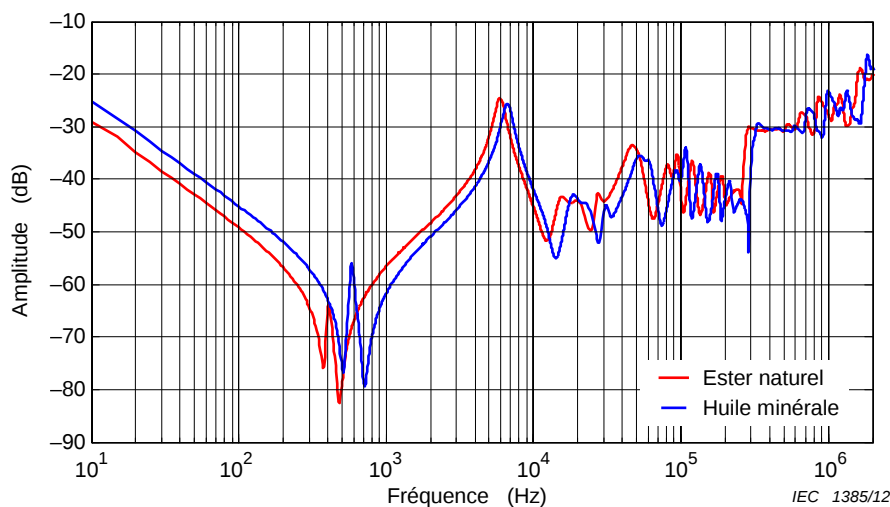


**Figure B.11 – Effet du sens de la mesure sur la réponse en fréquence**

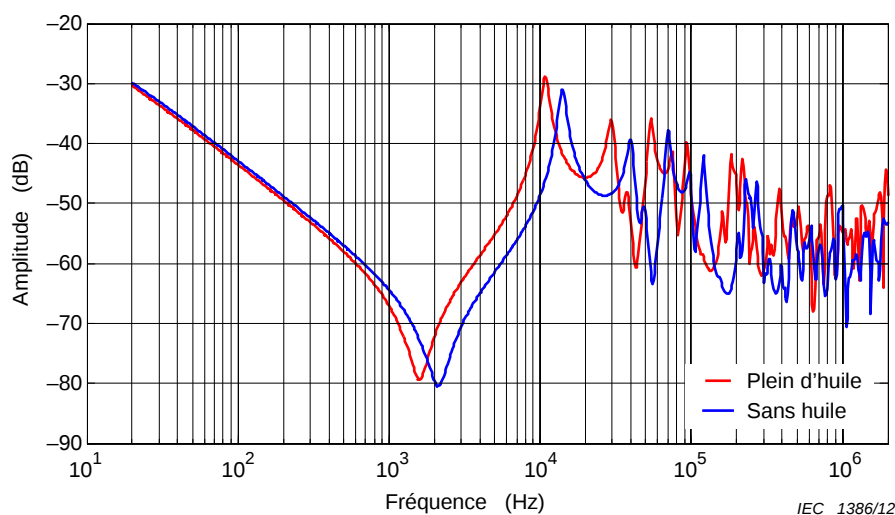
#### B.4.5 Effet de différents types de fluide isolant

L'utilisation d'un type de fluide d'isolation différent dans le transformateur, par exemple un ester naturel plutôt que de l'huile minérale, peut produire des différences de réponse en fréquence sur la plage de fréquences, comme représenté à la Figure B.12. Ceci est particulièrement important lorsqu'on compare des unités semblables. Un effet similaire mais

dans la direction opposée des fréquences se produit si le transformateur est rempli d'air plutôt que de fluide isolant, comme représenté à la Figure B.13.



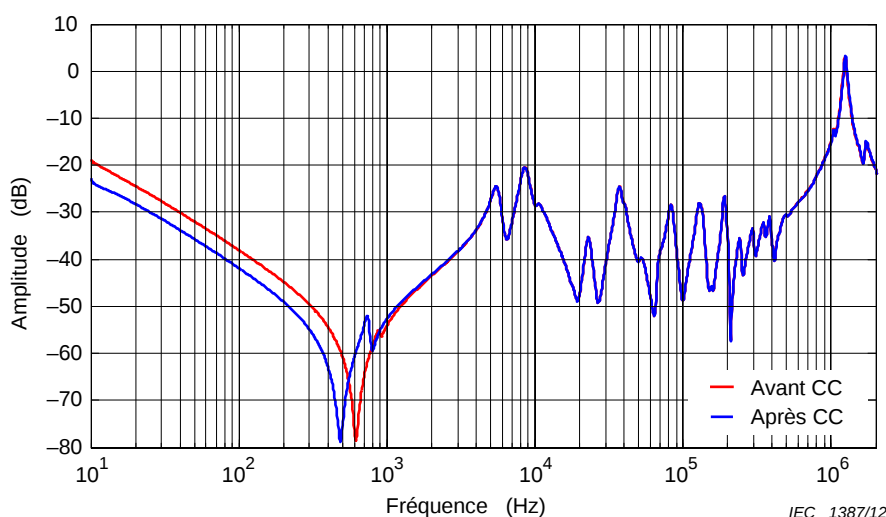
**Figure B.12 – Effet de différents types de fluide d'isolation sur la réponse en fréquence**



