

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Power transformers –
Part 57-1202: Liquid immersed phase-shifting transformers**

**Transformateurs de puissance –
Partie 57-1202: Transformateurs déphaseurs immergés dans un liquide**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 IEC, Geneva, Switzerland

Copyright © 2017 IEEE

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 being secured. Requests for permission to reproduce should be addressed to either IEC at the address below or IEC's member National Committee in the country of the requester or from IEEE.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
3 Park Avenue
New York, NY 10016-5997
United States of America
stds.ipr@ieee.org
www.ieee.org

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 the IEEE

IEEE is the world's largest professional association dedicated to advancing technological innovation and excellence for the benefit of humanity. IEEE and its members inspire a global community through its highly cited publications, conferences, technology standards, and professional and educational activities.

About IEC/IEEE publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables 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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - 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.



IEEE

IEC/IEEE 60076-57-1202

Edition 1.0 2017-05

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Power transformers –

Part 57-1202: Liquid immersed phase-shifting transformers

Transformateurs de puissance –

Partie 57-1202: Transformateurs déphaseurs immergés dans un liquide

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.180

IEC ISBN 978-2-8322-4258-2
IEEE ISBN 978-1-5044-2015-0
STD20936

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 Normative references	7
2.1 IEC references.....	7
2.2 IEEE references.....	7
3 Terms and definitions	8
4 Use of normative references.....	11
5 Service conditions	11
5.1 General.....	11
5.2 Usual service conditions	11
5.2.1 Switching arrangement	11
5.2.2 Power flow	11
5.2.3 Operation with two or more PSTs in series or parallel	11
5.2.4 Phase unbalance	12
5.2.5 Surge protection	12
6 Rating and general requirements.....	12
6.1 Rated power	12
6.2 Loading at other than rated conditions	12
6.3 Specification of buck capability	12
6.4 Cooling modes.....	13
6.5 Short circuit impedance and load phase angle capability.....	13
6.5.1 Specification.....	13
6.5.2 Short circuit impedance for asymmetric designs	13
6.6 Neutral earthing (grounding)	13
6.7 Rated voltage	13
6.8 Voltage variation and asymmetric design	13
6.9 Rated frequency	14
6.10 Operation at higher than rated voltage and/or at other than rated frequency	14
6.11 Highest voltage for equipment and dielectric test levels	14
6.12 Taps	14
6.13 Sound level.....	14
6.14 Transport	14
7 Construction	14
7.1 General.....	14
7.2 Liquid-filled connections between tanks	15
7.3 Liquid insulation and preservation system	15
7.4 Alignment between tanks	15
7.5 Core and core frame earthing arrangements	16
7.6 Test connections.....	16
8 Short circuit capability	16
9 Connection phase displacement symbols.....	16
9.1 General.....	16
9.2 Special symbols for PSTs	16
9.3 Clock number notation	17
9.4 Examples.....	17
9.4.1 Single core phase shifting transformers	17

9.4.2	Two core phase shifting transformers	19
9.4.3	Transformers incorporating a phase shifting element	21
10	Rating plates (nameplates)	22
11	Terminal markings and phase rotation	23
12	Information to be provided by the manufacturer	23
13	Tests	24
13.1	General.....	24
13.2	Routine tests.....	24
13.3	Type (design) tests	24
13.4	Special tests	24
13.5	Winding resistance.....	25
13.6	Measurement of voltage ratio, phase angle and check of phase displacement	25
13.7	Measurement of short-circuit impedance and load loss	25
13.8	Temperature-rise test.....	26
13.9	Measurement of no-load loss and current	26
13.10	Determination of sound level.....	26
13.10.1	General	26
13.10.2	For PSTs with one combined cooling system	26
13.10.3	For PSTs with separate exciting and series unit cooling systems	27
13.11	Measurement of zero sequence impedance	27
13.12	Dielectric tests	27
13.12.1	General	27
13.12.2	Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)	28
13.12.3	Switching impulse test (SI)	28
13.12.4	Lightning impulse test.....	28
13.12.5	Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)	29
13.13	Tests on on-load tap-changers – operation test.....	29
13.14	Leak testing with pressure	30
13.15	Vacuum deflection test.....	30
13.16	Pressure deflection test	30
14	Tolerances	30
14.1	General.....	30
14.2	Tolerance for impedance and phase angle	30
Annex A (informative)	Check list of information to be provided with enquiry and order	32
A.1	Rating and general data	32
A.1.1	Normal information	32
A.1.2	Special information	33
A.2	Parallel operation.....	34
Annex B (informative)	Behaviour of a phase shifting transformer with non-symmetrical fault currents.....	35
Annex C (informative)	Example specification of buck capability	37
Annex D (informative)	Additional noise measurements.....	38
Annex E (informative)	Calculation of phase angle under load	40
Annex F (informative)	Additional information on advance-retard switch	44
F.1	Principle	44
F.2	Classification within the international standardization system.....	44

F.3 Requirements according to IEC 60214-1 and IEEE Std C57.131	44
Bibliography.....	45
Figure 1 – Example A: DS0-3/9.....	18
Figure 2 – Example B: PS0-3/9.....	18
Figure 3 – Example C: DA0-3	19
Figure 4 – Example D: YNyn/IIIId S0-3/9.....	20
Figure 5 – Example E: YNyn+d/IIIId A0-3/9.....	20
Figure 6 – Example F: YNa0yn/dIII A0-3/9	21
Figure 7 – Example G: V A0-2/8.....	22
Figure B.1 – PST with single phase fault and surge protection	36
Figure E.1 – Phase angle diagram for a PST under load where $\alpha_0 > 0$ and $\varphi_L < 0$	40
Figure E.2 – Phase angle diagram for a PST under load where $\alpha_0 < 0$ and $\varphi_L < 0$	40
Figure E.3 – Phase angle diagram for a PST under load where $\alpha_0 > 0$ and $\varphi_L > 0$	41
Figure E.4 – Phase angle diagram for a PST under load where $\alpha_0 < 0$ and $\varphi_L > 0$	41
Table C.1 – Required PST capability in buck operation	37
Table D.1 – Combinations of sound level measurements needed to represent different loading conditions	39

POWER TRANSFORMERS –

Part 57-1202: Liquid immersed phase-shifting transformers

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.

IEEE Standards documents are developed within IEEE Societies and Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board. IEEE develops its standards through a consensus development process, approved by the American National Standards Institute, which brings together volunteers representing varied viewpoints and interests to achieve the final product. Volunteers are not necessarily members of IEEE and serve without compensation. While IEEE administers the process and establishes rules to promote fairness in the consensus development process, IEEE does not independently evaluate, test, or verify the accuracy of any of the information contained in its standards. Use of IEEE Standards documents is wholly voluntary. *IEEE documents are made available for use subject to important notices and legal disclaimers (see <http://standards.ieee.org/IPR/disclaimers.html> for more information).*

IEC collaborates closely with IEEE in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations. This Dual Logo International Standard was jointly developed by the IEC and IEEE under the terms of that agreement.

- 2) The formal decisions 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. The formal decisions of IEEE on technical matters, once consensus within IEEE Societies and Standards Coordinating Committees has been reached, is determined by a balanced ballot of materially interested parties who indicate interest in reviewing the proposed standard. Final approval of the IEEE standards document is given by the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board.
- 3) IEC/IEEE Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees/IEEE Societies in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC/IEEE Publications is accurate, IEC or IEEE 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 (including IEC/IEEE Publications) transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC/IEEE Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC and IEEE do not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC and IEEE are 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 IEEE or their directors, employees, servants or agents including individual experts and members of technical committees and IEC National Committees, or volunteers of IEEE Societies and the Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board, 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/IEEE Publication or any other IEC or IEEE 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 implementation of this IEC/IEEE Publication may require use of material covered by patent rights. By publication of this standard, no position is taken with respect to the existence or validity of any patent rights in connection therewith. IEC or IEEE shall not be held responsible for identifying Essential Patent Claims for which a license may be required, for conducting inquiries into the legal validity or scope of Patent Claims or determining whether any licensing terms or conditions provided in connection with submission of a Letter of Assurance, if any, or in any licensing agreements are reasonable or non-discriminatory. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any patent rights, and the risk of infringement of such rights, is entirely their own responsibility.

International Standard IEC/IEEE 60076-57-1202 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers, in cooperation with the Transformers Committee of the IEEE Power & Energy Society¹, under the IEC/IEEE Dual Logo Agreement.

This publication is published as an IEC/IEEE Dual Logo standard.

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

FDIS	Report on voting
14/892/FDIS	14/902/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.

International Standards are drafted in accordance with the rules given in the ISO/IEC Directives, Part 2.

The IEC Technical Committee and IEEE Technical Committee have decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website 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.

¹ A list of IEEE participants can be found at the following URL: http://standards.ieee.org/downloads/60076/60076-57-1202-2017/60076-57-1202-2017_wg-participants.pdf

POWER TRANSFORMERS –

Part 57-1202: Liquid immersed phase-shifting transformers

1 Scope

This part of IEC 60076 covers the requirements for phase-shifting transformers of all types. The scope excludes transformers with an unregulated phase shift.

This document is limited to matters particular to phase-shifting transformers and does not include matters relating to general requirements for power transformers covered in existing standards in the IEC 60076 series or IEEE Std C57.12.00™ and IEEE Std C57.12.10™.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

2.1 IEC references

IEC 60050-421, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 421: Power transformers and reactors* (available at: www.electropedia.org)

IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2, *Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*

IEC 60076-3, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

IEC 60076-5, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

IEC 60076-10, *Power transformers – Part 10: Determination of sound levels*

IEC 60076-18, *Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response*

ISO 2178, *Non-magnetic coatings on magnetic substrates – Measurement of coating thickness – Magnetic method*

ISO 2409, *Paints and varnishes – Cross-cut test*

2.2 IEEE references

IEEE Std C57.12.00™, *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*

IEEE Std C57.12.10™, *IEEE Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers*

IEEE Std C57.12.70™, *IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers*

IEEE Std C57.12.80™, *IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers*

IEEE Std C57.12.90™, *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*

3 Terms and definitions

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

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-421 and IEC 60076-1 apply to IEC specified phase shifting transformers. For IEEE specified phase shifting transformers the terms and definitions given in IEEE Std C57.12.80 apply. For all phase shifting transformers the following apply and take precedence.

3.1

phase-shifting transformer

PST

transformer (or combination of transformers designed to work together) with two sets of line terminals (S and L) which is capable of varying the voltage phase-angle relationship between the S terminals and the L terminals

Note 1 to entry: The rated voltage of the S terminals and the L terminals may be the same or different. In addition the PST may also be capable of varying the in-phase voltage.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.2

S terminal

terminal that is used as the fixed reference point when measuring the voltage phase angle of a phase-shifting transformer

3.3

L terminal

terminal that is used to measure the voltage phase angle when compared to the S terminal of the phase-shifting transformer

Note 1 to entry: The designations of S and L to the terminals do not imply any particular direction of power flow.

3.4

zero phase shift tap position

tap position at which the no-load voltage phase angle is zero

3.5

rated power

output power at rated voltage and rated frequency that can be delivered at the L terminal continuously without exceeding the specified temperature rise

3.6

excitation winding

winding of a phase-shifting transformer (PST) that draws power from the source to energize the PST

3.7

excited winding

winding of the series unit that is excited from the exciting winding

3.8

quadrature booster

asymmetric design phase-shifting transformer with the excitation winding connected to the S terminal

3.9

symmetric design

phase-shifting transformer where the no-load voltage ratio between the S and L terminals is constant

3.10

asymmetric design

phase-shifting transformer where the no-load voltage ratio between the S and L terminals changes with the phase angle variation tap position

3.11

single-core PST

phase-shifting transformer that has all windings mounted on a single core

3.12

two-core PST

phase-shifting transformer consisting of a series unit and an exciting unit, located on two separate cores

3.13

extreme tap

tap for maximum absolute value of no-load phase angle in the advance or retard direction

3.14

phase angle

electrical phase angle expressed in degrees between the S and L terminals with a sign such that the angle is positive when the voltage at the L terminal leads the voltage at the S terminal

3.15

boost operation

operation when the PST is acting to increase the power flow in the circuit

3.16

buck operation

operation when the PST is acting to reduce or reverse the power flow in the circuit

Note 1 to entry: For example, in retard operation the load phase angle between the S and L terminals is made more negative in buck operation relative to the no-load phase angle at the same tap position because both the no-load phase angle and the phase angle change caused by the load are negative (see Annex E).

3.17

advance

mode of operation where the L terminal no-load voltage leads the S terminal no-load voltage, giving a positive no-load phase angle

3.18

retard

mode of operation where the L terminal no-load voltage lags the S terminal no-load voltage, giving a negative no-load phase angle

3.19

rated voltage

no-load phase-to-phase voltage at zero phase shift tap position to which operating and performance characteristics are referred

3.20

tapping voltage of the S terminal

<for asymmetric designs> no-load phase-to-phase voltage based on turns ratio appearing at the S terminal when rated voltage is applied to the L terminal at a particular tap position

Note 1 to entry: For an asymmetric design, the voltage at taps other than at the zero phase shift tap position will be lower at the S terminal than the L terminal. This definition is used so that the series unit rated current is constant with tap position to be compatible with the rating of the attached power system circuits.

3.21

series winding

winding connected between the S and L terminals

Note 1 to entry: The term series winding refers to any winding or set of windings that can be connected between the S and L terminals. For example, this term refers to the tap winding of a single-core phase shifting transformer where this winding is connected between the S and L terminals. In the case of a PST combined with a transformer or autotransformer, the series winding of the PST may be connected to the S or L terminal indirectly through the transformer or autotransformer series winding (see example 9.4.3.1).

3.22

series unit

core and windings of a two-core PST containing the series winding

3.23

exciting unit

core and windings of a two-core PST that provides excitation to the series unit

3.24

exciting winding

winding of a single-core PST or of the exciting unit of a two-core PST which supplies the voltage required to change the phase angle

3.25

tap winding

winding in which taps are changed to vary the phase angle

Note 1 to entry: The tap winding is referred to as the regulating winding in some countries.

3.26

design value

expected value given by the number of turns in the design in the case of turns ratio and no-load phase angle or calculated from the design in the case of impedance, no-load current or other parameters

3.27

advance-retard switch

ARS

switch separate from any change-over selector associated with the on-load tap-changer that allows a change of operation from advance to retard or from retard to advance at zero no-load phase angle without interrupting the load current or de-energizing the PST

Note 1 to entry: See Annex F.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

4 Use of normative references

This standard can be used with either the IEC or IEEE normative references, but the references shall not be mixed. The purchaser shall include in the enquiry and order which normative references are to be used. If the choice of normative references is not specified, then IEC standards shall be used, except for PSTs intended for installation in North America where IEEE standards shall be used.

5 Service conditions

5.1 General

Unless otherwise specified by the purchaser, normal service conditions shall apply as stated in IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00.

5.2 Usual service conditions

5.2.1 Switching arrangement

Unless otherwise specified, the PST shall be designed for use with an on-load bypass device connecting the respective L terminals and S terminals that will only be closed in service when the PST is on the zero phase shift tap position for the time taken to complete a switching sequence to place the PST into or out of service.

If the PST will never be used with the L and S terminals connected (no on-load bypass device), this can be specified and the double ended impulse test may be omitted (see 13.12.5).

If the PST is to be used in the condition where an on-load bypass is closed in service with the PST energized from both S and L terminals for longer than the time taken for switching, this shall be specified.

Unless otherwise specified, the PST shall not be energized or operated with the L and S terminals connected by a bypass unless it is on the zero phase shift tap position. If it is required that the PST can be bypassed at other than zero phase shift tap position, this shall be clearly stated by the purchaser in the enquiry.

The PST shall be suitable for energization from either the S or L terminals at any tap position.

5.2.2 Power flow

Unless otherwise specified, the PST shall be capable of transferring rated power in either direction provided that the phase angle between the S and L terminals does not exceed the maximum no-load phase angle.

NOTE If the PST is acting to reduce or reverse the power flow in the circuit, the phase angle will exceed the no-load phase angle and, unless otherwise specified, there will be no power flow capability at the extreme taps under these conditions. If this capability is required, see 6.3.

5.2.3 Operation with two or more PSTs in series or parallel

Unless otherwise specified, it may be assumed that the PST will not be installed in series or parallel with another PST connected to the same circuit. If series or parallel operation is required, this shall be stated by the purchaser in the enquiry and contract, and details of the PST which will be in series or parallel given.

NOTE For parallel operation of PSTs it should be considered that if the PST has a low impedance at or close to the no-load zero phase shift tap position then a short circuit or an extremely high circulating current can occur during tap-change operations if no additional reactance is connected to the circuit. See IEC 62032 [1] or IEEE Std C57.135 [2].²

5.2.4 Phase unbalance

PSTs are intended to be used in a system where the voltages and currents in the three phases are essentially balanced under normal conditions (see IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00 for normal levels of voltage balance). If the PST is to operate in a system that has current unbalance of more than 5 %, the expected unbalance shall be stated by the purchaser in the enquiry and order.

5.2.5 Surge protection

The PST shall be installed with adequate surge protection on both S and L terminals irrespective of the characteristics of the connected system. Unless otherwise specified, this is the responsibility of the purchaser.

NOTE A through fault short circuit condition on one phase is likely to produce induced voltages on the other phases higher than the test voltage levels, see Annex B.

6 Rating and general requirements

6.1 Rated power

The rated power shall be specified by the purchaser and shall apply to the zero phase shift tap and any tap in boost mode, but see 6.3 for rated power in buck mode.

6.2 Loading at other than rated conditions

Any requirements for loading beyond rated power or at other than rated conditions shall be specified by the purchaser. See IEC 60076-7 [3] or IEEE Std C57.12.00, and IEEE Std C57.91 [6]. See also 6.3.