**Figure B.13 – Effet du remplissage d'huile sur la réponse en fréquence**

#### **B.4.6 Effet des essais d'injection en courant continu et mesures**

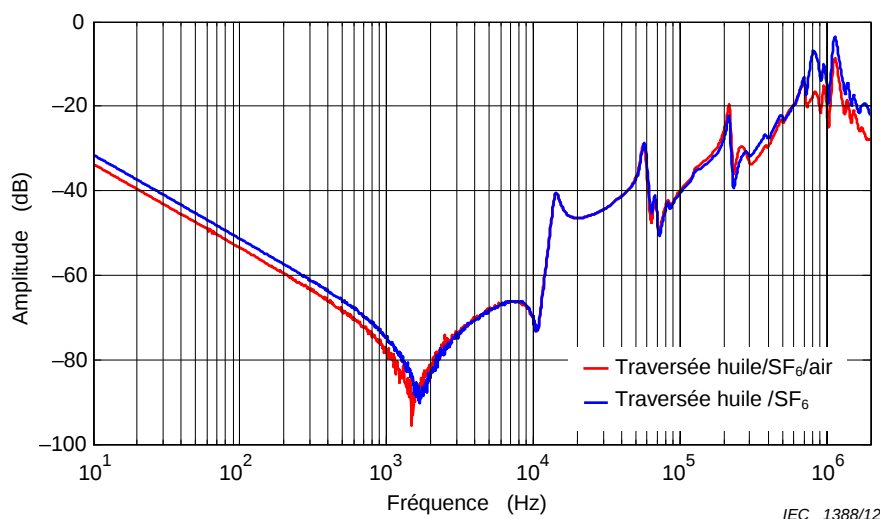
Les essais d'injection en courant continu peuvent provoquer des écarts entre les mesures de réponse en fréquence en particulier dans la région d'influence du noyau dans la plage des fréquences basses, comme représenté à la Figure B.14. Il est donc souhaitable d'aménager la séquence d'essais et des mesures de façon à ce que la mesure de réponse en fréquence ne soit pas effectuée à la suite d'un essai d'injection de courant continu pouvant laisser subsister un magnétisme résiduel dans le noyau. Les essais concernés sont par exemple des essais de choc de manœuvre et des mesures de résistance d'enroulement.



**Figure B.14 – Effet d'un essai d'injection de courant continu sur la réponse en fréquence**

#### B.4.7 Effet des traversées

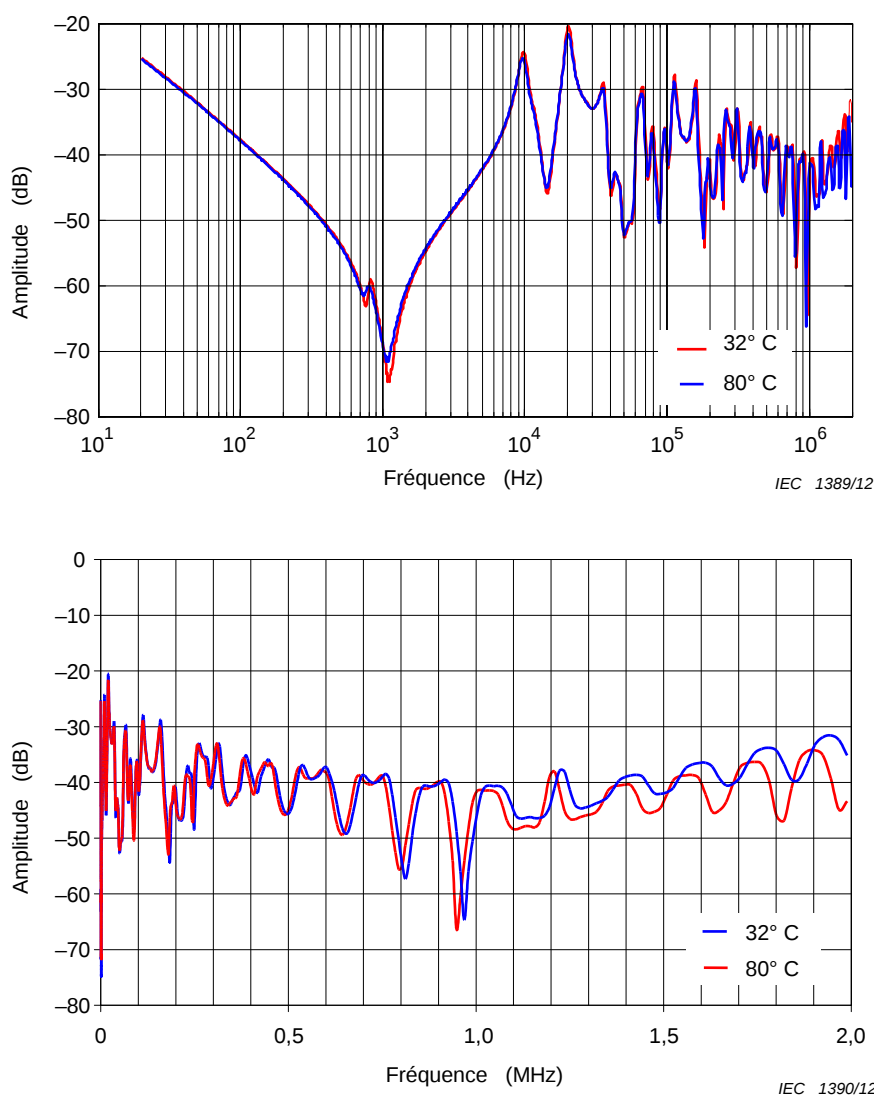
Il est possible d'utiliser pendant l'essai en usine des traversées différentes de celles qui sont installées sur site. Ceci peut produire des différences aux hautes fréquences, comme représenté à la Figure B.15. Si le transformateur est directement connecté à des jeux de barres isolées par SF<sub>6</sub>, et que la mesure est effectuée par connexion à la connexion de terre déconnectée d'un sectionneur de mise à la terre, des écarts importants sont probables.



**Figure B.15 – Effet des traversées sur la réponse en fréquence**

#### B.4.8 Effet de la température

La température influe sur la réponse en fréquence lorsque la variation de température est supérieure à 50 °C environ, comme représenté à la Figure B.16. Les différences de température provoquent des variations de résistance des enroulements et ainsi, de l'amplitude de la réponse en fréquence. Les variations de densité de fluide et de constante diélectrique avec la température ainsi qu'une dilatation physique possible peuvent également provoquer des décalages minimes mais réguliers des fréquences de résonance sur la plage de fréquences.



**Figure B.16 – Effet de la température sur la réponse en fréquence**

#### B.4.9 Exemples de mesures erronées

La Figure B.17 met en évidence certains exemples de mesures de réponse en fréquence effectuées avec un mauvais contact ou un faux contact réalisé volontairement d'un côté ou de l'autre des bornes de mesure de l'objet soumis à essai. Les résultats permettent de conclure qu'un mauvais contact ou un faux contact entre les bornes de mesure et les câbles de mesure produit généralement des réponses en fréquence bruyantes dans la plage des fréquences les plus basses et avec une tendance à avoir une amplitude inférieure (ou plus faible en décibels).

Il est important de toujours effectuer les mesures de réponse en fréquence d'une manière cohérente et que tous les détails de la méthode de mesure soient systématiquement enregistrés. Ceci facilite l'élimination de mauvais écarts et assure la compatibilité des réponses en fréquence pour une comparaison. De plus, si des différences sont observées par comparaison avec un résultat de référence, il est important de vérifier d'abord la mesure en la répétant pour s'assurer que les différences ne sont pas provoquées par une mauvaise pratique de mesure ou en effectuant une connexion de mesure différente. Il est de nouveau important d'insister sur le fait que toutes les données concernant chacune des mesures de réponse en fréquence soient enregistrées en détail pour permettre de comprendre d'éventuels écarts.

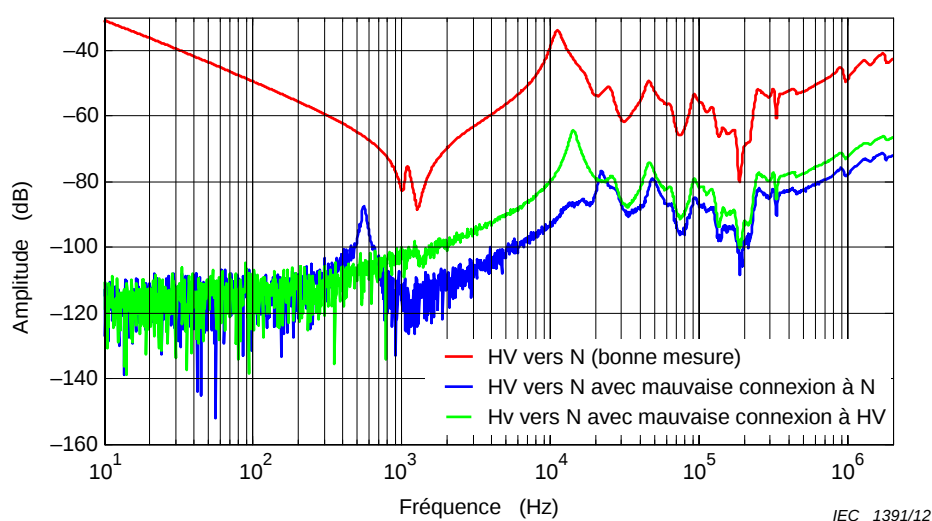
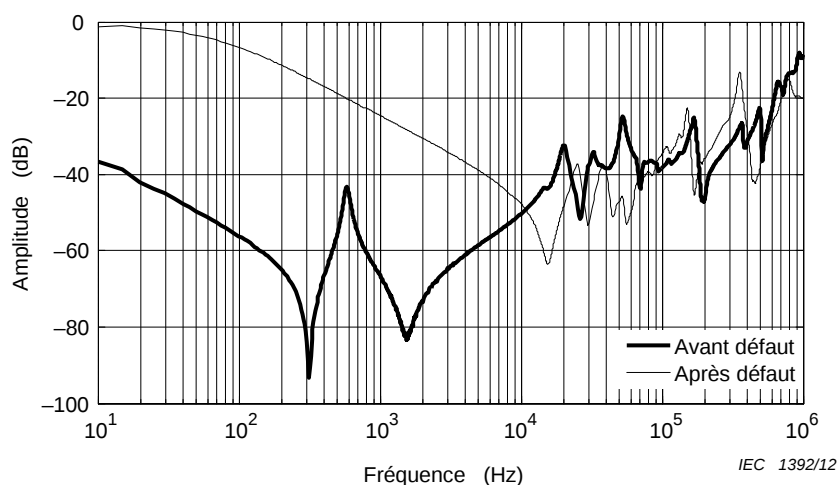