NOTE PSTs have loading limitations due to thermal, magnetic induction and tap-changer considerations.

6.3 Specification of buck capability

If operation of the PST in buck mode is required, the minimum required power at each tap position under buck loading conditions including any overloads shall be specified. Unless otherwise specified, unity power factor, rated frequency and rated voltage at the L terminal shall be assumed when calculating the PST capability. An example of such a specification is given in Annex C.

If the minimum required power at each tap position under buck loading conditions is not specified, then according to 5.2.2 the PST will have no buck loading capability at the extreme tap position. Some buck capability (below rated power) at other tap positions will be available depending on the no-load phase angle and impedance at that tap, but any capability will be determined by the manufacturer.

The impedance used as the basis for the buck loading capability assessment shall become the maximum guaranteed value (without tolerance) at that particular tap position. This figure may be lower than the maximum impedance, but shall be higher than the minimum impedance specified by the purchaser.

² Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

6.4 Cooling modes

Requirements for cooling modes and minimum power under different cooling modes if any shall be stated in the enquiry and order. See IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00.

6.5 Short circuit impedance and load phase angle capability

6.5.1 Specification

The purchaser shall specify the load phase angle capability of the PST in one of the following ways:

- the maximum and minimum impedance at the extreme taps and the minimum absolute no-load phase angle at the extreme taps;
- the minimum absolute boost and/or buck phase angle at rated power. In this case the manufacturer shall determine the no-load phase angle and impedance required to meet this requirement. The purchaser shall also specify either a maximum impedance or voltage drop (regulation) if required.

Unless otherwise specified, unity power factor, rated frequency and rated voltage at the L terminal shall be assumed when calculating the PST capability.

NOTE In the case of certain asymmetric designs with both voltage and phase angle variation, it can be more convenient by agreement to base the capability on the S terminal to avoid an apparent interaction between phase angle tap position and voltage variation range.

If there is a minimum impedance requirement at the zero phase shift tap position, this shall be specified by the purchaser. Otherwise the minimum impedance at the zero phase shift tap is at the discretion of the manufacturer.

If the purchaser requires any particular limits on zero sequence impedance, for example to avoid series resonance conditions, this shall be stated in the enquiry and order.

6.5.2 Short circuit impedance for asymmetric designs

In the case of an asymmetric design, the voltage ratio between the S terminal and the L terminal and consequently the tapping voltage of the S terminal will vary with tap position. Unless otherwise agreed, the impedance at each tap shall be based on the rated voltage and rated power at the L terminal.

6.6 Neutral earthing (grounding)

The purchaser shall specify the neutral earthing arrangement for each neutral terminal; whether directly connected to earth, earthed through an impedance or not earthed.

Any intermediate circuit or circuits that would otherwise have no galvanic connection to the S, L or neutral terminals shall be connected to earth. Unless otherwise specified, intermediate circuits shall be connected to earth externally to facilitate site testing. Unless otherwise agreed, the connection to the tank earth shall be provided by the manufacturer.

6.7 Rated voltage

The purchaser shall specify the rated voltage for the S and L terminals.

6.8 Voltage variation and asymmetric design

Unless otherwise specified, the PST shall be designed so that the voltage ratio between the S and L terminals does not vary with tap position. If an asymmetric design can be accepted by the purchaser, this should be stated in the enquiry together with any limits on the voltage variation at the L terminal.

Any requirements for voltage variation separate to or combined with phase angle variation shall be specified.

6.9 Rated frequency

The rated frequency shall be specified by the purchaser to be the normal undisturbed frequency of the network

6.10 Operation at higher than rated voltage and/or at other than rated frequency

If the PST is to be operated at V/Hz in excess of the provisions given in IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00, this shall be specified by the purchaser.

6.11 Highest voltage for equipment and dielectric test levels

The purchaser shall specify the highest voltage for equipment (maximum system voltage) and the dielectric test levels. See IEC 60076-1, IEC 60076-3 or IEEE Std C57.12.00.

6.12 Taps

The PST shall be provided with an on-load tap-changer to vary the phase angle, unless a de-energized tap-changer or other means of varying the phase angle is specified. The purchaser shall specify any particular requirements for taps, for example a maximum no-load phase angle step, a particular number of tap positions (for parallel operation), a maximum time for tap-changer operation from zero phase shift to extreme tap and the number of tap-changes required in a continuous sequence. Otherwise these parameters may be determined by the manufacturer.

6.13 Sound level

Where the purchaser has a specific requirement for guaranteed maximum sound level(s) under either the no-load condition or under both no-load and load conditions, this shall be stated in the enquiry and should preferably be expressed as a sound power level. It is recognized that it is not possible to directly measure the sound levels under loaded operating conditions in the factory and any guarantee will have to be based on a combination of no-load and load noise measurements (see Annex D).

Unless otherwise specified, the guaranteed maximum sound level shall be for the complete PST at either the extreme advance tap (or extreme retard tap if there is no advance capability) or the zero phase shift tap, whichever is higher, and no-load at rated voltage on the S terminal with the cooling equipment in operation.

6.14 Transport

If transport size or weight limits apply, this shall be stated in the enquiry.

The PST shall be designed and manufactured to withstand a constant acceleration of at least $1g$ in all directions (in addition to the acceleration due to gravity in the vertical direction) without damage. If higher limits are required, this shall be specified by the purchaser unless transport is the responsibility of the manufacturer.

NOTE Further information on transport can be found in IEEE Std C57.150 [3].

7 Construction

7.1 General

In general, construction requirements for PSTs shall be in accordance with the requirements for power transformers, as covered in IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00 and other

applicable ANSI/IEEE or IEC standards with the exceptions or additions given in the following subclauses.

7.2 Liquid-filled connections between tanks

Liquid-filled connections between tanks in multiple tank designs shall meet the pressure and vacuum requirements of IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00 in the fully assembled condition.

If the design includes a barrier between a tank and a liquid-filled connection, any restrictions on the differential pressure that the barrier can withstand shall be clearly indicated by the manufacturer on the nameplate.

NOTE It is normally expected that a barrier will only withstand vacuum on one side when the pressure on the other side is limited to atmospheric pressure (adjacent enclosed connection is not full of liquid at the same time).

Connections between separate tanks shall accommodate thermal expansion and contraction. Unless otherwise agreed between manufacturer and purchaser, connections shall be designed for installation or removal without the need for jacking or moving the transformer tanks.

7.3 Liquid insulation and preservation system

Liquid insulation and preservation systems shall be in accordance with IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.10 with the following addition.

Liquid-filled connections between tanks may be either sealed by insulating barriers from each tank or open to the insulating liquid from one or both tanks.

If the liquid, in liquid-filled electrical connections between tanks, is isolated by insulating barriers from the liquid in both of the tanks, then either a separate conservator system for the connections or pressure equalizing pipes shall be provided to allow expansion into one of the main tanks or one of the main tank conservators.

If the purchaser has a particular requirement to be able to differentiate between faults in the different tanks and connections or to be able to drain the liquid in the connections or tanks separately, this shall be specified.

NOTE The use of oil and gas analysis to isolate problems will be complicated unless the liquid in the connections is separated from both main tanks.

For each isolated liquid-filled connection, the connection compartment shall be equipped with devices that perform the following functions:

- gas accumulation relay (for units equipped with a conservator system);
- pressure relief device/relay;
- liquid filling and draining valves;
- sudden pressure relay or liquid surge relay;
- liquid level gauge.

7.4 Alignment between tanks

The manufacturer of the PST shall make provisions for differential alignments that will occur when multiple tanks are connected due to for example, installation tolerances, foundation tolerances, application of vacuum, thermal expansion and, where applicable, seismic activity.

The alignment requirements between the foundations for multiple tanks and tolerances shall be defined by agreement between the purchaser and the manufacturer.

If special provisions for anchoring the tanks to the foundations are required to meet seismic or other requirements, these shall be defined by the manufacturer and agreed between the purchaser and the manufacturer.

NOTE Information on design for seismic conditions can be found in IEEE Std 693 [5].

7.5 Core and core frame earthing arrangements

The earth connection to each core and core frame (if deliberately insulated from the tank) of the PST shall be brought out of the tank separately to a suitable bushing so that the core to frame, core to earth and frame to earth resistances can be measured without removing liquid from the tank or tanks.

7.6 Test connections

Where temporary bushings and connections are required to perform certain tests, then nothing may be changed or introduced into the PST after the dielectric test that could affect the dielectric performance of the PST. Temporary bushings and connections shall not materially affect the voltages and currents that would otherwise occur. For example a temporary bushing used for an induced voltage test shall not affect the lightning impulse voltage distribution.

Bushings required solely for test shall be removed for service unless otherwise agreed. Internal leads required only for the connection to a test bushing may be removed or not at the discretion of the manufacturer or by agreement, provided the other requirements of 7.6 are met.

Any requirements for test connections to be provided for site tests shall be specified by the purchaser.

8 Short circuit capability

The PST shall be capable of withstanding the mechanical and thermal stresses produced by an external short circuit. See IEC 60076-5 or IEEE Std C57.12.00.

Series windings at all tap positions shall be capable of withstanding the increased voltage that will be imposed across the windings when either the S or L terminals are at earth potential due to the external fault condition. Any non-linear resistors (surge arresters) incorporated in the design shall not become conducting under these conditions.

9 Connection phase displacement symbols

9.1 General

Phase shifting transformers have a large number of possible connections, but all of them are three phase arrangements.

As a general rule the principles of three phase transformers shall be followed with the additional symbols given in Clause 9 used as necessary.

9.2 Special symbols for PSTs

For the purposes of this standard, phase shifting transformers are characterized according to whether they have one or two cores and the displacement symbols of the windings:

- D for delta connection (see IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.70) including single core PSTs where the tap winding is 'outside' the delta;

- P for polygon connection including single core PSTs where the tap winding is 'inside' the 'delta' as part of the polygon;
- Y for star connected as defined in IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.70;
- Z for zigzag connection as defined in IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.70;
- V for a connection where the phase winding consists of two parts each on a different limb of the core;
- K for a connection where the phase winding consists of three parts each on a different limb of the core.

For a two core PST the vector symbols of the exciting unit are given first followed by / and then the vector symbol for the series unit.

The vector group is followed by a space and then S for a symmetric design or A for an asymmetric design, depending on whether the S and L terminals have the same no-load voltage or different no-load voltages on the extreme tap.

The existence of a test, stabilizing or additional winding, which is not terminated for external loading, is indicated, after the symbols of loadable windings, with the symbol '+y' or '+d' according to its connection symbol.

NOTE These designations are not all in accordance with IEEE Std C57.12.70 or IEC 60076-1 in order to develop a single system of designation for PSTs.

9.3 Clock number notation

The winding connection letter for any winding is immediately followed by its phase displacement 'clock number' (see IEC 60076-1).

The clock number of phase shifting transformers is given in two parts: the first is determined as for three phase transformers as the clock number phase relationship between the S and L terminals at zero phase angle tap (usually zero); the second part separated by a "-" is the relative clock number of the injected voltage using the S terminal at zero phase shift tap position as the reference. If advance and retard capabilities are possible, the retard injection clock number is shown first followed by / and the advance injection clock number.

The injected voltage is the variable part of the voltage between the S and L terminals intended to cause a phase shift.

9.4 Examples

9.4.1 Single core phase shifting transformers

9.4.1.1 Example A: D S0-3/9

Example A is a single core symmetric design PST with a delta connected excitation winding and the tap winding outside the delta. This has the connection phase displacement symbol D S0-3/9. The connection diagram is shown in Figure 1.

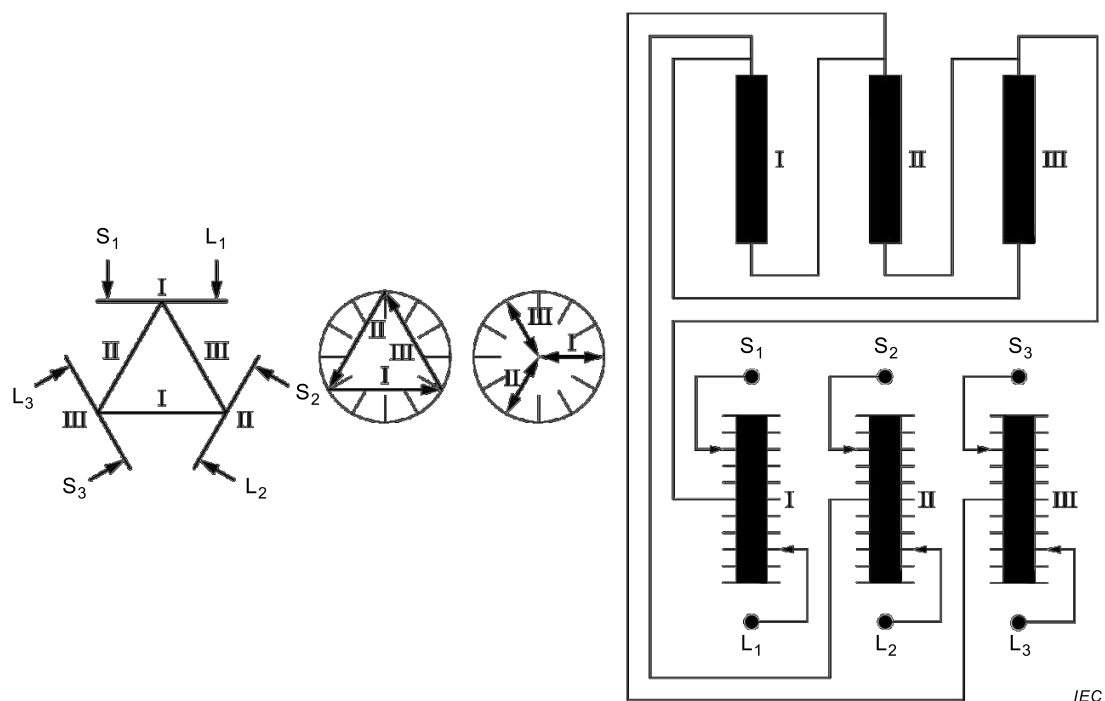


Figure 1 – Example A: D S0-3/9

9.4.1.2 Example B: P S0-3/9

Example B is a single-core symmetric design PST with the tap winding inside the delta (polygon design). This has the connection phase displacement symbol P S0-3/9. The connection diagram is shown in Figure 2.

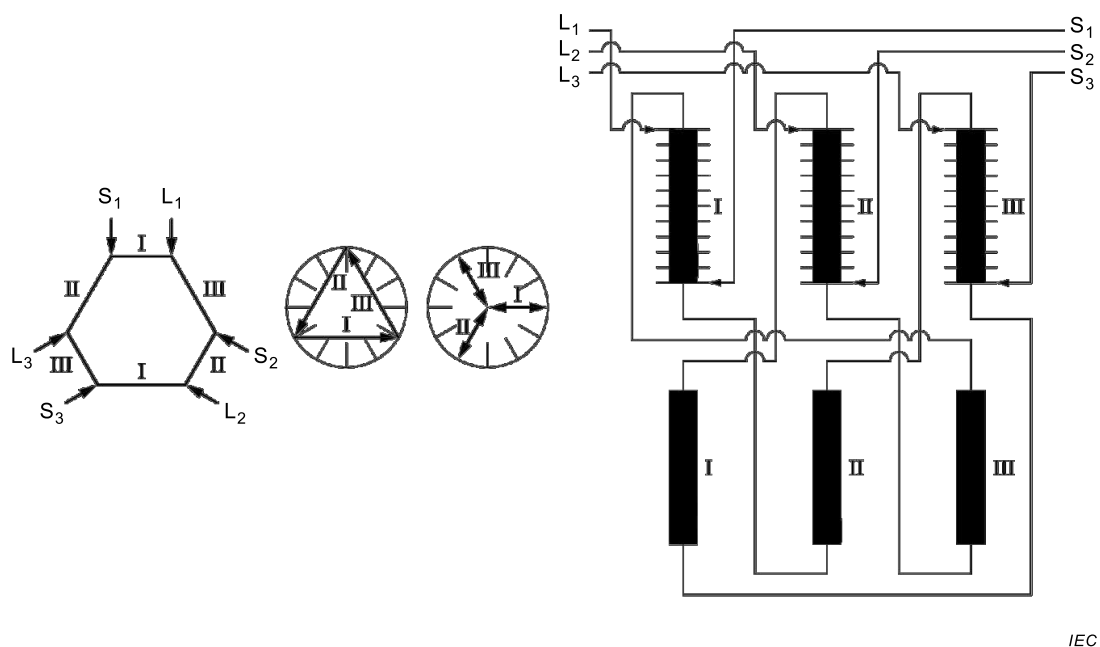


Figure 2 – Example B: P S0-3/9

9.4.1.3 Example C: D A0-3

Example C is a single core asymmetric design PST with a delta connected excitation winding and the tap winding outside the delta. This has the connection phase displacement symbol D A0-3. The connection diagram is shown in Figure 3.