Figure B.17 – Exemples de mauvaise pratique de mesure

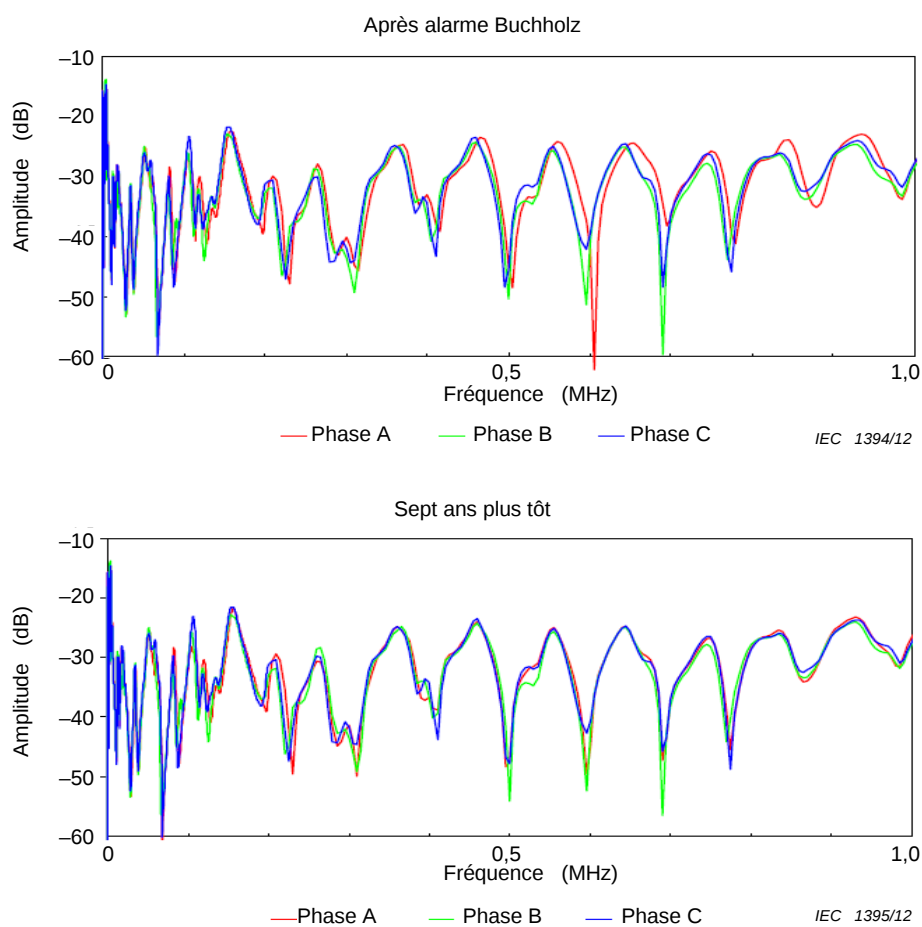
#### B.4.10 Évaluation de la réponse en fréquence

Si les mesures ont été réalisées systématiquement de la même manière et qu'aucune modification n'a été enregistrée en ce qui concerne l'état du transformateur, les écarts entre les réponses en fréquence peuvent alors être provoqués par un mouvement ou une déformation des enroulements. Certains des exemples de défauts ayant été détectés par la mesure de réponse en fréquence sont indiqués sur la Figure B.18, la Figure B.19 et la Figure B.20.

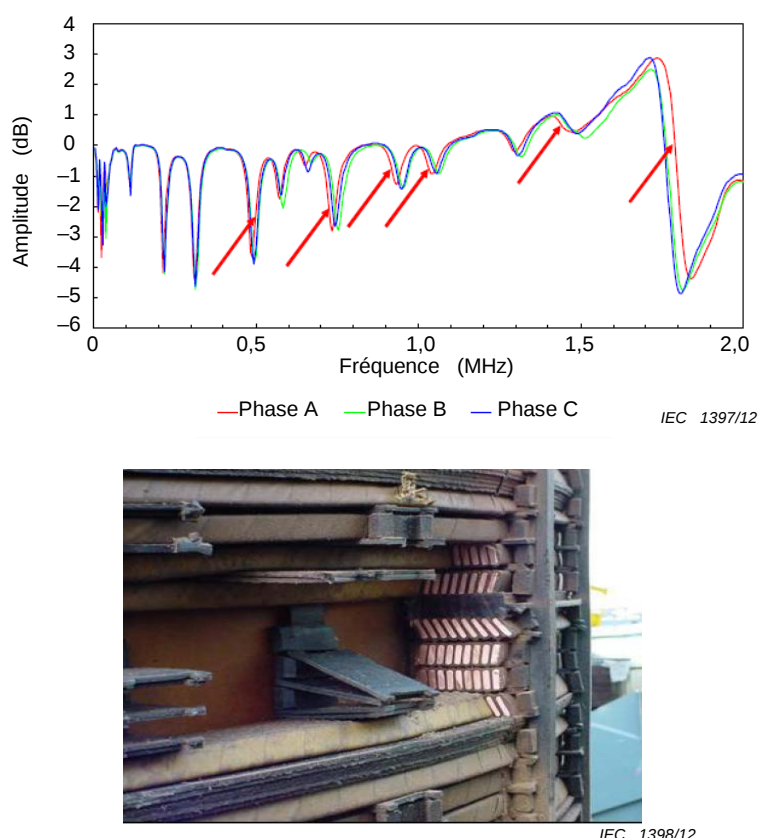


IEC 1393/12

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



**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]**



**Figure B.20 – Réponse en fréquence d'un enroulement de prise avec connexion basculée avec une photographie du dommage [1]**

#### B.4.11 Conclusion

Il est très utile de pouvoir identifier les différences de réponse en fréquence, en particulier les régions de fréquences ou les caractéristiques de la réponse en fréquence qui sont supposées provenir de différents types de défauts du transformateur. Bien qu'un grand nombre d'études aient été effectuées pour identifier ces relations, les recherches ne peuvent pas être généralisées à tous les types de transformateur. Un défaut particulier pouvant avoir provoqué des différences dans une certaine région de fréquences ou une caractéristique de réponse en fréquence dans un transformateur, peut être détecté dans une région de fréquence différente ou produire une caractéristique de réponse différente dans un autre transformateur si celui-ci a une conception et/ou une construction différente. L'importance du mouvement et de la déformation de l'enroulement a une influence sur l'importance des variations de la réponse en fréquence.

L'étape la plus importante pour réussir un diagnostic avec l'analyse de réponse en fréquence est de s'assurer que la mesure est de bonne qualité et que les enregistrements de mesure sont systématiquement consignés. Ces derniers doivent être conformes au texte normatif de la présente norme.