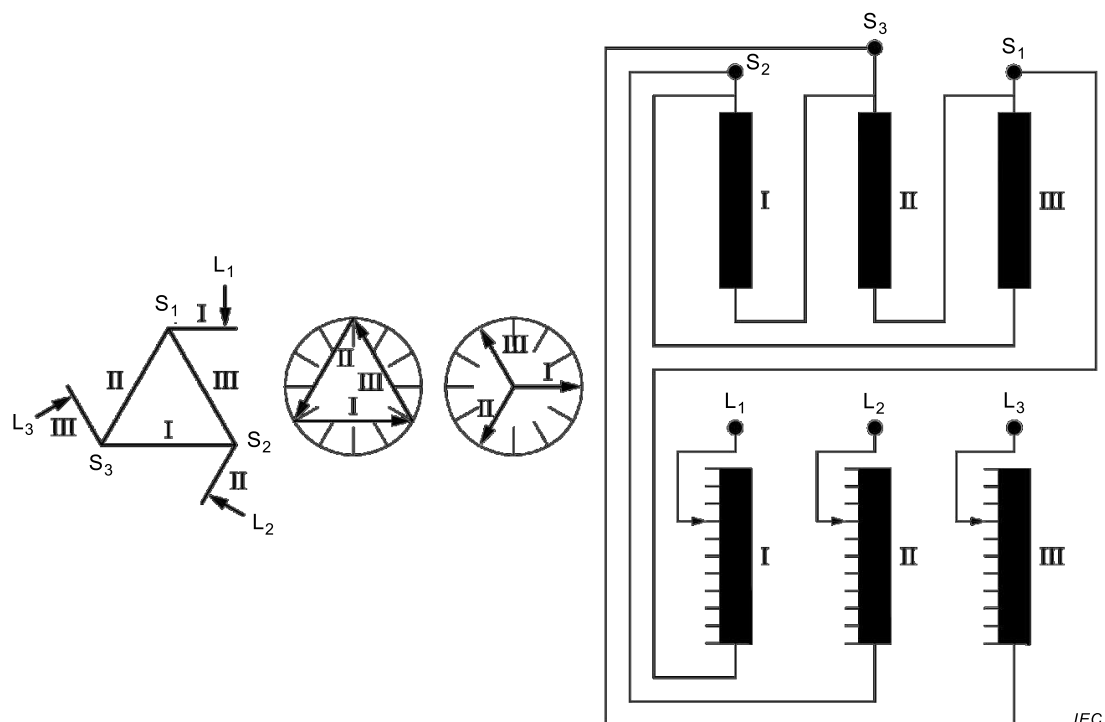


Figure 3 – Example C: D A0-3

9.4.2 Two core phase shifting transformers

9.4.2.1 Example D: YNyn/IIIId S0-3/9

Example D is a two core symmetrical design PST with a star connected excitation winding and a star connected tap winding on the first core with a delta connected excited winding and series windings on the second core. This has the connection phase displacement symbol YNyn/IIIId S0-3/9. The connection diagram is shown in Figure 4.

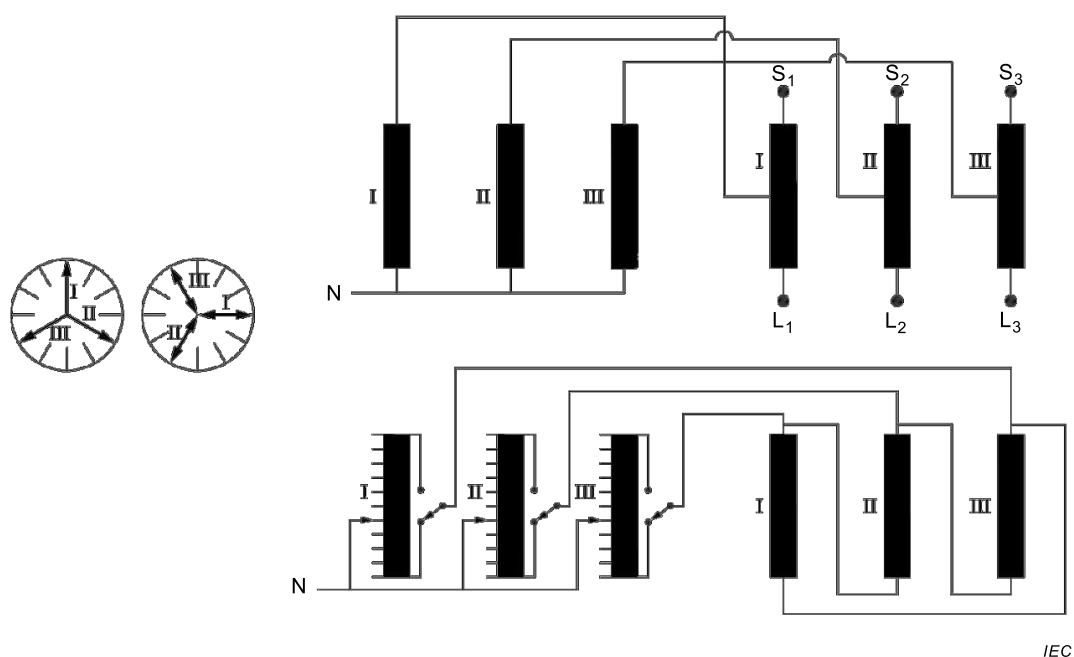


Figure 4 – Example D: YNyn/IIIId S0-3/9

9.4.2.2 Example E: YNyn+d/IIIId A0-3/9

Example E is a two core asymmetric design PST with a star connected excitation winding and a star connected tap winding and a delta connected stabilizing winding on the first core with a delta connected excited winding and series windings on the second core (a two-core quadrature booster). This has the connection phase displacement symbol YNyn+d/IIIId A0-3/9. The connection diagram is shown in Figure 5.

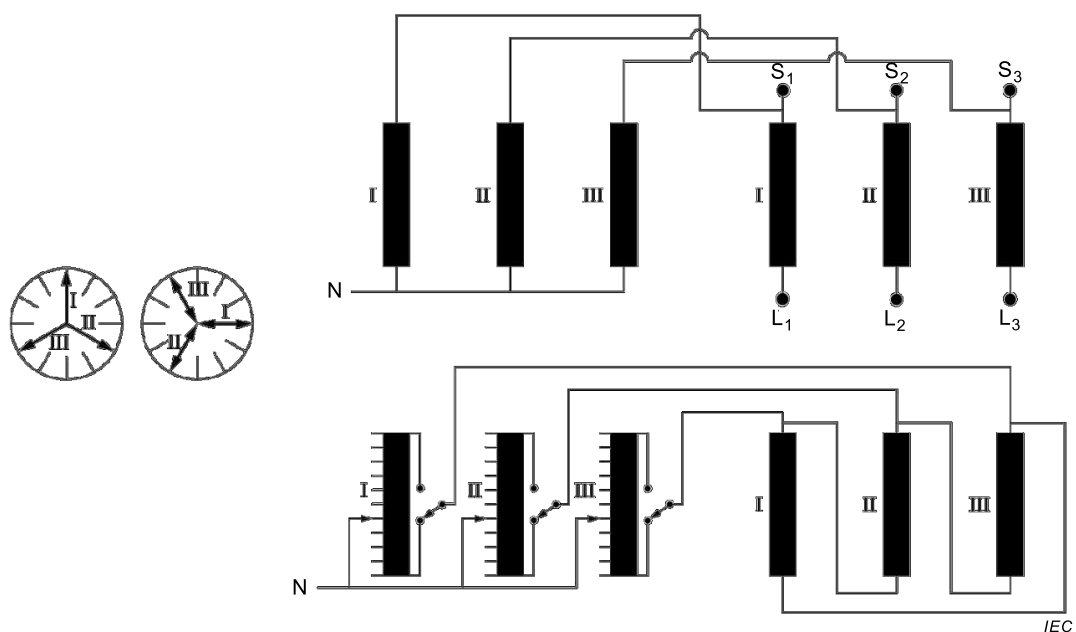


Figure 5 – Example E: YNyn+d/IIIId A0-3/9

9.4.3 Transformers incorporating a phase shifting element

9.4.3.1 Example F: YNa0yn/dIII A0-3/9

Example F is an autotransformer incorporating an asymmetric design phase shifting element on a second core. This has the connection phase displacement symbol YNa0yn/dIII A0-3/9. The connection diagram is shown in Figure 6.

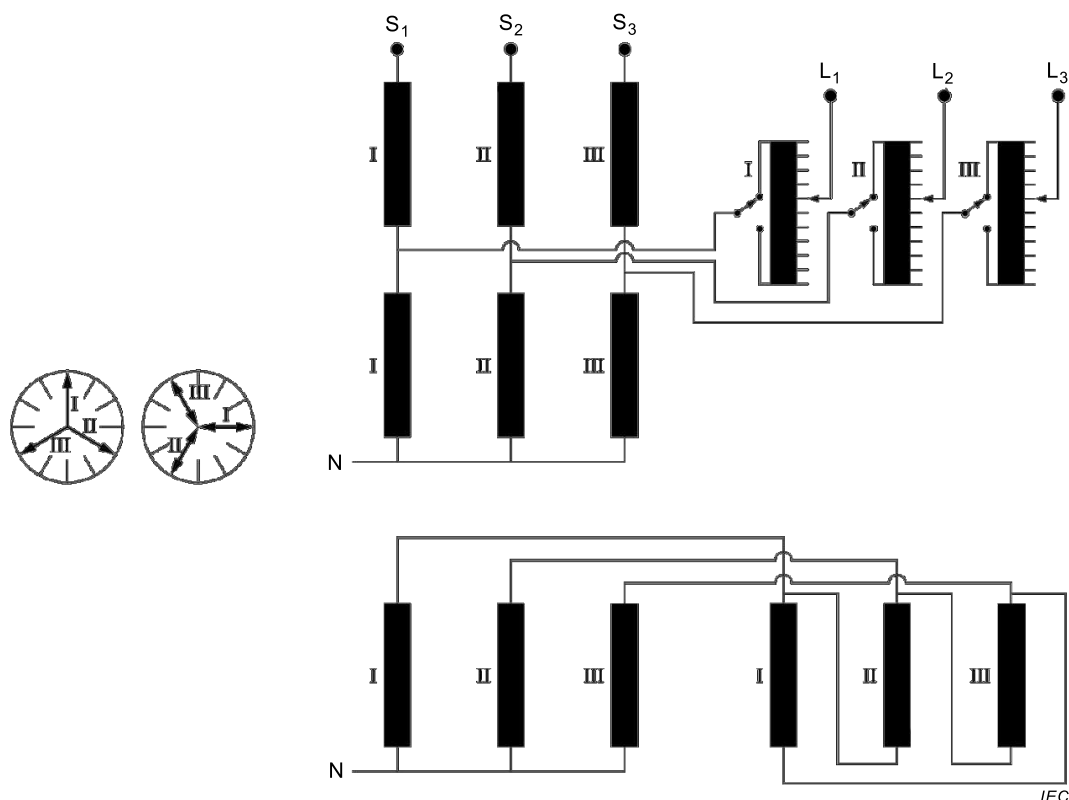


Figure 6 – Example F: YNa0yn/dIII A0-3/9

9.4.3.2 Example G: V A0-2/8

Example G is a transformer incorporating an asymmetric design phase shifting element on the same core. This has the connection phase displacement symbol V A0-2/8. The connection diagram is shown in Figure 7.

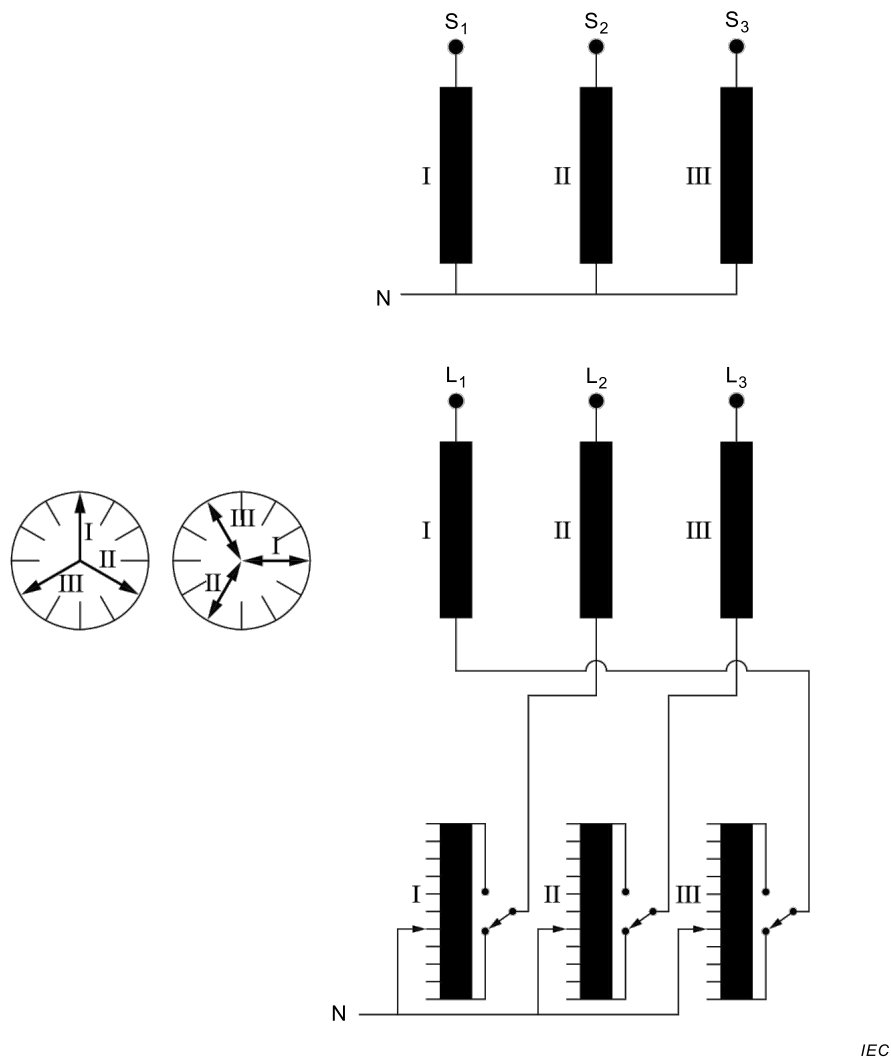


Figure 7 – Example G: V A0-2/8

10 Rating plates (nameplates)

The phase shifting transformer shall be provided with a rating plate in accordance with IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00.

In addition, a table shall be provided with one row for each tap position with columns giving the following information at each tap position, either on the rating plate or on a separate plate:

- Tap – the designation of the tap position, usually the tap number;
- No-load phase shift – the phase shift in degrees from the S to the L terminals at no load with 'a' for advance and 'r' for retard;
- Impedance – the measured short circuit impedance;
- Power limit S to L – the maximum power at the L terminal (with unity power factor, rated voltage and frequency at the L terminal) when operating with power flowing from the S terminal to the L terminal that will not result in overfluxing of the core(s) or overstressing of other components such as the tap-changer, not counting thermal limits;
- Power limit L to S – as d) above but for operation with power flowing from the L terminal to the S terminal.

The following legend shall be shown on the nameplate below the table:

"Loading above these power limits is not permissible. Loading is also subject to normal thermal overload limits which may be lower."

If there are both voltage and phase angle taps, additional information may be required.

If additional information is required on the rating plate, this should be indicated by the purchaser in the enquiry.

In particular, if full load phase shift data is specified by the purchaser, the phase shift in degrees calculated from the measured impedance at rated power with power flowing from S to L (and L to S if required) at unity power factor at each tap position shall be given. If rated power is not available on some buck taps, the value should be denoted by *.

For PSTs with more than one separate liquid compartment, the liquid volume and vacuum withstand capability of each compartment (including connection chambers) shall be shown on the rating plate. If barriers between compartments are incorporated, the vacuum capability of each compartment shall indicate whether or not the adjacent chamber needs to be drained and be at atmospheric pressure.

The rating plate shall indicate whether the PST is suitable for operation with an on-load bypass, continuous in-service bypass or no bypass, depending on the lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT) test performed.

11 Terminal markings and phase rotation

Unless otherwise specified by the purchaser, the following terminal markings shall be used:

- the S terminals: S with the phase designation 1, 2 and 3, for example $S_1 S_2 S_3$;
- the L terminals: L with the phase designation 1, 2 and 3, for example $L_1 L_2 L_3$;
- the neutral of the excitation winding (if present): S_0 or $N_1 N_2 N_3$ if the phase neutrals are separate;
- the neutral of the exciting winding (if present and brought out): n_0 or $n_1 n_2 n_3$ if the phase neutrals are separate;
- additional windings (if any brought out): Y, Z.

The phase connection to obtain the defined meaning of advance and retard between the S and L terminals see 3.17 and 3.18 (as recorded on the rating plate) shall be in the sequence 1, 2, 3. If this rotation is reversed, the sense of advance and retard is also reversed compared with the rating plate.

Unless otherwise specified, the terminals shall be in the sequence 1, 2, 3 from left to right facing the L terminals and right to left facing the S terminals.

12 Information to be provided by the manufacturer

The manufacturer shall provide details, at the tender stage, of the loading capability in buck mode with tap position voltage and frequency.

The manufacturer shall provide, at the design stage, sufficient details of the design to be able to model the transient operation of the PST in order to be able to properly specify the insulation coordination. See 5.2.5.

13 Tests

13.1 General

Tests shall be carried out in accordance with the requirements of IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00 (see Clause 4) except for the modifications introduced in Clause 13. For testing purposes, a complete PST shall be defined as a fully assembled and connected PST as it will be placed in-service, but without external surge arresters installed.

See 7.6 for test connections.

Where the phase shifting transformer consists of separate single phase units, tests may be carried out on each phase separately and type (design) tests are required on only one phase. The tests shall be arranged so that the test requirements are met. Dielectric tests on the interconnected windings are required at levels representative of those that would occur if the unit was tested completely assembled in the three phase configuration.

13.2 Routine tests

The following routine tests are required on all PSTs:

- a) measurement of winding resistance (13.5);
- b) measurement of voltage ratio, phase angle and check of phase displacement (13.6);
- c) measurement of short-circuit impedance and load loss (13.7);
- d) measurement of no-load loss and current (13.9);
- e) dielectric routine tests (13.12);
- f) tests on on-load tap-changers (13.13);
- g) leak testing with pressure for liquid-immersed transformers (tightness test) (13.14);
- h) check of the ratio and polarity of built-in current transformers;
- i) check of core and frame insulation for liquid-immersed transformers with core or frame insulation (IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00);
- j) determination of capacitance between each winding and earth and where possible between windings;
- k) measurement of DC insulation resistance between each winding and earth and where possible between windings;
- l) measurement of dissipation factor ($\tan \delta$) of the insulation system capacitances;
- m) measurement of dissolved gases in dielectric liquid from each separate oil compartment except diverter switch compartment.

13.3 Type (design) tests

The following type (design) tests are required on the first unit of each design:

- a) temperature-rise test (13.8);
- b) dielectric type (design) tests (13.12);
- c) determination of sound level (13.10);
- d) measurement of zero sequence impedance (13.11);
- e) measurement of the power taken by the fan and liquid pump motors.

13.4 Special tests

The following special tests are to be carried out if individually specified by the purchaser in the enquiry and order:

- a) dielectric special tests (13.12);

- b) short-circuit withstand test (IEC 60076-5 or IEEE Std C57.12.90);
- c) vacuum deflection test (IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.90);
- d) pressure deflection test (IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.90);
- e) vacuum tightness test on site (IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.90);
- f) measurement of frequency response (IEC 60076-18 or IEEE Std C57.149 [7]);
- g) check of external coating (ISO 2178 and ISO 2409 or as specified);
- h) mechanical test or assessment of tank for suitability for transport (to customer specification);
- i) determination of the weight of each PST unit arranged for transport by calculation or, if required by the purchaser at the enquiry stage, by measurement;
- j) transient voltage measurements, for example low voltage impulse [recurrent surge oscillograph (RSO)] and/or resonant frequency measurements.

13.5 Winding resistance

The resistance of each winding of the PST shall be measured individually including any tap winding at each tap position using temporary test bushings or before internal winding to winding connections are made if necessary.

By agreement, measurements at some tap positions may be omitted if no additional information is gained.

13.6 Measurement of voltage ratio, phase angle and check of phase displacement

The voltage ratio and phase angle between the S and L terminals shall be measured on each tap position and on both positions of the ARS (if fitted). See IEC 62032 [1] or IEEE Std C57.135 [2].

The voltage ratio of each individual transformer shall be measured using temporary test bushings or before internal winding to winding connections are made if necessary.

When additional windings are present, a check of phase displacement shall be made according to IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.90.

13.7 Measurement of short-circuit impedance and load loss

The short-circuit impedance and load loss shall be measured on the complete PST at each tap position. The short-circuit impedance and loss shall be measured at each extreme and zero phase shift tap positions, and any other tap positions where either of these values is guaranteed, at a current corresponding to rated power. Other tap positions may be measured at reduced current, in which case the measurement at each extreme and zero phase shift tap position shall be repeated at the same reduced current.

NOTE 1 These measurements are necessary because impedance is an important parameter for calculating the performance of the PST on each tap position. Impedance is not expected to vary significantly with current. Loss measurements are less important on tap positions other than extreme, zero phase shift and any other tap positions for which they are guaranteed, so errors associated with reduced current are usually acceptable.

By agreement, measurements on individual transformers may be combined to derive the PST impedance and loss if this approach has been validated on a previously supplied unit of the same design or at a reduced current if necessary due to test equipment limitations.

NOTE 2 Impedance and load loss are based on rated power and rated voltage, as defined in 3.5 and 3.19 (for asymmetric designs).

13.8 Temperature-rise test

The temperature-rise test shall be carried out in accordance with IEC 60076-2 or IEEE Std C57.12.90.

Unless otherwise agreed, the test shall be carried out on the extreme tap position that has the maximum load loss. If under this condition any winding other than a tap winding receives less than 90 % of the maximum current that the winding will see at rated power on another tap position, an additional winding gradient measurement shall be made on the tap position for maximum current in this winding.

The temperature rise of all windings shall be determined. This may require the use of temporary test bushings.

Unless otherwise agreed between manufacturer and purchaser, the test shall be carried out on the completely assembled PST. If agreed, the test may be carried out on the exciting unit and the series unit separately if they are in separate tanks each with its own cooling system. In this case all the connections between the exciting and series units shall be tested with at least one of the units. Since the flux distribution in the series unit will be different from the combined condition in a separate test, a review of this difference shall be carried out and any necessary corrections applied.

If the exciting and series units have separate cooling systems and they are tested together, then in general it will not be possible to achieve the calculated total loss in each unit simultaneously. In this case the current for the determination of top liquid rise shall be chosen to give the correct total loss for both units summed together, and a correction made in the test results of each unit individually.

By agreement, the losses and currents achieved during the temperature-rise test may be reduced according to the provisions of IEC 60076-2 or IEEE Std C57.12.90. Any limitation on the achievable losses or currents imposed by the PST design or the manufacturer's test facility that would require this agreement shall be clearly stated by the manufacturer in the tender.

13.9 Measurement of no-load loss and current

The no-load loss and current shall be measured with 90 %, 100 % and 110 % of rated voltage appearing at the S terminals at each extreme and zero phase shift tap position. Temporary bushings connected to one of the windings may be used to perform this measurement.

13.10 Determination of sound level

13.10.1 General

Sound level measurements shall be made according to IEC 60076-10 or IEEE Std C57.12.90. If it is desired to be able to estimate the noise level of the PST for a wider range of operating conditions than is covered by the standard measurements set out below, additional measurements will be required. See Annex D.

13.10.2 For PSTs with one combined cooling system

Unless otherwise specified, the following measurements shall be made for PSTs with one combined cooling system:

- a) with the PST energized at rated voltage no-load at zero phase shift tap position with only the cooling equipment that would be in operation at no-load;
- b) with the PST energized at rated voltage no-load at zero phase shift tap position with all the cooling equipment in operation;

- c) with the PST energized at rated voltage no-load at the extreme advance tap (or extreme retard tap if there is no advance capability) with all the cooling equipment in operation.

13.10.3 For PSTs with separate exciting and series unit cooling systems

If the exciting and series units are in separate tanks with separate cooling systems, unless otherwise specified the following measurements shall be made:

- a) with the PST energized at rated voltage no-load at zero phase shift tap position with only the cooling equipment that would be in operation at no-load;
- b) with the PST energized at rated voltage no-load at zero phase shift tap position with only the cooling equipment that would be in operation at no-load on the exciting unit and all the cooling equipment in operation on the series unit;
- c) with the PST energized at rated voltage no-load at the extreme advance tap (or extreme retard tap if there is no advance capability) with all the cooling equipment in operation.

The PST shall be in the service condition if possible; if this is not possible, separate measurements of each tank and cooling system may be made and the results combined.

13.11 Measurement of zero sequence impedance

The following zero sequence impedance measurements shall be made at each extreme and zero phase shift tap position:

- a) between the S terminals connected together and neutral, with the L terminals open circuit;
- b) between the S terminals connected together and neutral, with the L terminals connected to neutral;
- c) between the L terminals connected together and neutral, with the S terminals open circuit.

For designs which do not have a neutral connection, the zero sequence measurement shall be made between the S terminals connected together and the L terminals connected together.

For designs with more than one neutral, all the neutrals connected to earth in service shall be connected together.

Additional zero sequence impedance measurements may be specified by the purchaser.

13.12 Dielectric tests

13.12.1 General

The classification of dielectric tests as routine, type (design) and special shall be as given in IEC 60076-3 or IEEE Std C57.12.00, except for the lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT) test (see 13.12.5).

Dielectric tests shall be performed on the complete PST unless all the following conditions are fulfilled:

- it is unreasonable to perform the tests on the fully assembled PST;
- it can be shown that tests on separate parts of the PST completely represent the voltages that would occur on the fully assembled PST;
- all windings and connections are tested;
- the test arrangements are agreed between manufacturer and purchaser.

If the manufacturer cannot test the complete PST, this shall be stated in the tender together with the alternative arrangements.

NOTE The application of a line terminal AC test (LTAC) according to IEC 60076-3 is complicated in the case of a phase shifting transformer because of the phase to phase connections and the specification of this test can lead to a higher insulation level.

13.12.2 Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

Induced voltage tests with partial discharge measurement shall be performed at both the extreme tap positions in accordance with IEC 60076-3 or IEEE Std C57.12.90.

If rated currents on particular taps in buck mode are specified, a test or tests shall be conducted at a level which accounts for the highest increase in internal voltage that occurs in operation in the buck mode at the specified rated powers and tap positions. This increased internal voltage shall be taken as the rated voltage for the purpose of determining the induced test voltage levels for that winding. In order to avoid overtesting the exciting unit, it may be necessary to conduct this test with the exciting winding to series unit connection disconnected when testing the series unit.

Additionally, the internal arrangement of the PST shall be analysed to ensure that the prescribed test voltage is achieved for all the windings and connections. Additional induced voltage tests may be required for some designs.

13.12.3 Switching impulse test (SI)

The switching impulse test shall be carried out on the complete PST on the zero phase shift tap with the required voltage on the S and L terminals of the tested phase connected together. If the design has a neutral connection, it shall be earthed; if not, the other end of the tested phase of the excitation winding shall be earthed. The other terminals may either be open circuit, connected together or earthed via an impedance.

NOTE 1 The zero phase shift tap is chosen to give the highest voltage on the excitation winding

For designs where a switching impulse test on the zero phase shift tap will not induce voltage in the series winding, an alternative or additional test at an extreme or other tap position may be specified by the purchaser. In this case the S and L terminals are not connected together. If this is an additional test and the voltage on one or more of the line terminals not connected to the impulse generator is higher than the voltage on the impulsed terminal, then the applied impulse voltage may be reduced provided that the required switching impulse voltage level and waveshape is achieved on the other terminal(s).

NOTE 2 For PSTs of a two core design it might be difficult to obtain the required time-to-zero; in this case, procedures such as pre-magnetizing the cores with DC or additional reduced impulses could be helpful.

NOTE 3 Short rise time waves might give rise to high oscillatory phase to phase voltages.

13.12.4 Lightning impulse test

The lightning impulse test shall be performed on each of the S and L terminals in turn, the other line terminal (S or L) of the same phase shall be earthed directly or, if needed to achieve the required waveshape, through an impedance. The impedance shall not exceed the surge impedance of the connected line if a value is supplied by the purchaser or 400 Ω if not.

If the surge impedance value is not specified, the voltage appearing during the impulse test at the other line terminal shall not be more than 75 % of the rated lightning impulse withstand voltage. In all circumstances, the lowest value of impedance needed to achieve the required waveshape shall be used.

All other terminals shall be earthed.

The manufacturer shall determine, either by calculation or by performing low voltage impulse measurements, the tap position or tap positions that give the highest internal voltages and voltage differences between windings and parts of windings. On request from the purchaser,

the manufacturer shall provide details of the anticipated impulse voltages and waveforms within the phase shifting transformer at any particular tap positions or details of the worst cases.

The test shall be conducted on one phase on extreme advance tap, one on extreme retard tap and one on the zero phase shift tap. If the operation of the ARS or change-over selector gives two or more possible configurations for the zero phase shift tap, the configuration that gives the highest internal voltages shall be used. In certain cases, if the manufacturer determines that different tap positions to those given above give higher internal voltages, this shall be brought to the attention of the purchaser and used if agreed by the purchaser.

Alternatively, the tap position or positions can be chosen by the purchaser, usually the tap position or tap positions which give the highest internal voltages. Only a total of three impulse sequences are required on each set of terminals, one on each phase.

NOTE The principle of choosing different tap positions on each phase is to make sure different parts of the PST receive stresses during test representative of the range of stresses that occur at different tap positions in service. Although the highest value of stress in a particular part of the insulation structure can occur on a particular tap position, different tap positions can test other parts of the PST which are not otherwise effectively tested on that particular tap. It is accepted that one test per terminal per phase is not able to cover every condition and so the best compromise is necessary.

For designs where the S and L terminals are connected together by the tap-changer without impedance on zero phase shift tap, the tests on the S and L terminals on the zero phase shift tap are effectively carried out at the same time. Therefore a connection to earth from one of these terminals on the tested phase cannot be used for tests on the zero phase shift tap. The tests on the extreme taps for these designs shall be carried out as described above.

13.12.5 Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

As a type (design) test, an LIMT test (with the S and L terminals connected together on the tested phase) shall be performed on the zero phase shift tap position at 80 % of the full test level, or 110 % of the surge arrester 10kA residual voltage (value to be provided by the purchaser at the tender stage), whichever is higher.

NOTE 1 This default requirement assumes that the PST has an on-load bypass that is only closed in service for the time taken to complete a switching sequence to place the PST into or out of service, so a test at full test level is not justified.

If the PST is specified to be normally used in the condition where an on-load bypass is closed in service with the PST energized from both S and L terminals, an LIMT test shall be performed at 100 % of the full test level on the zero phase shift tap as a type (design) test and a routine test at the 80 % level. The routine test is not required on the type (design) tested unit.

NOTE 2 If the PST can and will be used with the bypass closed on other than the zero phase shift tap (this is considered to be an unusual capability as very high circulating currents are expected and most PSTs will not be designed for this situation), consideration might be given to the effect of impulses on the PST in this condition and performing the LIMT test on this tap.

If the PST is specified not to be used with an on-load bypass, the LIMT test does not apply.

13.13 Tests on on-load tap-changers – operation test

With the tap-changer fully assembled on the transformer, the following sequence of operations shall be performed without failure:

- a) with the PST de-energized, eight complete cycles of operation (a cycle of operation goes from one end of the tapping range to the other, and back again);
- b) with the PST de-energized, and with the auxiliary voltage reduced to 85 % of its rated value, one complete cycle of operation;

- c) with the PST energized at rated voltage and frequency at no load, one complete cycle of operation. When the tap winding is used to energize the PST, there will be one or more tap positions that cannot be tested. In this case, by agreement, the tap positions that cannot be tested in the factory should be tested at site during commissioning;

NOTE The use of the tap winding to energize the PST is a feature of high voltage units that do not include a test winding or a suitable stabilizing or tertiary winding.

- d) with the L terminals short-circuited and the S terminals supplied with, as far as practicable, rated current, 10 cycles of tap-change operations across the range of two steps on each side from where a coarse or reversing change-over selector or advance-retard switch operates, or otherwise from the mechanical mid position of the tap-changer (the tap-changer will pass 20 times through the change-over position). If there is both an advance-retard switch and a coarse change-over selector at different tap positions, this test shall be repeated to test both switches. Where the impedance of the PST is zero at one of these tap positions, this test cannot normally be performed as stated; in this case the test may be performed using an external impedance at reduced current if necessary, or different tap positions for the test may be agreed.

13.14 Leak testing with pressure

All tanks and liquid-filled connections shall be tested for leaks in accordance with IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00.

13.15 Vacuum deflection test

All tanks and liquid-filled connections shall be tested for deflection in accordance with IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00.

13.16 Pressure deflection test

All tanks and liquid-filled connections shall be tested for deflection in accordance with IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00.

14 Tolerances

14.1 General

The tolerances shall be as given in IEC 60076-1 or IEEE Std C57.12.00. Additional tolerances specific to PSTs shall be as follows.

14.2 Tolerance for impedance and phase angle

Where maximum and minimum impedance values are specified, these are limits without tolerance.

Where no-load advance and retard phase angles are specified, the design value on the extreme taps in absolute terms shall not be less than the specified value, so that these are limits without tolerance.

Where minimum boost and/or buck absolute phase angles at rated power are specified, these are limits without tolerance. For the purposes of Clause 14, the boost and buck phase angles at rated power shall be calculated using the measured values of impedance and no-load phase angle, according to the following formulas:

$$\alpha_{\text{boost}} = \alpha_{0\text{max}} - \arctan\left(\frac{Z}{100}\right)$$

$$\alpha_{\text{buck}} = \alpha_{0\text{max}} + \arctan\left(\frac{Z}{100}\right)$$

where

- $\alpha_{0\text{max}}$ is the no-load phase angle at the extreme tap position;
- Z is the impedance on the extreme tap position expressed as a percentage;
- α_{buck} is the load phase angle for buck operation at rated power at the extreme tap position;
- α_{boost} is the load phase angle for boost operation at rated power at the extreme tap position.

The formulas are an approximation assuming unity power factor and impedance very much greater than resistance. If the power factor specified is other than unity or if the resistance is not small compared to the impedance, the formula to be used shall be as given in Annex E or as otherwise agreed.

Unless otherwise specified, where specific impedance values are specified, the impedance tolerance shall be $\pm 7,5$ % of the specified value for each tap position for which the impedance is specified.

In all cases and separately to the tolerances above, the impedance tolerance shall be $\pm 7,5$ % of the design value and the no-load phase angle tolerance shall be ± 1 % or $\pm 0,1^\circ$ of the design value, whichever is greater.

In cases where PSTs are expected to be paralleled, the impedance and no-load phase angle tolerances should be established by agreement between the user and the manufacturer.

Annex A (informative)

Check list of information to be provided with enquiry and order

A.1 Rating and general data

A.1.1 Normal information

The following information shall be given in all cases:

- a) particulars of the standards to which the PST shall comply (either IEC or IEEE);
- b) frequency;
- c) indoor or outdoor type;
- d) rated power – if the PST is specified with alternative methods of cooling, the respective lower power values shall be stated together with the rated power (which refers to the highest power cooling mode);
- e) rated voltage for S and L terminals;
- f) either
 - minimum no-load phase angle and impedance, or
 - phase angle at rated power;

NOTE See 6.5.