## **Annexe C** (informative)

### **Applications des mesures de réponse en fréquence**

#### **C.1 Transport d'un transformateur**

La détection et l'évaluation des dommages à un transformateur au cours du transport est une application couramment utilisée des mesures de réponse en fréquence. La méthode peut fournir des informations relatives à l'état mécanique du noyau, des enroulements et des structures de serrage avec un ensemble de mesures. Tous ces éléments sont susceptibles d'être endommagés par le transport. Toutefois, certaines parties du transformateur sont également susceptibles d'être endommagées par le transport, et elles ne sont pas efficacement contrôlées par cette mesure. Il convient en particulier de contrôler l'isolation entre le noyau et la carcasse ou la cuve.

Comme pour toutes les autres applications de la méthode FRA, l'exécution des mesures de comparaison dans les mêmes conditions est importante pour obtenir des résultats fiables. En conséquence, si des mesures pendant le transport ou à l'arrivée sur site doivent être effectuées dans la configuration de transport, une mesure initiale dans cette configuration est alors également nécessaire. Le transformateur est habituellement équipé de plaques de recouvrement de traversées ou de préférence de petites traversées de transport qui sont fortement recommandées pour faciliter la mesure dans la configuration de transport. Les transformateurs de taille moyenne et grande sont généralement livrés sans huile (selon la taille, le poids et les restrictions liées à l'environnement), les données de référence des mesures d'usine ou sur site effectuées avec le transformateur plein d'huile ne peuvent donc être utilisées pour une comparaison avec des mesures effectuées dans la configuration de transport, car les résultats seront différents les uns des autres. Il doit être noté de façon similaire que les mesures effectuées dans la configuration de transport ne peuvent habituellement pas être utilisées comme données de référence pour les mesures futures dans les conditions d'exploitation. Il convient que les mesures effectuées pour détecter et évaluer les dommages pendant le transport suivent généralement les procédures du présent document et elles doivent inclure une mesure entre extrémités en circuit ouvert, toutes les autres bornes étant flottantes. Des mesures de court-circuit ne sont pas capables de détecter des problèmes d'une manière sensible dans la zone du noyau. Les mesures doivent être effectuées en utilisant des points de fréquence recouvrant de manière adéquate la région des fréquences les plus basses de la réponse en fréquence, car cette région de fréquences est liée au noyau magnétique qui est particulièrement vulnérable aux dommages pendant le transport.

Après la mesure initiale avant le début du transport, les mesures peuvent être effectuées à tout moment durant le transit pour vérifier l'intégrité du transformateur. Il est important de noter qu'il convient que la mesure de réponse en fréquence soit le dernier essai électrique avant le transport et le premier essai à l'arrivée. D'autres essais intermédiaires, en particulier des essais en courant continu (par exemple, un essai de résistance d'enroulement) peuvent modifier l'état de magnétisation du noyau et entraver une évaluation fiable de l'intégrité du noyau. Il convient de noter l'état de magnétisation du noyau dans la documentation d'essai (que l'essai précédent ait été une mesure de résistance d'enroulement ou un essai de choc de manœuvre) avec la position du changeur de prise et le niveau d'huile ou de liquide de remplissage si ce n'est pas de l'huile. Si la mesure a été effectuée peu de temps après la vidange de l'huile, il convient de noter ce fait en raison des effets de l'huile résiduelle dans l'isolation. Une mesure ultérieure sans huile peut conduire à des résultats réfutables, car l'huile résiduelle peut couler des enroulements pendant le transport, ce qui peut conduire à des variations de capacité et en conséquence à des courbes de réponse légèrement décalées.

Il est important que la configuration de transport du transformateur soit bien documentée et disponible au personnel d'essai devant effectuer des mesures répétées. S'il existe plusieurs

configurations de transport, des données de référence et des enregistrements de configuration seront alors requis pour chacune d'entre elles. Si le transformateur est transporté sur plusieurs tronçons distincts durant son voyage, par exemple par route, bateau, chemin de fer, déchargement par grue, etc., il peut être important de déterminer si des dommages se sont produits, de sorte que des mesures avant et après des tronçons de transport particuliers peuvent s'avérer prudentes, en particulier si des dispositions légales différentes de garde ou d'assurance sont impliquées. Après réception du transformateur à sa destination finale, il convient d'effectuer une mesure dans la configuration du transport pour effectuer une comparaison avec la mesure initiale afin de détecter tout dommage pouvant s'être produit pendant le transport. Si cette mesure ne montre aucune anomalie, une autre mesure de réponse en fréquence avec le transformateur assemblé et rempli d'huile comme en service peut être effectuée pour être utilisée comme donnée de référence pour les mesures futures. Il est recommandé dans tous les cas de prendre des photographies des connexions entre l'appareillage de mesure de réponse en fréquence et les traversées.

## **C.2 Essai de court-circuit**

Les mesures de réponse en fréquence se sont révélées un moyen précis de détecter des dommages aux enroulements provoqués par un essai de court-circuit. Cette méthode de détection est complémentaire d'une inspection visuelle, car elle peut révéler des variations minimales des dimensions des enroulements qui ne sont pas faciles à voir, mais certains petits déplacements des connexions, etc., peuvent ne pas être facilement détectés en utilisant des mesures de réponse en fréquence.

Si l'on utilise une mesure de réponse en fréquence pour indiquer des variations pendant un essai de court-circuit, il convient alors d'observer les points suivants.

Il convient d'effectuer la mesure de référence au poste d'essai de court-circuit avant l'essai de court-circuit.

Il est recommandé d'inclure des mesures de court-circuit dans les mesures de réponse en fréquence pour cet essai car celles-ci peuvent faciliter la détermination de modifications dues à une magnétisation du noyau ou à une déformation des enroulements.