- g) the minimum number of tap steps;
- h) direction of power flow (can be both directions);
- i) minimum impedance at zero phase shift tap position (could be zero);
- j) symmetrical short circuit current or power of the network connected to the S and L terminals;
- k) highest voltage for equipment (U_m) for each winding line and neutral terminals (with respect to insulation, see IEC 60076-3 or IEEE Std C57.12.00);
- l) method of system earthing;
- m) if an on-load bypass switch connecting the S and L terminals is either not present or if it is normally closed;
- n) insulation level and dielectric test levels (see IEC 60076-3 or IEEE Std C57.12.00), for each winding line and neutral terminals;
- o) requirements for terminal marking and phase rotation if different from Clause 11, ideally by providing a terminal layout diagram;
- p) any peculiarities of installation, assembly, transport and handling. Restrictions on dimensions and mass;
- q) details of auxiliary supply voltage (for fans and pumps, tap-changer, alarms, etc.);
- r) fittings required and an indication of the side from which meters, rating plates, liquid-level indicators, etc. shall be legible;
- s) if a particular type of liquid preservation system is required;
- t) guaranteed maximum temperature-rise information;
- u) unusual service conditions (see Clause 5);
- v) details of type and arrangement of terminals, for example air bushings or cable box or gas insulated bus bar;
- w) whether the core and frame connections should be brought out for external earthing;
- x) the surge impedance of the connected line, if known (see 13.12.4);

- y) the minimum number of ARS operations before contact or switch replacement is required. If an ARS is included in the design, this has to be clarified between the PST and ARS manufacturer before the tender since the allowable number of operations depends on the PST design. The PST manufacturer shall make it clear in the tender the frequency and scope of required work on the ARS, if any. See Annex F.

A.1.2 Special information

The following additional information shall be given if the particular item is required by the purchaser:

- a) any requirement for loading beyond rated power;
- b) any requirement for buck capability beyond that given in 5.2.2 (see 6.3);
- c) type of PST where a particular design is required, for example single core or two core and whether an asymmetric design is acceptable;
- d) any specific requirements regarding voltage variation together with or separate to phase angle variation;
- e) if any particular arrangement of tanks is required, for example two cores in a single tank, two cores in separate tanks, three single phases, etc;
- f) connection symbol and neutral terminal requirements for each winding;
- g) type of cooling;
- h) whether "de-energized" instead of, or as well as, "on-load" tap-changing is required;
- i) minimum lag and lead full load power factor;
- j) whether a particular type of insulating liquid is required, for example a natural insulating liquid or synthetic insulating liquid;
- k) if lightning impulse voltage tests are required, and whether or not the test is to include chopped waves if not already required by the standard (see IEC 60076-3 or IEEE Std C57.12.00);
- l) whether a stabilizing winding is required and, if so, the method of earthing;
- m) any particular tolerances or limits on phase angle and/or short-circuit impedance;
- n) details of sound-level requirements, guarantees, and special measurements (see Annex D and IEC 60076-10 or IEEE Std C57.12.90);
- o) any particular requirements needed to allow an acoustic enclosure not supplied by the manufacturer to be used;
- p) vacuum withstand of the PST tank(s), conservator, and cooling equipment if a specific value is required;
- q) any special tests not referred to above which are required by the purchaser;
- r) loss evaluation information or maximum losses;
- s) any physical size limitations, for example for installation on an existing foundation or in a building. Special installation space restrictions which may influence the insulation clearances and terminal locations on the transformer;
- t) any particular requirements for connections between separate tanks (see 7.2);
- u) shipping size and weight limitations. Minimum acceleration withstand values if higher than specified in 6.14;
- v) transport and storage conditions not covered by normal conditions described in IEC 60076-1 or IEEE Std C57.150;
- w) any particular maintenance requirements or limitations;
- x) whether a disconnection chamber is required for direct cable connections;
- y) whether facilities for condition monitoring are required;
- z) any particular environmental considerations regarding the impact of the PST on the environment that shall be taken into account in the PST design;

- aa) any particular health and safety considerations that shall be taken into account in the PST design regarding manufacture, installation, operation, maintenance and disposal;

Unusual electrical operating conditions as follows:

- bb) whether load current wave shape will be heavily distorted and whether unbalanced three-phase loading is anticipated. In both cases, details to be given;
- cc) whether the PST is to be connected directly or by a short length of overhead line to gas-insulated switchgear (GIS);
- dd) unbalanced AC voltages, or departure of AC system voltages from a substantially sinusoidal wave form;
- ee) loads involving abnormal harmonic currents such as those that may result where appreciable load currents are controlled by solid-state or similar devices. Such harmonic currents can cause excessive losses and abnormal heating;
- ff) excitation exceeding either 110 % rated voltage or 110 % rated V/Hz;
- gg) planned short circuits as a part of regular operating or relaying practice;
- hh) unusual short-circuit application conditions differing from those in IEC 60076-5 or IEEE Std C57.12.90;
- ii) unusual voltage conditions including transient overvoltages, resonance, switching surges, etc. which may require special consideration in insulation design;
- jj) any requirement for withstanding DC currents flowing between the terminals or between the terminals and neutral (for example, geomagnetically induced currents);
- kk) regular frequent energization in excess of 24 times per year;
- ll) any requirements for remote control of the PST;

Unusual physical environmental conditions as follows:

- mm) altitude above sea-level, if in excess of 1 000 m (3 300 ft);
- nn) special external cooling medium temperature conditions, outside the normal range or restrictions to circulation of cooling air;
- oo) expected seismic activity at the installation site which requires special consideration;
- pp) damaging fumes of vapours, excessive or abrasive dust, explosive mixtures of dust or gases, steam, salt spray, excessive moisture, or dripping water, etc;
- qq) abnormal vibration, tilting, or shock.

A.2 Parallel operation

If parallel operation with another PST is required, this shall be stated and, unless the PSTs are supplied as a pair or set, the following information on the parallel PST shall be given:

- a) rated power;
- b) voltage or turns ratio for each tap position;
- c) no-load phase angle at each tap position;
- d) impedance at each tap position;
- e) winding configuration and number of cores with a diagram of connections, or connection symbol, or both;
- f) any buck capability limitations;
- g) any maximum allowable currents at particular tap positions (for example, due to tap-changer maximum current capability);
- h) number of tap positions that the control system will allow the PSTs to be out of step and the duration of the out-of-step condition;
- i) paralleling method in control system.

Annex B (informative)

Behaviour of a phase shifting transformer with non-symmetrical fault currents

Phase shifting transformers have the characteristic that a series winding is connected in series with the line terminals of a power system. The no-load voltage appearing on this series winding at the extreme tap position is usually smaller than the rated phase to earth voltage of the system. During a non-symmetrical fault situation, such as a single-phase to earth fault on one of the terminals, this series winding can experience an overvoltage given by the ratio of the system voltage to the series winding voltage.

Normally a fault between the PST and the circuit breaker is cleared by opening the circuit breakers on both sides (source and load side) of the PST. The opening of the circuit breakers on each phase is unlikely to be simultaneous, with the phase carrying the fault current usually clearing last. This is shown for the circuit breaker connected to the S1 terminal in Figure B.1. This means that a momentary single phase supply (greater than rated voltage) is applied to one of the series windings of the PST. Since both the other phases may already be open circuit, this can be considered as a no-load situation with voltages very significantly greater than rated voltage appearing at the open terminals.

The consequence can be quite large momentary overvoltages from phase to ground on the terminals of the other (cleared) phases. The levels of the overvoltages depend on the no-load angle, the tap position of the PST, the type(s) of the magnetic circuit(s), the presence or otherwise of a delta winding, and the internal windings arrangement. Generally a tap position one tap away from the neutral position gives the highest voltages.

It is therefore necessary to protect all terminals of a phase shifter with suitable surge arrestors from line to ground. The surge arresters need to be connected as nearly as possible directly on the terminals, but certainly between the phase shifter and the circuit breaker.

The effect of the line to ground voltage (reduced by the system impedance) being applied across the series winding under short circuit conditions on both the windings and any internal non-linear resistors needs to be considered in the design (see also Clause 8).

This phenomenon is described in CIGRE-paper A2-207 [8].

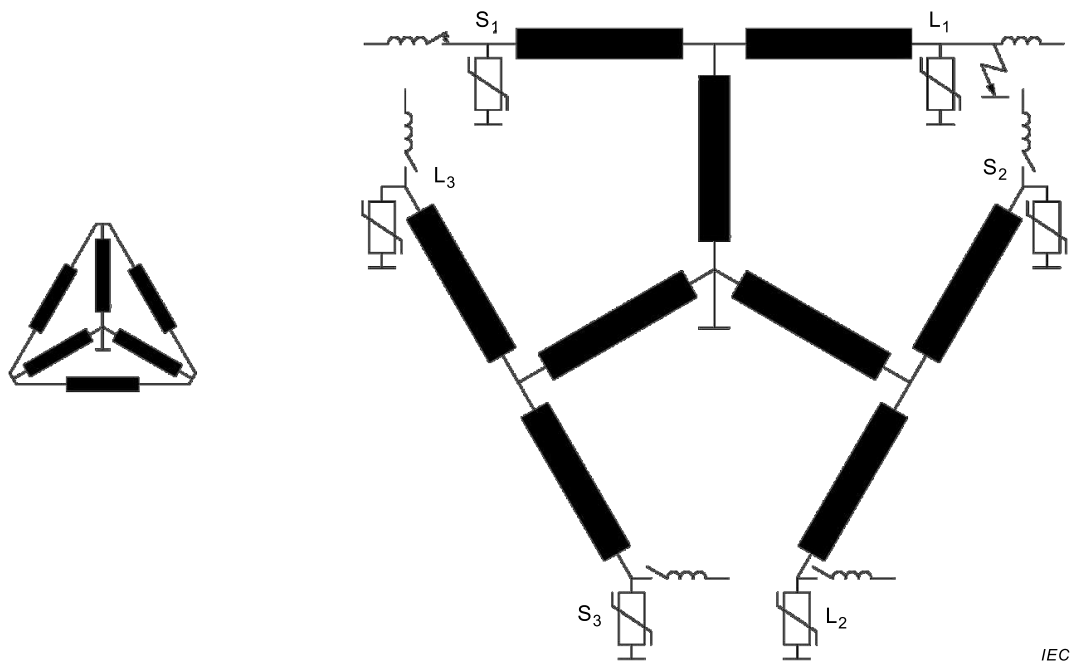


Figure B.1 – PST with single phase fault and surge protection

Annex C (informative)

Example specification of buck capability

Table C.1 gives an example of the specification of rated power and overload requirements for a phase shifting transformer that is required to have a buck capability.

In this case full overload capability is required on the neutral tap and the first two taps, but a reduced rating is acceptable on the extreme buck tap.

The buck capability ratings would need to be specified to be at rated frequency and rated voltage (or at another particular frequency and voltage).

Table C.1 – Required PST capability in buck operation

Tap number	No-load phase angle °	Rated power MVA	6 h overload rating MVA	10 min rating MVA
1	34	75	75	75
2	32	80	80	80
3	30	85	85	85
4	28	90	90	90
5	26	95	95	95
6	24	100	100	100
7	22	100	105	105
8	20	100	110	110
9	18	100	115	115
10	16	100	120	120
11	14	100	120	125
12	12	100	120	130
13	10	100	120	135
14	8	100	120	140
15	6	100	120	145
16	4	100	120	150
17	2	100	120	150
18	0	100	120	150

Annex D (informative)

Additional noise measurements

The PST no-load noise varies with tap position because the excitation of the core(s) may vary with tap position. For reactor type tap-changers, bridging tap positions might need to be considered if the PST incorporates a preventive autotransformer (see IEEE Std C57.12.80. for a definition of a preventive autotransformer). The proportion of the load and hence load noise in the various windings also varies with tap position. It is therefore necessary to consider which are the important conditions of load and tap position when specifying guaranteed maximum sound levels. In addition, the core excitation will rise when the PST is in buck mode and additional no-load noise measurements at higher than rated voltage will be required to be able to calculate the noise level under these conditions. The level of this higher voltage will need to be agreed, but the higher voltage calculated as the basis for the induced voltage (IVPD) test (see 13.12.2) may be used as a reference.

The measurements required on a complete unit are as follows:

- a) no-load noise at zero phase shift tap position and rated voltage;
- b) no-load noise at extreme tap position and rated voltage;
- c) no-load noise at extreme tap position and at a higher voltage as far as possible representative of the overexcited buck condition;

NOTE The over-excitation factor is the result of both the additional voltage on the intermediate circuit and the addition of leakage and main flux in the yokes. A leakage flux calculation to evaluate the impact of flux density distribution in the core on the resulting noise may be necessary to calculate the equivalent over-excitation factor in a uniformly excited core.

- d) load noise at zero phase shift tap and rated current;
- e) load noise at extreme tap position and rated current;
- f) noise of cooler if not included with another measurement.

The measurements required when the series and exciting units can be separated are as follows:

- 1) no-load noise of exciting unit at rated voltage;
- 2) no-load noise of exciting unit at voltage equivalent to extreme tap position and rated voltage (this voltage is lower than a));
- 3) no-load noise of series unit at excitation for extreme tap position and rated voltage;
- 4) no-load noise of exciting unit at a higher voltage as far as possible representative of the overexcited buck condition;
- 5) no-load noise of the series unit at a higher voltage as far as possible representative of the overexcited buck condition;
- 6) load noise of exciting unit at rated current;
- 7) load noise of series unit at rated current;
- 8) noise of exciting unit cooler;
- 9) noise of series unit cooler.

The higher voltage representative of the overexcited buck condition for a given tap position is different for the series unit and the exciting unit. This higher voltage has to be determined by calculation. It varies with the supply voltage (fluctuation has to be considered), the load current, the power factor and the tap position. It shall be recognized that the overexcitation condition caused by buck mode operation is different to that caused by increasing the voltage at no load because the balance of flux in the main limbs yokes and return limbs will be different. A compromise voltage will need to be found at no load to take this into account.

In order to be able to establish calculation sheets for different conditions of loads and voltage, it may be helpful to plot a curve of no-load noise of the series and exciting units at different levels of no-load voltage covering the appropriate range.

Table D.1 gives an illustration of the measured sound levels that need to be combined to represent the sound levels for some different loading conditions. See IEC 60076-10 for guidance on combining sound level measurements.

Table D.1 – Combinations of sound level measurements needed to represent different loading conditions

Loading condition	No-load sound 1 p.u. voltage		No-load sound at over excitation voltage		Load sound	
	Series	Exciting	Series	Exciting	Series	Exciting
No load Neutral tap		X				
Full load Neutral tap		X			X	
Full boost	X	X			X	X
Full buck			X	X	X	X

Annex E (informative)

Calculation of phase angle under load

Figures E.1 to E.4 and Formulas E.1 to E.10 give the method of calculating the phase shift under load, when the assumption that resistance is much smaller than impedance is not valid or the power factor is not unity.

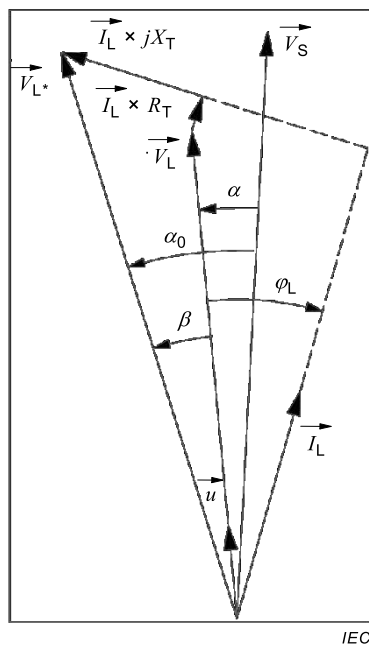


Figure E.1 – Phase angle diagram for a PST under load where $\alpha_0 > 0$ and $\varphi_L < 0$

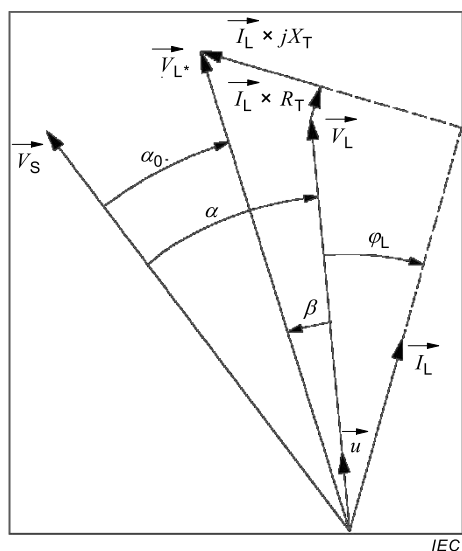


Figure E.2 – Phase angle diagram for a PST under load where $\alpha_0 < 0$ and $\varphi_L < 0$

X_T	is the PST reactance;
Z_T	is the PST complex impedance, $Z_T = R_T + jX_T$;
β	is the load angle drop, $\beta = (\vec{V}_L, \vec{V}_{L*})$;
α_0	is the phase-shift angle no-load;
α	is the phase-shift angle on-load.

If $\vec{u}$ is defined as the unit vector collinear to $\vec{V}_L$, we can write:

$$\vec{V}_L = V_L \times \vec{u}, \quad \vec{I}_L = I_L \times e^{j\varphi_L} \times \vec{u}, \quad \text{and} \quad \vec{V}_{L*} = V_{L*} \times e^{j\beta} \times \vec{u}.$$

Substituting the above equations into $\vec{V}_{L*} = \vec{V}_L + Z_T \times \vec{I}_L$, the equation becomes $V_{L*} \times e^{j\beta} = V_L + Z_L \times I_L \times e^{j\varphi_L}$ or

$$e^{j\beta} = \frac{V_L}{V_{L*}} + \frac{Z_L \times I_L}{V_{L*}} \times e^{j\varphi_L} \quad (\text{E.1})$$

Noting that $\frac{Z_L \times I_L}{V_{L*}} = \frac{R_{T\%}}{100} + j \frac{X_{T\%}}{100}$, where $R_{T\%}$ and $X_{T\%}$ are the relative resistance and reactance of the PST expressed as a percentage of rated voltage and equalling the real and imaginary parts of Formula (E.1), two new equations are obtained:

$$\cos(\beta) = \frac{V_L}{V_{L*}} + \frac{R_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L) - \frac{X_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L)$$

$$\sin(\beta) = \frac{R_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + \frac{X_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L)$$

then

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + \frac{X_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L)\right) \quad (\text{E.2})$$

$$\alpha_0 = \alpha + \beta$$

$$|\alpha_{\text{boost}}| = |\alpha_0| - |\beta| \quad (\text{E.3})$$

$$|\alpha_{\text{buck}}| = |\alpha_0| + |\beta| \quad (\text{E.4})$$

where

$|\alpha_{\text{boost}}|$ is the absolute value of the load phase angle in boost operation;

$|\alpha_{\text{buck}}|$ is the absolute value of the load phase angle in buck operation.

Note that for unity power factor, Formula (E.2) becomes

$$\beta = \arcsin\left(\frac{X_{T\%}}{100}\right) \quad (\text{E.5})$$

Formula (E.1) can be written

$$e^{j\beta} = \frac{V_L}{V_L^*} \left(1 + \frac{Z_L \times I_L}{V_L} \times e^{j\varphi_L} \right) \quad (\text{E.6})$$

Noting that $\frac{Z_L \times I_L}{V_L} = \frac{3 \times Z_L \times I_L^2}{3 \times V_L \times I_L} = \frac{R'_{T\%}}{100} + j \frac{X'_{T\%}}{100}$ where $R'_{T\%}$ and $X'_{T\%}$ are the relative resistance and reactance of PST expressed as a percentage of rated power, the equation becomes:

$$e^{j\beta} = \frac{V_L}{V_L^*} \left(1 + \frac{R'_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L) - \frac{X'_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + j \left(\frac{R'_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + \frac{X'_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L) \right) \right) \quad (\text{E.7})$$

$$\tan(\beta) = \frac{R'_{T\%} \times \sin(\varphi_L) + X'_{T\%} \times \cos(\varphi_L)}{100 + R'_{T\%} \times \cos(\varphi_L) - X'_{T\%} \times \sin(\varphi_L)} \quad (\text{E.8})$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{R'_{T\%} \times \sin(\varphi_L) + X'_{T\%} \times \cos(\varphi_L)}{100 + R'_{T\%} \times \cos(\varphi_L) - X'_{T\%} \times \sin(\varphi_L)}\right) \quad (\text{E.9})$$

Note that for unity power factor and neglecting $R'_{T\%}$, Formula (E.9) becomes

$$\beta \approx \arctan\left(\frac{X'_{T\%}}{100}\right) \quad (\text{E.10})$$

Annex F (informative)

Additional information on advance-retard switch

F.1 Principle

The advance-retard switch (ARS) allows a change of operation from advance to retard or from retard to advance at zero no-load phase angle tap position without interrupting the load current or de-energizing the PST.

During an ARS operation the current I is commutated against an impedance Z (R and X), which is formed by the cable route from the ARS to the on-load tap-changer and back (commutation loop).

F.2 Classification within the international standardization system

An ARS cannot be seen as an on-load tap-changer (transferring current from one tap of a tap winding to the next by introducing certain impedance into the electrical circuit) or a de-energized tap-changer (can only be operated when the transformer is de-energized).

Also the often used comparison with a change-over selector (designed to carry, but not to make or break, through-current, used in conjunction with the tap selector or selector switch) is not valid.

On-load and de-energized tap-changers are covered by the relevant standards on tap-changers (IEC 60214-1:2014 and IEEE Std C57.131:2012). However, these standards can be used only to some extent for the ARS as explained below.

F.3 Requirements according to IEC 60214-1 and IEEE Std C57.131

The ARS design is close to that of a de-energized tap-changer and, therefore, the requirements for DETCs with respect to the type testing can be used as indicated below.

- a) The test on temperature rise of contacts as described in 7.2.2 of IEC 60214-1:2014 or IEEE Std C57.131:2012 is fully applicable.
- b) The short-circuit current test as described in 7.2.3 of IEC 60214-1:2014 or IEEE Std C57.131:2012 is fully applicable.
- c) Mechanical tests as described in 7.2.4 of IEC 60214-1:2014 or IEEE Std C57.131:2012 are fully applicable (it is recommended to increase the required number of 20 000 mechanical operations for DETCs to 100 000 mechanical operations for ARSs).

NOTE During 30 years of operation, an assumed contact life of 100 000 ARS-operations results in approximately 10 ARS-operations per day (changes from advance to retard or vice versa).

- d) Dielectric tests as described in 7.2.5 of IEC 60214-1:2014 or IEEE Std C57.131:2012 are fully applicable.

In addition to these requirements the contact life of the ARS has to be considered. The contact erosion caused by the commutation depends on the current I that flows through the ARS contacts during the commutation and the impedance Z against which the current I has to be commutated. With increasing I and Z values the contact erosion increases. Therefore, the contact life of the ARS is significantly affected by the transformer design (value of Z) and the load condition (value of I).

Bibliography

- [1] IEC 62032, *Guide for the Application, Specification and Testing of Phase-Shifting Transformers*
 - [2] IEEE Std C57.135™, *IEEE Guide for the Application, Specification and Testing of Phase-Shifting Transformers*
 - [3] IEC 60076-7, *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*
 - [4] IEEE Std C57.150™, *IEEE Guide for the transportation of transformers and reactors rated 10,000 kVA or higher*
 - [5] IEEE Std 693, *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*
 - [6] IEEE Std C57.91™, *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*
 - [7] IEEE Std C57.149™, *IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers*
 - [8] CIGRE-paper A2-207, Paris France 2006, *The Specification and Application of Large Quadrature Boosters to Restrict Post-Fault Power Flows*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	49
1 Domaine d'application	51
2 Références normatives	51
2.1 Références IEC	51
2.2 Références IEEE	51
3 Termes et définitions	52
4 Utilisation des références normatives	55
5 Conditions de service	55
5.1 Généralités	55
5.2 Conditions de service habituelles	55
5.2.1 Schéma de coupure	55
5.2.2 Flux de puissance	56
5.2.3 Fonctionnement avec deux PST ou plus en série ou en parallèle	56
5.2.4 Déséquilibre de phase	56
5.2.5 Protection contre les surtensions	56
6 Régime assigné et exigences générales	56
6.1 Puissance assignée	56
6.2 Charge à d'autres conditions que les conditions assignées	56
6.3 Spécification de la capacité de dévoltage	57
6.4 Modes de refroidissement	57
6.5 Impédance de court-circuit et capacité d'angle de phase en charge	57
6.5.1 Spécification	57
6.5.2 Impédance de court-circuit pour les conceptions asymétriques	57
6.6 Mise à la terre du neutre (mise à la masse)	58
6.7 Tension assignée	58
6.8 Variation de tension et conception asymétrique	58
6.9 Fréquence assignée	58
6.10 Fonctionnement à une tension supérieure à la tension assignée et/ou à une fréquence différente de la fréquence assignée	58
6.11 Tension la plus élevée pour le matériel et niveaux d'essai diélectrique	58
6.12 Prises	58
6.13 Niveau de bruit	59
6.14 Transport	59
7 Construction	59
7.1 Généralités	59
7.2 Connexions remplies de liquide entre cuves	59
7.3 Système d'isolation et de conservation du liquide	59
7.4 Alignement entre cuves	60
7.5 Installations de mise à la terre des circuits magnétiques et de leurs habillages	60
7.6 Connexions d'essai	60
8 Tenue aux courts-circuits	61
9 Symboles des couplages et des déphasages	61
9.1 Généralités	61
9.2 Symboles particuliers pour les PST	61
9.3 Indices horaires	62

9.4	Exemples	62
9.4.1	Transformateurs déphaseurs à partie active unique	62
9.4.2	Transformateurs déphaseurs à deux parties actives	64
9.4.3	Transformateurs incorporant un élément de déphasage	65
10	Plaques signalétiques	67
11	Marquage des bornes et rotation de phase	68
12	Informations à fournir par le fabricant	69
13	Essais	69
13.1	Généralités	69
13.2	Essais individuels de série	69
13.3	Essais de type (conception)	70
13.4	Essais spéciaux	70
13.5	Résistance des enroulements	70
13.6	Mesure du rapport de transformation, mesure de l'angle de phase et contrôle du déphasage	70
13.7	Mesure de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge	71
13.8	Essai d'échauffement	71
13.9	Mesure des pertes et du courant à vide	72
13.10	Détermination du niveau de bruit	72
13.10.1	Généralités	72
13.10.2	Pour les PST comportant un système de refroidissement combiné	72
13.10.3	Pour les PST comportant des systèmes de refroidissement distincts pour l'appareil d'excitation et l'appareil série	72
13.11	Mesure de l'impédance homopolaire	72
13.12	Essais diélectriques	73
13.12.1	Généralités	73
13.12.2	Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)	73
13.12.3	Essai au choc de manœuvre (SI)	74
13.12.4	Essai au choc de foudre	74
13.12.5	Essai aux chocs de foudre appliqués simultanément à plusieurs bornes de ligne (LIMT)	75
13.13	Essai sur les changeurs de prises en charge – Essai de fonctionnement	75
13.14	Essai de recherche de fuite sous pression	76
13.15	Essai de déformation sous vide	76
13.16	Essai de déformation sous pression	76
14	Tolérances	76
14.1	Généralités	76
14.2	Tolérance relative à l'impédance et à l'angle de phase	76
Annexe A (informative)	Liste de vérification des renseignements à fournir lors d'un appel d'offres et d'une commande	78
A.1	Régime assigné et caractéristiques générales	78
A.1.1	Informations habituelles	78
A.1.2	Informations particulières	79
A.2	Fonctionnement en parallèle	81
Annexe B (informative)	Comportement d'un transformateur déphaseur face à des courants de défaut non symétriques	82
Annexe C (informative)	Exemple de spécification de la capacité de dévoltage	84
Annexe D (informative)	Mesures de bruit supplémentaires	85
Annexe E (informative)	Calcul de l'angle de phase en charge	87

Annexe F (informative) Informations supplémentaires sur le commutateur avance/retard.....	91
F.1 Principe	91
F.2 Classification au sein du système de normes international.....	91
F.3 Exigences conformes à l'IEC 60214-1 et à l'IEEE Std C57.131	91
Bibliographie.....	93
Figure 1 – Exemple A: DS0-3/9.....	62
Figure 2 – Exemple B: PS0-3/9	63
Figure 3 – Exemple C: DA0-3	64
Figure 4 – Exemple D: YNyn/III d S0-3/9.....	64
Figure 5 – Exemple E: YNyn+d/III d A0-3/9	65
Figure 6 – Exemple F: YNa0yn/dIII A0-3/9	66
Figure 7 – Exemple G: V A0-2/8.....	67
Figure B.1 – PST équipé d'une protection monophasée contre les défauts et les surtensions	83
Figure E.1 – Diagramme des angles de phase d'un PST en charge où $\alpha_0 > 0$ et $\varphi_L < 0$	87
Figure E.2 – Diagramme des angles de phase d'un PST en charge où $\alpha_0 < 0$ et $\varphi_L < 0$	87
Figure E.3 – Diagramme des angles de phase d'un PST en charge où $\alpha_0 > 0$ et $\varphi_L > 0$	88
Figure E.4 – Diagramme des angles de phase d'un PST en charge où $\alpha_0 < 0$ et $\varphi_L > 0$	88
Tableau C.1 – Capacité du PST exigée en mode dévolteur	84
Tableau D.1 – Combinaisons de mesures du niveau de bruit nécessaires à la représentation de différentes conditions de charge	86

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 57-1202: Transformateurs déphaseurs immergés dans un liquide

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux.

Les normes de l'IEEE sont élaborées par les Sociétés de l'IEEE, ainsi que par les Comités de coordination des normes du Conseil de normalisation de l'IEEE Standards Association (IEEE-SA). Ces normes sont l'aboutissement d'un consensus, soumis à l'approbation de l'Institut national américain de normalisation, qui rassemble des bénévoles représentant divers points de vue et intérêts. Les participants bénévoles ne sont pas nécessairement membres de l'IEEE et leur intervention n'est pas rétribuée. Si l'IEEE administre le déroulement de cette procédure et définit les règles destinées à favoriser l'équité du consensus, l'IEEE lui-même n'évalue pas, ne teste pas et ne vérifie pas l'exactitude de toute information contenue dans ses normes. L'utilisation de normes de l'IEEE est entièrement volontaire. Les documents de l'IEEE sont disponibles à des fins d'utilisation, à condition d'être assortis d'avis importants et de clauses de non-responsabilité (voir <http://standards.ieee.org/IPR/disclaimers.html> pour de plus amples informations).

L'IEC travaille en étroite collaboration avec l'IEEE, selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations. Cette norme internationale double logo a été élaborée conjointement par l'IEC et l'IEEE, conformément aux dispositions de cet accord.

- 2) Les décisions officielles de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études. Une fois le consensus établi entre les Sociétés de l'IEEE et les Comités de coordination des normes, les décisions officielles de l'IEEE relatives aux questions techniques sont déterminées en fonction du vote exprimé par un groupe à la composition équilibrée, composé de parties intéressées qui manifestent leur intérêt pour la révision des normes proposées. L'approbation finale de la norme de l'IEEE est soumise au Conseil de normalisation de l'IEEE Standards Association (IEEE-SA).
- 3) Les Publications IEC/IEEE se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC/Sociétés de l'IEEE. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin de s'assurer de l'exactitude du contenu technique des Publications IEC/IEEE; l'IEC ou l'IEEE ne peuvent pas être tenus responsables 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC (y compris les Publications IEC/IEEE) dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications IEC/IEEE et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC et l'IEEE eux-mêmes ne fournissent 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 l'IEC. L'IEC et l'IEEE ne sont responsables 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 l'IEC ou à l'IEEE, 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 l'IEC, ou les bénévoles des Sociétés de l'IEEE et des Comités de coordination des normes du Conseil de normalisation de l'IEEE Standards Association (IEEE-SA), 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 IEC/IEEE ou toute autre publication de l'IEC ou de l'IEEE, 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 fait que la mise en application de cette Publication IEC/IEEE peut requérir l'utilisation de matériels protégés par des droits de brevet. En publiant cette norme, aucun parti n'est pris concernant l'existence ou la validité de droits de brevet y afférents. Ni l'IEC ni l'IEEE ne peuvent être tenus d'identifier les revendications de brevet essentielles pour lesquelles une autorisation peut s'avérer nécessaire, d'effectuer des recherches sur la validité juridique ou l'étendue des revendications des brevets, ou de déterminer le caractère raisonnable ou non discriminatoire des termes ou conditions d'autorisation énoncés dans le cadre d'un

Certificat d'assurance, lorsque la demande d'un tel certificat a été formulée, ou contenus dans tout accord d'autorisation. Les utilisateurs de cette norme sont expressément informés du fait que la détermination de la validité de tous droits de propriété industrielle, ainsi que les risques qu'impliquent la violation de ces droits, relèvent entièrement de leur seule responsabilité.

La Norme internationale IEC/IEEE 60076-57-1202 a été établie par le comité d'études 14 de l'IEC: Transformateurs de puissance, en coopération avec le comité Transformateurs de la "Power & Energy Society" de l'IEEE¹, selon l'accord double logo IEC/IEEE.

La présente publication constitue une norme double logo IEC/IEEE.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants de l'IEC:

FDIS	Rapport de vote
14/892/FDIS	14/902/RVD

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

Les Normes internationales sont rédigées selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité d'études de l'IEC et le comité d'études de l'IEEE ont décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC 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.

¹ Une liste des participants IEEE est disponible à l'adresse suivante:
http://standards.ieee.org/downloads/60076/60076-57-1202-2017/60076-57-1202-2017_wg-participants.pdf

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 57-1202: Transformateurs déphaseurs immergés dans un liquide

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60076 couvre les exigences relatives à tous les types de transformateurs déphaseurs. Le domaine d'application exclut les transformateurs présentant un déphasage non régulé.

Le présent document se limite aux questions relatives aux transformateurs déphaseurs et ne couvre pas les exigences générales pour les transformateurs de puissance, couvertes dans des normes existantes de la série IEC 60076 ou dans les normes IEEE Std C57.12.00™ et IEEE Std C57.12.10™.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

2.1 Références IEC

IEC 60050-421, *Vocabulaire Electrotechnique International – Chapitre 421, Transformateurs de puissance et bobines d'inductance* (disponible sous: www.electropedia.org)

IEC 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

IEC 60076-2, *Transformateurs de puissance – Partie 2: Echauffement des transformateurs immergés dans le liquide*

IEC 60076-3, *Transformateurs de puissance – Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

IEC 60076-5, *Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit*

IEC 60076-10, *Transformateurs de puissance – Partie 10: Détermination des niveaux de bruit*

IEC 60076-18, *Transformateurs de puissance – Partie 18: Mesure de la réponse en fréquence*

ISO 2178, *Revêtements métalliques non magnétiques sur métal de base magnétique – Mesurage de l'épaisseur du revêtement – Méthode magnétique*

ISO 2409, *Peintures et vernis – Essai de quadrillage*

2.2 Références IEEE

IEEE Std C57.12.00™, *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers* (disponible en anglais seulement)

IEEE Std C57.12.10™, *IEEE Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers* (disponible en anglais seulement)

IEEE Std C57.12.70™, *IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers* (disponible en anglais seulement)

IEEE Std C57.12.80™, *IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers* (disponible en anglais seulement)

IEEE Std C57.12.90™, *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions

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

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60050-421 et de l'IEC 60076-1 s'appliquent aux transformateurs déphaseurs spécifiés par l'IEC. Pour les transformateurs déphaseurs spécifiés par l'IEEE, les termes et définitions de l'IEEE Std C57.12.80 s'appliquent. Pour tous les transformateurs déphaseurs, les termes et définitions suivants s'appliquent et prévalent.

3.1

transformateur déphaseur

PST

transformateur (ou combinaison de transformateurs destinés à fonctionner ensemble) comportant deux ensembles de bornes de ligne (S et L), qui est capable de faire varier l'angle de déphasage de la tension entre les bornes S et les bornes L

Note 1 à l'article: La tension assignée des bornes S et des bornes L peut être identique ou différente. Le PST peut également être capable de faire varier la tension en phase.