Une mesure doit être effectuée à la fin des essais de court-circuit. Il est également recommandé d'effectuer des mesures de réponse en fréquence entre les essais de court-circuit pour détecter tout début de défaillance avant l'essai de court-circuit suivant, mais celles-ci peuvent être réalisées avec un enroulement court-circuité si cela est plus commode.

Il convient que les mesures avant et après l'essai soient effectuées en utilisant le même appareillage de mesure et les mêmes câbles de mesure et agencements de câbles de mesure pour éliminer autant que possible toutes sources potentielles d'incertitudes sur les causes de variation observée.

## Annexe D (informative)

### Exemples de configurations de mesure

#### D.1 Mesures normales entre extrémités sur un autotransformateur triphasé avec un changeur de prise d'extrémité de ligne

Les mesures normales pour un autotransformateur avec des prises d'extrémité de ligne sont représentées dans le Tableau D.1. La Figure D.1 et le Tableau D.2 montrent le schéma des enroulements et les connexions du changeur de prise, la tension BT la plus haute étant sur la position de prise 1 et le changement sur la position de prise 10.

**Tableau D.1 – Mesures normales entre extrémités sur un autotransformateur triphasé**

| Mesure                                                                                                                                                                                                                  | Prise | Prise précédente | Source et référence ( $V_{in}$ ) | Réponse ( $V_{out}$ ) | Bornes à la terre | Bornes connectées ensemble | Commentaires                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                                                                       | 10    | 9                | A                                | a                     | néant             | néant                      | Enroulement série, aucun enroulement de prise en circuit    |
| 2                                                                                                                                                                                                                       | 10    | 9                | B                                | b                     | néant             | néant                      | idem                                                        |
| 3                                                                                                                                                                                                                       | 10    | 9                | C                                | c                     | néant             | néant                      | idem                                                        |
| 4                                                                                                                                                                                                                       | 1     | 2                | a                                | Na                    | néant             | néant                      | Enroulement commun, enroulement de prise complet en circuit |
| 5                                                                                                                                                                                                                       | 1     | 2                | b                                | Nb                    | néant             | néant                      | idem                                                        |
| 6                                                                                                                                                                                                                       | 1     | 2                | c                                | Nc                    | néant             | néant                      | idem                                                        |
| 7                                                                                                                                                                                                                       | 10    | 9                | a                                | Na                    | néant             | néant                      | Enroulement commun, aucun enroulement de prise en circuit   |
| 8                                                                                                                                                                                                                       | 10    | 9                | b                                | Nb                    | néant             | néant                      | idem                                                        |
| 9                                                                                                                                                                                                                       | 10    | 9                | c                                | Nc                    | néant             | néant                      | idem                                                        |
| Toutes les bornes non spécifiées dans le tableau doivent être laissées flottantes, à l'exception des enroulements en triangle dont seulement deux bornes sont sorties pour fermer le triangle qu'il convient de fermer. |       |                  |                                  |                       |                   |                            |                                                             |