Note 2 à l'article: L'abréviation "PST" est dérivée du terme anglais développé correspondant "phase-shifting transformer".

3.2

borne S

borne utilisée comme point de référence fixe lors de la mesure de l'angle de phase de la tension d'un transformateur déphaseur

3.3

borne L

borne utilisée pour la mesure de l'angle de phase de la tension lors d'une comparaison à la borne S du transformateur déphaseur

Note 1 à l'article: Les références S et L aux bornes n'impliquent pas une direction particulière du flux de puissance.

3.4

position de prise à déphasage nul

position de prise à laquelle l'angle de phase de la tension à vide est égal à zéro (nul)

3.5

puissance assignée

puissance de sortie à la tension et à la fréquence assignées, pouvant être fournie à la borne L de manière continue sans dépasser l'échauffement spécifié

3.6

enroulement d'excitation

enroulement d'un transformateur déphaseur (PST) qui puise l'énergie à la source pour alimenter le PST

3.7

enroulement excité

enroulement de l'appareil série qui est excité par l'enroulement excitant

3.8

transformateur déphaseur en quadrature

transformateur déphaseur à conception asymétrique où l'enroulement d'excitation est connecté à la borne S

3.9

conception symétrique

transformateur déphaseur dans lequel le rapport de transformation à vide entre les bornes S et L est constant

3.10

conception asymétrique

transformateur déphaseur dans lequel le rapport de transformation à vide entre les bornes S et L varie selon la position du réglage de l'angle de phase

3.11

PST à une seule partie active

transformateur déphaseur dont tous les enroulements sont montés sur un seul circuit magnétique

3.12

PST à deux parties actives

transformateur déphaseur composé d'un appareil série et d'un appareil d'excitation, situés sur deux circuits magnétiques distincts

3.13

prise extrême

prise correspondant à la valeur absolue maximale de l'angle de phase à vide dans la direction d'avance ou de retard

3.14

angle de phase

angle de phase électrique, exprimé en degrés entre les bornes S et L avec un signe tel que l'angle est positif lorsque la tension à la borne L est en avance sur la tension à la borne S

3.15

mode survoltage

mode de fonctionnement dans lequel le PST est en cours d'augmentation du flux de puissance dans le circuit

3.16

mode dévolteur

mode de fonctionnement dans lequel le PST est en cours de réduction ou d'inversion du flux de puissance dans le circuit

Note 1 à l'article: Par exemple, en mode retard, l'angle de déphasage en charge entre les bornes S et L est plus négatif que l'angle de déphasage à vide sur la même prise, car l'angle de déphasage à vide et la variation d'angle de déphasage causée par la charge sont tous deux négatifs (voir Annexe E).

3.17

avance

mode de fonctionnement dans lequel la tension à vide de la borne L est en avance sur la tension à vide de la borne S, donnant un angle de phase à vide positif

3.18

retard

mode de fonctionnement dans lequel la tension à vide de la borne L est en retard sur la tension à vide de la borne S, donnant un angle de phase à vide négatif

3.19

tension assignée

tension entre phases à vide sur la prise à déphasage nul à laquelle se rapportent les caractéristiques de fonctionnement et de performance

3.20

tension de prise de la borne S

<pour les conceptions asymétriques> tension entre phases à vide basée sur le rapport de transformation apparaissant à la borne S lorsque la tension assignée est appliquée à la borne L sur une prise particulière

Note 1 à l'article: Pour une conception asymétrique, la tension aux prises autres qu'à la position de prise à déphasage nul sera inférieure à la borne S par rapport à la borne L. Cette définition est utilisée de sorte que le courant assigné de l'appareil série soit constant quelle que soit la position de prise, afin d'être compatible avec le régime assigné des circuits du système d'alimentation raccordés.

3.21

enroulement série

enroulement connecté entre les bornes S et L

Note 1 à l'article: Le terme "enroulement série" se rapporte à tout enroulement ou ensemble d'enroulements pouvant être connecté entre les bornes S et L. Par exemple, ce terme désigne l'enroulement à prises d'un transformateur PST à une seule partie active lorsque cet enroulement est connecté entre les bornes S et L. Dans le cas d'un PST combiné à un transformateur ou à un autotransformateur, l'enroulement série du PST peut être connecté à la borne S ou L de manière indirecte par l'intermédiaire de l'enroulement série du transformateur ou de l'autotransformateur (voir exemple en 9.4.3.1).

3.22

appareil série

circuit magnétique et enroulements d'un PST à deux parties actives contenant l'enroulement série

3.23

appareil d'excitation

circuit magnétique et enroulements d'un PST à deux parties actives assurant l'excitation de l'appareil série

3.24

enroulement excitant

enroulement d'un PST à une partie active ou de l'appareil d'excitation d'un PST à deux parties actives, qui fournit la tension nécessaire pour faire varier l'angle de phase

3.25

enroulement à prises

enroulement où les prises sont modifiées pour faire varier l'angle de phase

Note 1 à l'article: L'enroulement à prises est également appelé "enroulement de réglage" dans certains pays.

3.26

valeur de conception

valeur escomptée résultant du nombre de spires prévu à la conception, dans le cas du rapport de transformation et de l'angle de phase à vide, ou calculée à partir des données de conception dans le cas de l'impédance, du courant à vide ou d'autres paramètres

3.27

commutateur avance/retard

ARS

commutateur distinct de tout présélecteur associé au changeur de prises en charge, qui permet de passer du mode de fonctionnement avance au mode de fonctionnement retard, et inversement, à la position de prise de l'angle de phase nul à vide, sans interrompre le courant de charge ni couper l'alimentation du PST

Note 1 à l'article: Voir Annexe F.

Note 2 à l'article: L'abréviation "ARS" est dérivée du terme anglais développé correspondant "*advance-retard switch*".

4 Utilisation des références normatives

La présente norme peut être utilisée en conjonction avec les références normatives IEC ou IEEE, mais les références ne doivent pas être combinées. L'acheteur doit indiquer dans l'appel d'offres et la commande quelles références normatives doivent être utilisées. Si le choix des références normatives n'est pas spécifié, les normes IEC doivent être utilisées, sauf pour les PST destinés à être installés en Amérique du Nord où les normes IEEE doivent être utilisées.

5 Conditions de service

5.1 Généralités

Sauf spécification contraire par l'acheteur, les conditions de service normales doivent s'appliquer, conformément à l'IEC 60076-1 ou à l'IEEE Std C57.12.00.

5.2 Conditions de service habituelles

5.2.1 Schéma de coupure

Sauf spécification contraire, le PST doit être conçu pour être utilisé avec un dispositif de shuntage en charge connecté aux bornes L et S respectives, qui ne sera fermé en service que lorsque le PST se trouve à la position de prise à déphasage nul pendant le temps nécessaire à la réalisation d'une séquence de coupure afin de mettre le PST en ou hors service.

Dans le cas où le PST ne sera jamais utilisé avec les bornes S et L connectées (absence de dispositif de shuntage en charge), cela peut être spécifié et l'essai au choc de foudre aux deux extrémités peut être omis (voir 13.12.5).

Si le PST doit être utilisé dans la condition où un dispositif de shuntage en charge est fermé en service lorsque le PST est alimenté par les bornes S et L plus longtemps que la durée de la coupure, cela doit être spécifié.

Sauf spécification contraire, le PST ne doit pas être mis sous tension ni en fonctionnement lorsque les bornes S et L sont shuntées, à moins qu'il ne se trouve sur la position de prise à déphasage nul. Si le PST doit pouvoir être shunté sur une position autre que la position de prise à déphasage nul, l'acheteur doit l'indiquer clairement dans l'appel d'offres.

Le PST doit pouvoir être alimenté par les bornes S ou L sur n'importe quelle position de prise.

5.2.2 Flux de puissance

Sauf spécification contraire, le PST doit être capable de transférer la puissance assignée dans l'une ou l'autre direction, sous réserve que l'angle de phase entre les bornes S et L ne dépasse pas l'angle de phase à vide maximal.

NOTE Lorsque le PST est en cours de réduction ou d'inversion du flux de puissance dans le circuit, le déphasage excède le déphasage à vide et, sauf spécification contraire, le transfert de puissance ne sera pas assuré sur les prises extrêmes. Si ce fonctionnement est néanmoins exigé, voir 6.3.

5.2.3 Fonctionnement avec deux PST ou plus en série ou en parallèle

Sauf spécification contraire, l'hypothèse suivante peut être retenue: le PST ne sera pas monté en série ou en parallèle avec un autre PST connecté au même circuit. Si le fonctionnement en série ou en parallèle est exigé, l'acheteur doit l'indiquer dans l'appel d'offres et le contrat, ainsi que les détails du PST qui sera monté en série ou en parallèle.

NOTE Pour un fonctionnement en parallèle des PST, il convient de tenir compte du fait que, si le PST présente une faible impédance à la position ou à proximité de la position de prise à déphasage nul à vide, un court-circuit ou un courant de circulation extrêmement élevé peut se produire durant les opérations de changement de prise si aucune réactance additionnelle n'est connectée au circuit. Voir l'IEC 62032 [1] ou l'IEEE Std C57.135 [2].²

5.2.4 Déséquilibre de phase

Les PST sont destinés à être utilisés dans un système où les tensions et les courants dans les trois phases sont naturellement équilibrés dans des conditions normales (voir l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.00 pour connaître les niveaux normaux d'équilibre de tension). Si le PST doit fonctionner dans un système présentant un déséquilibre de courant de plus de 5 %, le déséquilibre à prendre en compte doit être indiqué par l'acheteur dans l'appel d'offres et la commande.

5.2.5 Protection contre les surtensions

Le PST doit être équipé d'une protection adéquate contre les surtensions sur les bornes S et L, quelles que soient les caractéristiques du système connecté. Sauf spécification contraire, cela relève de la responsabilité de l'acheteur.

NOTE Une condition de court-circuit de défaut traversant sur une phase peut produire sur les autres phases des tensions induites supérieures aux niveaux de tension d'essai (voir Annexe B).

6 Régime assigné et exigences générales

6.1 Puissance assignée

La puissance assignée doit être spécifiée par l'acheteur et doit s'appliquer à la prise à déphasage nul ainsi qu'à n'importe quelle prise en mode survoltage, mais voir 6.3 pour connaître la puissance assignée en mode dévolteur.

6.2 Charge à d'autres conditions que les conditions assignées

Toute exigence relative à la charge au-delà de la puissance assignée ou à d'autres conditions que les conditions assignées doit être spécifiée par l'acheteur. Voir l'IEC 60076-7 [3] ou l'IEEE Std C57.12.00, and l'IEEE Std C57.91 [6]. Voir également 6.3.

NOTE Les PST présentent des limitations de charge découlant de considérations de thermique, de l'induction magnétique et de changeur de prises.

² Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

6.3 Spécification de la capacité de dévoltage

Si le fonctionnement du PST en mode dévolteur est exigé, la puissance minimale exigée à chaque position de prise dans les conditions de charge en mode dévolteur (y compris les surcharges éventuelles) doit être spécifiée. Sauf spécification contraire, une hypothèse doit être formulée pour le facteur de puissance égal à 1, la fréquence assignée et la tension assignée à la borne L lors du calcul de la capacité du PST. Un exemple d'une telle spécification est donné à l'Annexe C.

Si aucune puissance minimale requise sur toute position en mode dévolteur n'est spécifiée alors comme précisé au 5.2.2 la capacité de charge du PST en mode dévolteur ne sera pas assurée sur les positions extrêmes. Une certaine capacité de charge (en dessous de la puissance nominale) pourra être mise à disposition sur ces positions en fonction de l'angle de déphasage à vide et de l'impédance sur la position mais cette capacité sera déterminée par le constructeur.

La valeur d'impédance utilisée pour l'évaluation de la capacité de charge en mode dévolteur doit devenir la valeur maximale garantie (sans tolérance) sur la position de prise particulière considérée. Cette valeur peut être inférieure à celle de l'impédance maximale, mais doit être supérieure à celle de l'impédance minimale spécifiée par l'acheteur.

6.4 Modes de refroidissement

Les exigences relatives aux modes de refroidissement et à la puissance minimale dans les différents modes de refroidissement (le cas échéant) doivent être indiquées dans l'appel d'offres et la commande. Voir l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.00.

6.5 Impédance de court-circuit et capacité d'angle de phase en charge

6.5.1 Spécification

L'acheteur doit spécifier la capacité d'angle de phase en charge du PST de l'une des manières suivantes:

- l'impédance maximale et minimale aux prises extrêmes et l'angle de phase à vide absolu minimal aux prises extrêmes;
- l'angle de phase de survoltage et/ou de dévoltage absolu minimal à la puissance assignée. Le fabricant devra alors déterminer l'angle de phase à vide et l'impédance nécessaires pour satisfaire à cette exigence. L'acheteur doit aussi spécifier soit une valeur d'impédance soit une valeur de chute de tension maximale lorsque requis.

Sauf spécification contraire, une hypothèse doit être formulée pour le facteur de puissance égal à 1, la fréquence assignée et la tension assignée à la borne L lors du calcul de la capacité du PST.

NOTE Dans le cas de certaines conceptions asymétriques présentant à la fois une variation de la tension et de l'angle de phase, il peut s'avérer plus commode, après accord, de baser la capacité sur la borne S de manière à éviter toute interaction apparente entre la position de prise de l'angle de phase et la plage de variation de tension.

S'il existe une exigence d'impédance minimale à la position de prise à déphasage nul, cela doit être spécifié par l'acheteur. Sinon, l'impédance minimale à la prise à déphasage nul reste à la discrétion du fabricant.

Si l'acheteur exige des limites particulières en ce qui concerne l'impédance homopolaire (p. ex: pour éviter des conditions de résonance en série), cela doit être indiqué dans l'appel d'offres et la commande.

6.5.2 Impédance de court-circuit pour les conceptions asymétriques

Dans le cas d'une conception asymétrique, le rapport de transformation entre les bornes S et L et par conséquent la tension de prise de la borne S varieront avec la position de prise.

Sauf accord contraire, l'impédance à chaque prise doit être basée sur la tension et la puissance assignées à la borne L.

6.6 Mise à la terre du neutre (mise à la masse)

L'acheteur doit spécifier le mode de mise à la terre du neutre pour chaque borne neutre; qu'elle soit directement connectée à la terre, mise à la terre par le biais d'une impédance ou non mise à la terre.

Tout circuit intermédiaire qui ne disposerait pas d'une connexion galvanique à la borne S, L ou aux bornes neutres doit être connecté à la terre. Sauf spécification contraire, les circuits intermédiaires doivent être connectés à la terre de manière externe pour faciliter les essais sur site. Sauf accord contraire, la connexion à la terre de la cuve doit être fournie par le fabricant.

6.7 Tension assignée

L'acheteur doit spécifier la tension assignée pour les bornes S et L.

6.8 Variation de tension et conception asymétrique

Sauf spécification contraire, le PST doit être conçu de telle sorte que le rapport de transformation entre les bornes S et L ne varie pas avec la position de prise. Si une conception asymétrique peut être acceptée par l'acheteur, il convient d'en faire mention dans l'appel d'offres en mentionnant les limites éventuelles concernant la variation de tension à la borne L.

Toute exigence relative à la variation de tension distincte de ou combinée à la variation de l'angle de phase doit être spécifiée.

6.9 Fréquence assignée

La fréquence assignée doit être spécifiée par l'acheteur comme étant la fréquence normale non perturbée du réseau.

6.10 Fonctionnement à une tension supérieure à la tension assignée et/ou à une fréquence différente de la fréquence assignée

Si le PST doit fonctionner à un rapport assigné V/Hz dépassant les limites données dans l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.00, cela doit être spécifié par l'acheteur.

6.11 Tension la plus élevée pour le matériel et niveaux d'essai diélectrique

L'acheteur doit spécifier la tension la plus élevée pour le matériel (tension système maximale) ainsi que les niveaux d'essai diélectrique. Voir l'IEC 60076-1, l'IEC 60076-3 ou l'IEEE Std C57.12.00.

6.12 Prises

Le PST doit être équipé d'un changeur de prises en charge pour faire varier l'angle de phase, à moins qu'un changeur de prises hors tension ou tout autre dispositif de variation de l'angle de phase ne soit spécifié. L'acheteur doit spécifier toute exigence particulière relative aux prises, par exemple un échelon d'angle de phase à vide maximal, un nombre particulier de positions de prise (pour le fonctionnement en parallèle), un délai maximal pour l'opération de changement de prises entre la prise à déphasage nul et la prise extrême, ainsi que le nombre de changements de prises exigé dans une séquence continue. Sinon, ces paramètres peuvent être déterminés par le fabricant.

6.13 Niveau de bruit

Lorsque l'acheteur a une exigence particulière en ce qui concerne le ou les niveaux de bruit maximaux garantis en condition de fonctionnement à vide ou dans les conditions de fonctionnement à vide et en charge, cela doit être précisé dans l'appel d'offres et il convient de l'exprimer préférentiellement en termes de niveau de puissance acoustique. Il est reconnu que les niveaux sonores ne peuvent pas être mesurés directement en condition de fonctionnement en charge en usine, et toute garantie devra se fonder sur une combinaison de mesures du bruit à vide et en charge (voir Annexe D).

Sauf spécification contraire, le niveau de bruit maximal garanti doit s'appliquer au PST complet soit sur la prise d'avance extrême (ou sur la prise de retard extrême en l'absence de fonction d'avance) soit sur la prise de déphasage nul, selon le plus élevé des deux, et à vide à la tension assignée de la borne S avec l'équipement de refroidissement en fonctionnement.

6.14 Transport

Si des limites de dimensions ou de masse s'appliquent pour le transport, cela doit être indiqué dans l'appel d'offres.