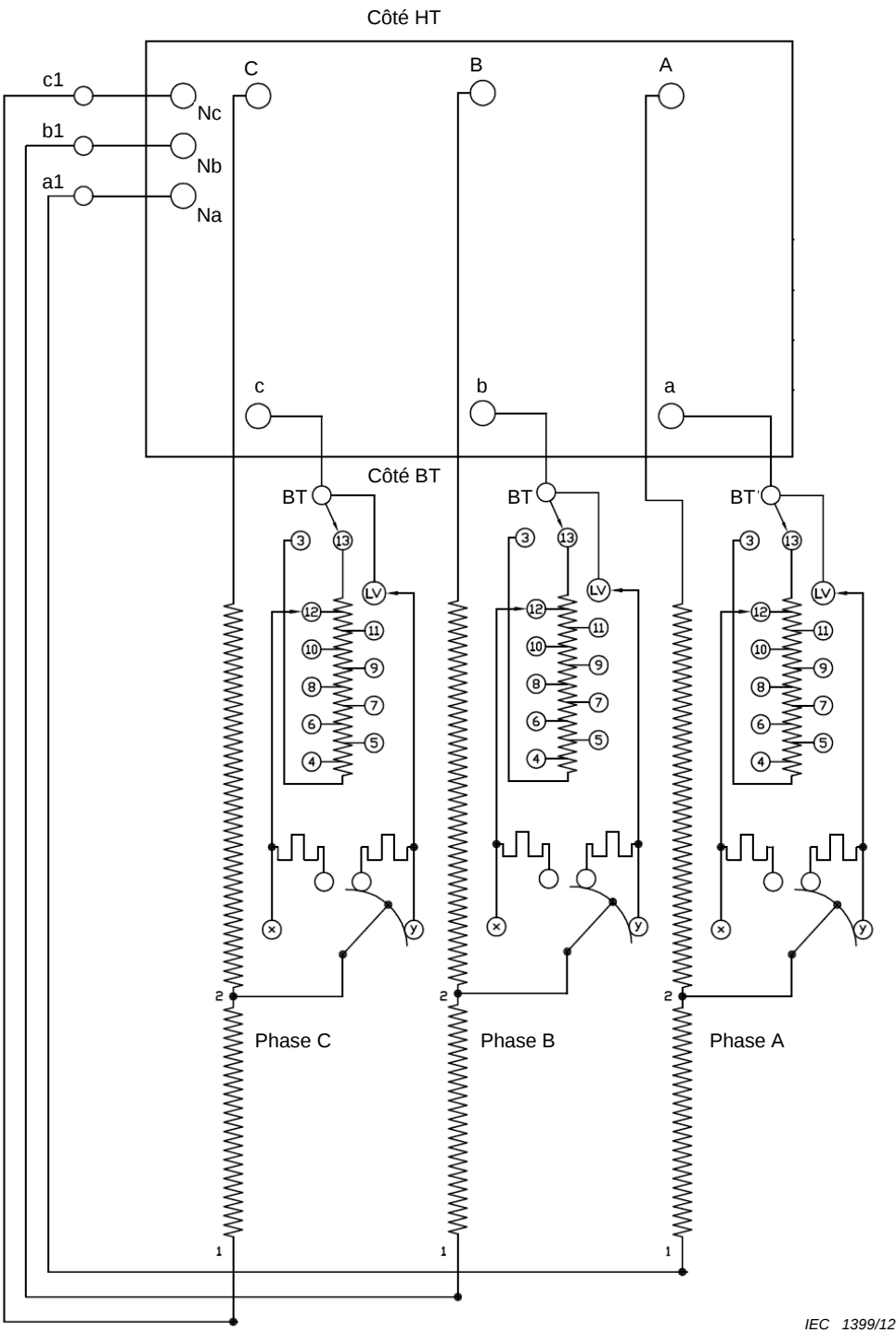


Figure D.1 – Schéma des enroulements d'un autotransformateur avec un changeur de prise d'extrémité de ligne

Tableau D.2 – Connexions d'un changeur de prise

| Numéro de position de la prise | Connexions de sectionnement | Basse tension entre a, b, c |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1                              | BT-13, 4-x                  | Tension maximale            |
| 10                             | BT-13/BT-3, BT-y            | Tension assignée            |
| 19                             | BT-3, 12-x                  | Tension minimale            |

NOTE La position de changement (position de prise 10) comporte deux configurations de connexion d'enroulement possibles selon que la prise précédente était la prise 9 ou la prise 11, celles-ci donneront des réponses en fréquence différentes. C'est la raison pour laquelle il est très important d'enregistrer et d'être cohérent avec la position de prise précédente.

D.2 Mesures inductives entre enroulements

Les mesures inductives entre enroulements sur un transformateur triphasé (YNd1) sont représentées dans le Tableau D.3 et à la Figure D.2.

Tableau D.3 – Mesures inductives entre enroulements  
sur un transformateur triphasé YNd1

| Mesure | Prise | Source et référence ( $V_{in}$ ) | Réponse ( $V_{out}$ ) | Bornes à la terre | Bornes connectées ensemble | Commentaires |
|--------|-------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| 1      | Max   | A                                | a                     | N et b            | néant                      |              |
| 2      | Max   | B                                | b                     | N et c            | néant                      |              |
| 3      | Max   | C                                | c                     | N et a            | néant                      |              |

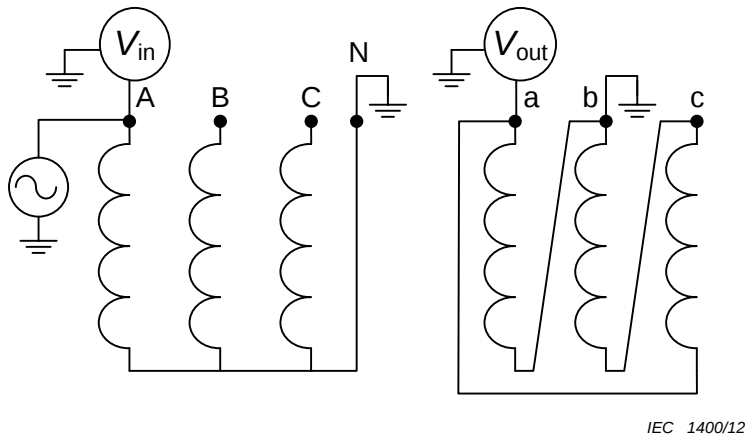


Figure D.2 – Schéma de connexion d'une mesure inductive entre enroulements  
sur un transformateur triphasé YNd1

D.3 Mesures capacitatives entre enroulements

Les mesures capacitatives entre enroulements sur un transformateur triphasé (YNd1) sont représentées dans le Tableau D.4 et à la Figure D.3.

Tableau D.4 – Mesures capacitatives entre enroulements sur  
un transformateur triphasé YNd1

| Mesure | Prise | Source et référence ( $V_{in}$ ) | Réponse ( $V_{out}$ ) | Bornes à la terre | Bornes connectées ensemble | Commentaires |
|--------|-------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| 1      | Max   | A                                | a                     | néant             | néant                      |              |
| 2      | Max   | B                                | b                     | néant             | néant                      |              |
| 3      | Max   | C                                | c                     | néant             | néant                      |              |

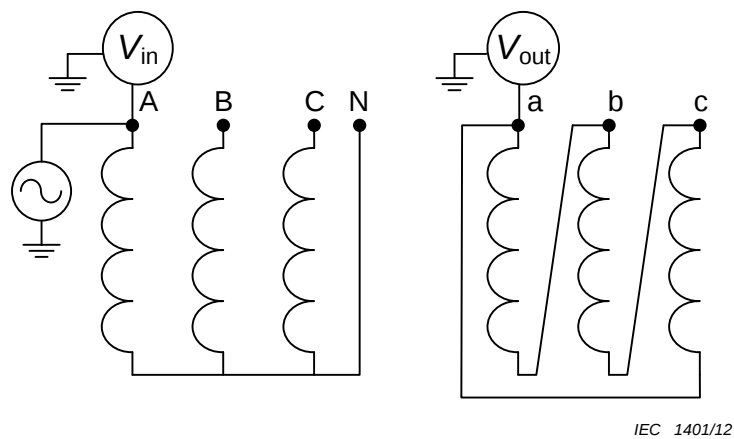


Figure D.3 – Schéma de connexion d'une mesure capacitive entre enroulements sur un transformateur triphasé YNd1

D.4 Mesures entre extrémités avec court-circuit

Les mesures entre extrémités avec court-circuit sur un transformateur triphasé (YNd1) sont représentées dans le Tableau D.5 et à la Figure D.4.

Tableau D.5 – Mesures entre extrémités avec court-circuit sur un transformateur triphasé YNd1

| Mesure | Prise | Source et référence ( $V_{in}$ ) | Réponse ( $V_{out}$ ) | Bornes à la terre | Bornes connectées ensemble | Commentaires |
|--------|-------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| 1      | Max   | A                                | N                     | néant             | a-b-c                      |              |
| 2      | Max   | B                                | N                     | néant             | a-b-c                      |              |
| 3      | Max   | C                                | N                     | néant             | a-b-c                      |              |

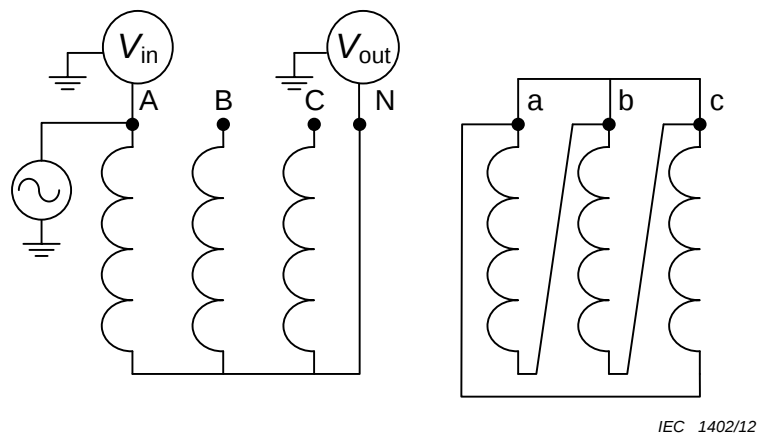


Figure D.4 – Schéma de connexion pour une mesure entre extrémités avec court-circuit sur un transformateur triphasé YNd1

## Annexe E (informative)

### Format de données XML

Il convient d'utiliser le format de données XML suivant pour partager les enregistrements de mesure.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!-- Version information should always be included in case the format changes in the
future. -->
- <IECFraFile version="1.0">
- <Transformer identifier="012345678">
  <Date>2009-10-01</Date>
  <Time>12h55</Time>
  <Manufacturer>ABCDEFGF</Manufacturer>
  <SerialNumber>012345678</SerialNumber>
</Transformer>
<!-- Optionally more information about the test object may be stored here: -->
- <MeasurementSetup>
  <MeasuringEquipment manufacturer="ABCDEF" instrument="FRAabcdef"
    serial="aabbccddeeff" />
  <PeakVoltage unit="V">12.3</PeakVoltage>
  <ReferenceTerminal>A</ReferenceTerminal>
  <ResponseTerminal>B</ResponseTerminal>
  <ConnectedTerminals>a1-b1-c1,a2-b2-c2</ConnectedTerminals>
  <EarthedTerminals />
  <!-- the "from" attribute holds the tap position from which the tap-changer
was moved to reach the tap-position used during the measurement -->
  <OLTC from="5">6</OLTC>
  <DETC />
  <TransformerTemperature unit="°C">45</TransformerTemperature>
  <FluidFilled>yes</FluidFilled>
  <LenghtOfUnshieldedConnection unit="mm">1200</LenghtOfUnshieldedConnection>
  <Comments>Use the "comments" section to provide any additional information that
may be required to repeat the measurement.</Comments>
</MeasurementSetup>
- <MeasurementResult>
  <Point frequency="1" amplitude="-30.1" phase="12.7" />
  <Point frequency="2" amplitude="-34.6" phase="22" />
</MeasurementResult>
</IECFraFile>
```

## Bibliographie

- [1] CIGRE Working Group A2.26, Brochure 342, "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA)", Brochure 342, Paris, April 2008. (disponible en anglais seulement)
  - [2] A. Kraetge, M. Kruger, J. L. Velasquez, H. Viljoen and A. Dierks, "Aspects of Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers", *CIGRE 2009 6<sup>th</sup> Southern Africa Regional Conference*, Paper 504, 17-21 August 2009. (disponible en anglais seulement)
  - [3] J. Christian and K. Feser, "Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 214-220, January 2004. (disponible en anglais seulement)
  - [4] S. A. Ryder, "Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements," in *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Boston, MA, USA, 7-10 April 2002, pp. 187-190. (disponible en anglais seulement)
  - [5] D. M. Sofian, Z. D. Wang, and J. Li, "Interpretation of Transformer FRA Responses – Part 2: Influence of Transformer Structure," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PP, no. 99, pp. 1-8, 28 June 2010. (disponible en anglais seulement)
  - [6] Z. D. Wang, J. Li, and D. M. Sofian, "Interpretation of Transformer FRA Responses – Part I: Influence of Winding Structure," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 703-710, April 2009. (disponible en anglais seulement)
  - [7] A. W. Darwin, D. M. Sofian, Z. D. Wang and P. N. Jarman, "Interpretation of Frequency Response Analysis (FRA) Results for Diagnosing Transformer Winding Deformation," *CIGRE 2009 6<sup>th</sup> Southern Africa Regional Conference*, Paper 503, 17-21 August 2009. (disponible en anglais seulement)
  - [8] J. A. Lapworth and P. N. Jarman, "UK Experience of the Use of Frequency Response Analysis (FRA) for Detecting Winding Movement Faults in Large Power Transformers," *CIGRE Transformers Colloquium*, 2-4 June 2003. (disponible en anglais seulement)
-



INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

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

Tel: + 41 22 919 02 11  
Fax: + 41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)