Le PST doit être conçu et fabriqué pour résister à une accélération constante d'au moins 1g dans toutes les directions (en plus de l'accélération verticale due à la pesanteur), sans aucun dommage. Si des limites supérieures sont exigées, cela doit être spécifié par l'acheteur à moins que le transport ne relève de la responsabilité du fabricant.

NOTE D'autres informations relatives au transport peuvent être trouvées dans le document IEEE Std C57.150 [3].

7 Construction

7.1 Généralités

En général, les exigences de construction relatives aux PST doivent satisfaire aux exigences concernant les transformateurs de puissance couvertes dans l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.00 et dans d'autres normes ANSI/IEEE ou IEC applicables, compte tenu des exceptions ou additions présentées dans les paragraphes suivants.

7.2 Connexions remplies de liquide entre cuves

Les connexions remplies de liquide entre cuves dans les conceptions en plusieurs cuves doivent satisfaire aux exigences de pression et de vide de l'IEC 60076-1 ou de l'IEEE Std C57.12.00 dans la condition d'équipement entièrement assemblé.

Si la conception comporte une barrière entre une cuve et une connexion remplie de liquide, les restrictions relatives à la pression différentielle que peut supporter la barrière doivent être clairement indiquées par le fabricant sur la plaque signalétique.

NOTE Il est normalement attendu qu'une barrière ne supportera le vide d'un côté que lorsque la pression de l'autre côté est limitée à la pression atmosphérique (l'autre côté n'est pas plein de liquide en même temps).

Les connexions entre les différentes cuves doivent supporter la dilatation et la contraction thermiques. Sauf accord contraire entre le fabricant et l'acheteur, les connexions doivent être conçues à des fins d'installation ou de retrait sans nécessiter le levage ou le déplacement des cuves du transformateur.

7.3 Système d'isolation et de conservation du liquide

Les systèmes d'isolation et de conservation du liquide doivent être conformes à l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.10 avec l'ajout suivant.

Les connexions remplies de liquide entre cuves peuvent être soit scellées par des barrières d'isolation entre chaque cuve, soit exposées au liquide isolant contenu dans l'une des cuves ou les deux cuves.

Si des barrières d'isolation isolent le liquide, dans les connexions électriques remplies de liquide entre cuves, du liquide contenu dans les deux cuves, un système de conservation (réservoir d'expansion) distinct pour les connexions ou des canalisations d'équilibrage de pression doivent être fournis pour permettre la dilatation dans l'une des cuves principales ou l'un des dispositifs de conservation principaux de cuve.

Si l'acheteur a une exigence particulière pour pouvoir différencier les défauts dans les différentes cuves et les différentes connexions ou pour pouvoir purger le liquide dans les connexions ou les cuves séparément, cela doit être spécifié.

NOTE L'utilisation d'une analyse d'huile et de gaz pour isoler les problèmes sera compliquée à moins que le liquide dans les connexions ne soit séparé des deux cuves principales.

Pour chaque connexion remplie de liquide isolée, l'enceinte de la connexion doit être équipée de dispositifs qui accomplissent les fonctions suivantes:

- relais d'accumulation de gaz (pour les appareils équipés d'un système de conservation);
- relais/dispositif limiteur de pression;
- robinets de remplissage et de vidange de liquide;
- relais de pression soudaine ou relais de mouvement de liquide;
- indicateur de niveau du liquide.

7.4 Alignement entre cuves

Dans le cas de connexions entre plusieurs cuves, le fabricant du PST doit prendre des dispositions pour tenir compte des différentiels d'alignements dus par exemple aux tolérances d'installation, aux tolérances sur les fondations, à l'application du vide, à la dilatation thermique et le cas échéant à une activité sismique.

Dans le cas à plusieurs cuves, les contraintes d'alignement entre les fondations et leurs tolérances doivent être spécifiées en accord entre l'acheteur et le fabricant.

Si l'ancrage des cuves aux fondations exige des dispositions particulières pour satisfaire aux exigences d'ordre sismique ou autre, ces dispositions doivent être définies par le fabricant et convenues entre l'acheteur et le fabricant.

NOTE Les informations de conception relatives aux conditions sismiques peuvent être trouvées dans le document IEEE Std 693 [5].

7.5 Installations de mise à la terre des circuits magnétiques et de leurs habillages

La connexion à la terre de chaque circuit magnétique et de ses habillages (en cas d'isolation délibérée vis-à-vis de la cuve) du PST doit être amenée à l'extérieur de la cuve par l'intermédiaire d'une traversée adéquate de sorte que les résistances circuit-habillage, circuit-terre et habillage-terre puissent être mesurées sans vider le liquide de la cuve ou des cuves.

7.6 Connexions d'essai

Lorsque des connexions et des traversées provisoires sont exigées pour réaliser certains essais, rien qui pourrait affecter la performance diélectrique du PST ne peut être modifié ou introduit à l'intérieur du PST après l'essai diélectrique. Les connexions et traversées provisoires ne doivent pas affecter physiquement les tensions et courants qui surviendraient. Par exemple, une traversée provisoire utilisée pour un essai de tension induite ne doit pas affecter la distribution de la tension de choc de foudre.

Sauf accord contraire, les traversées exigées aux seules fins de l'essai doivent être retirées lorsque le système est en service. Les conducteurs internes exigés uniquement à des fins de connexion à une traversée d'essai peuvent être maintenus ou retirés à la discrétion du fabricant ou selon accord, sous réserve que les autres exigences de 7.6 soient satisfaites.

Toute exigence relative aux connexions d'essai à réaliser pour les essais sur site doit être spécifiée par l'acheteur.

8 Tenue aux courts-circuits

Le PST doit être capable de résister aux contraintes mécaniques et thermiques produites par un court-circuit externe. Voir l'IEC 60076-5 ou l'IEEE Std C57.12.00.

Les enroulements série doivent être capables de résister sur toutes les positions de prise à l'augmentation de tension qui sera imposée le long des enroulements lorsque les bornes S ou L sont au potentiel de la terre en raison de la condition de défaut externe. Aucune résistance non linéaire (parafoudre) incorporée à la conception ne doit devenir conductrice dans ces conditions.

9 Symboles des couplages et des déphasages

9.1 Généralités

Les schémas possibles de connexions des transformateurs déphaseurs sont nombreux et tous triphasés.

En règle générale, les principes des transformateurs triphasés doivent être suivis des symboles complémentaires de l'Article 9 lorsque cela est nécessaire.

9.2 Symboles particuliers pour les PST

Aux fins de la présente norme, les transformateurs déphaseurs sont caractérisés en fonction du nombre de parties actives qu'ils comportent (un ou deux), ainsi que les symboles de déphasage des enroulements:

- D pour une connexion en triangle (voir l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.70), y compris les PST à partie active unique dans lesquels l'enroulement à prises se trouve "à l'extérieur" du triangle;
- P pour une connexion en polygone, y compris les PST à partie active unique dans lesquels l'enroulement à prises se trouve "à l'intérieur" du "triangle" dans le cadre du polygone;
- Y pour une connexion étoile définie dans l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.70;
- Z pour une connexion en zigzag définie dans l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.70;
- V pour une connexion dans laquelle l'enroulement de phase comporte deux sections, chacune résidant sur une colonne différente du circuit magnétique;
- K pour une connexion où l'enroulement de phase comporte trois sections, chacune résidant sur une colonne différente du circuit magnétique.

Pour un PST à deux parties actives, les symboles vectoriels de l'appareil d'excitation sont donnés en premier et suivis d'une barre oblique / puis du symbole vectoriel de l'appareil série.

Le groupe vectoriel est suivi d'un espace puis de la lettre S (conception symétrique) ou A (conception asymétrique) selon que les bornes S et L possèdent des tensions à vide identiques ou différentes sur la même prise extrême.

L'existence d'un enroulement d'essai, de stabilisation ou supplémentaire, non équipé de bornes pour une charge extérieure, est indiquée, après les symboles des enroulements susceptibles d'être chargés, par le symbole '+y' ou '+d', conformément à son symbole de couplage.

NOTE Ces désignations ne sont pas toutes conformes à l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.70 pour élaborer un seul système de désignation pour les PST.

9.3 Indices horaires

La lettre correspondant au couplage d'enroulement est immédiatement suivie du déphasage en "indice horaire" (voir IEC 60076-1).

L'indice horaire des transformateurs déphaseurs est donné en deux parties. La première est déterminée pour les transformateurs triphasés, comme la relation de phase entre les bornes S et L à la prise d'angle de phase nul (généralement zéro). La seconde, séparée par un "-", est l'indice horaire de la tension injectée relativement à la borne S à la prise d'angle de phase nul prise en référence. Si les fonctions d'avance et de retard sont disponibles, l'indice horaire d'injection en retard est donné en premier, suivi par un "/", puis par l'indice horaire d'injection en avance.

La tension injectée représente la partie variable de la tension entre les bornes S et L prévue pour provoquer un déphasage.

9.4 Exemples

9.4.1 Transformateurs déphaseurs à partie active unique

9.4.1.1 Exemple A: D S0-3/9

L'exemple A est un PST à conception symétrique à partie active unique comportant un enroulement d'excitation connecté en triangle et dans lequel l'enroulement à prises est à l'extérieur du triangle. Il correspond au symbole de couplage et de déphasage D S0-3/9. Le schéma de connexion est représenté à la Figure 1.

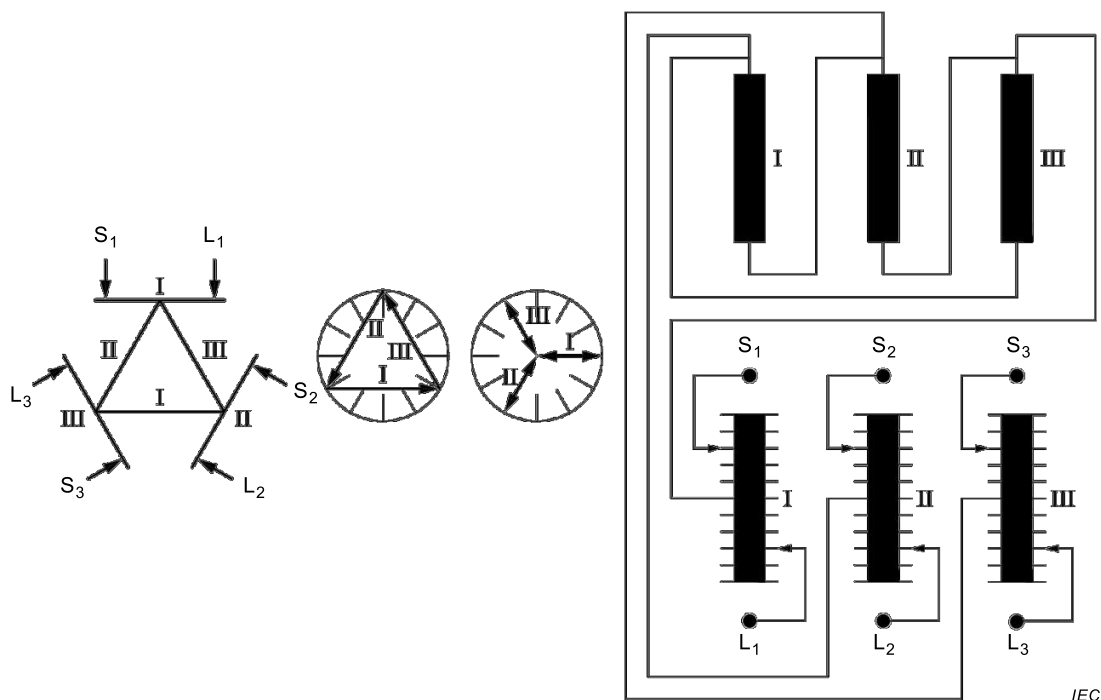


Figure 1 – Exemple A: D S0-3/9

9.4.1.2 Exemple B: P S0-3/9

L'exemple B est un PST à conception symétrique à partie active unique dans lequel l'enroulement à prises est à l'intérieur du triangle (connexion en polygone). Il correspond au symbole de couplage et de déphasage P S0-3/9. Le schéma de connexion est représenté à la Figure 2.

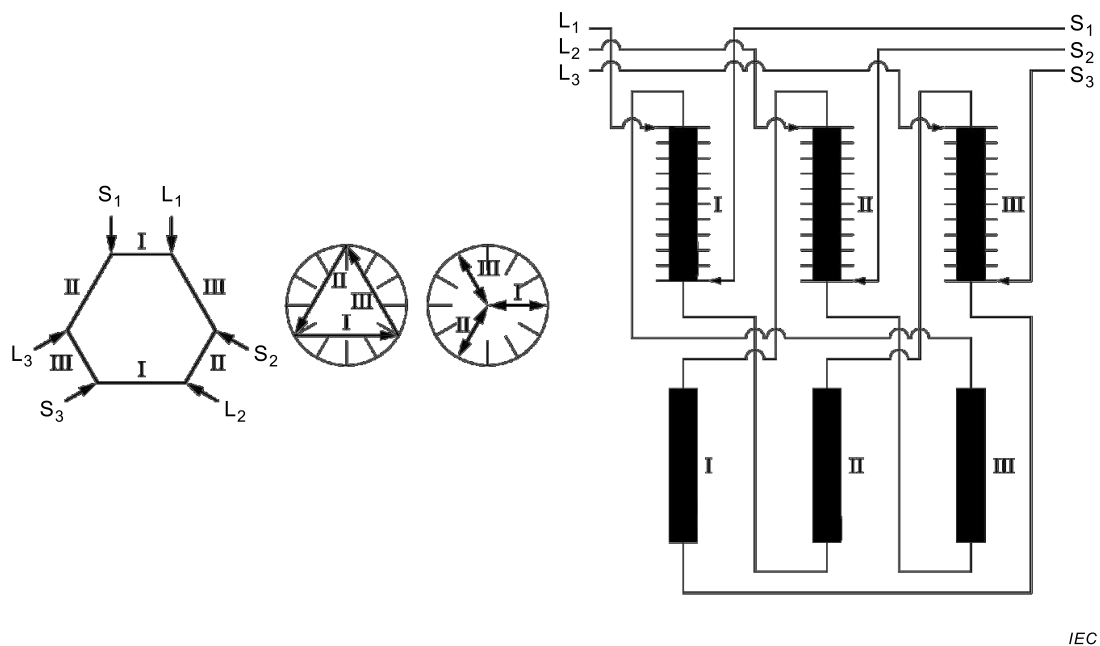


Figure 2 – Exemple B: P S0-3/9

9.4.1.3 Exemple C: D A0-3

L'exemple C est un PST à conception asymétrique à partie active unique comportant un enroulement d'excitation connecté en triangle et où l'enroulement à prises est à l'extérieur du triangle. Il correspond au symbole de couplage et de déphasage D A0-3. Le schéma de connexion est représenté à la Figure 3.

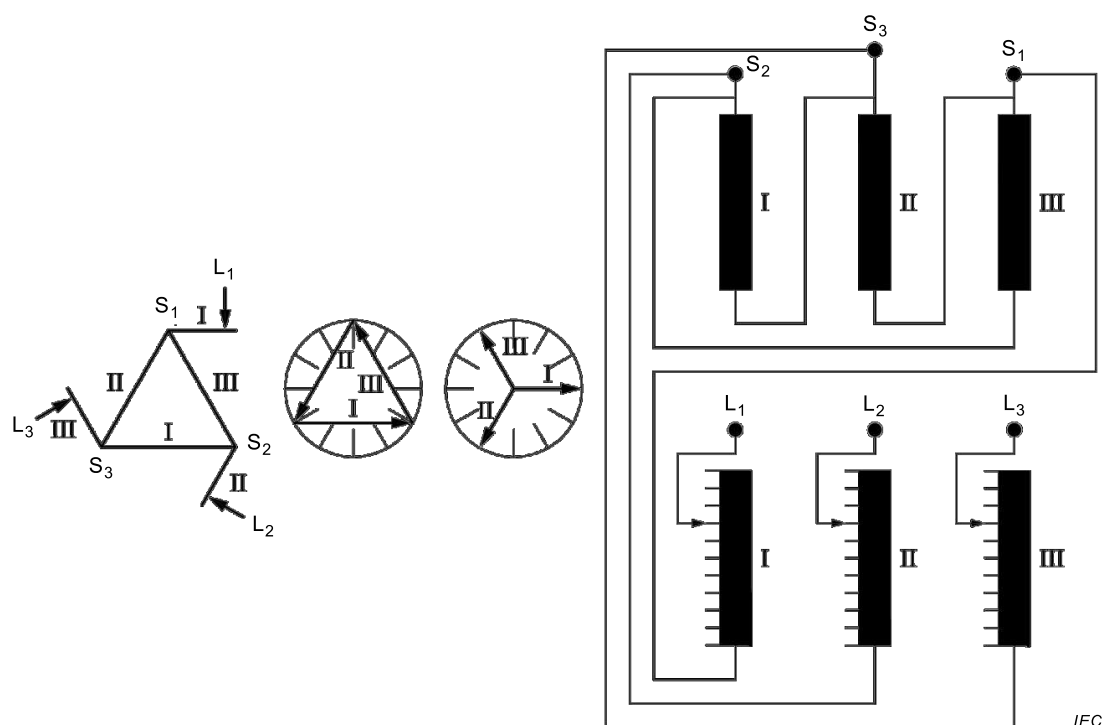


Figure 3 – Exemple C: D A0-3

9.4.2 Transformateurs déphaseurs à deux parties actives

9.4.2.1 Exemple D: YNyn/IIIId S0-3/9

L'exemple D est un PST à conception symétrique à deux parties actives comportant un enroulement d'excitation connecté en étoile et un enroulement à prises connecté en étoile sur le premier circuit magnétique, ainsi qu'un enroulement excité connecté en triangle et des enroulements série sur le second circuit magnétique. Il correspond au symbole de couplage et de déphasage YNyn/IIIId S0-3/9. Le schéma de connexion est représenté à la Figure 4.

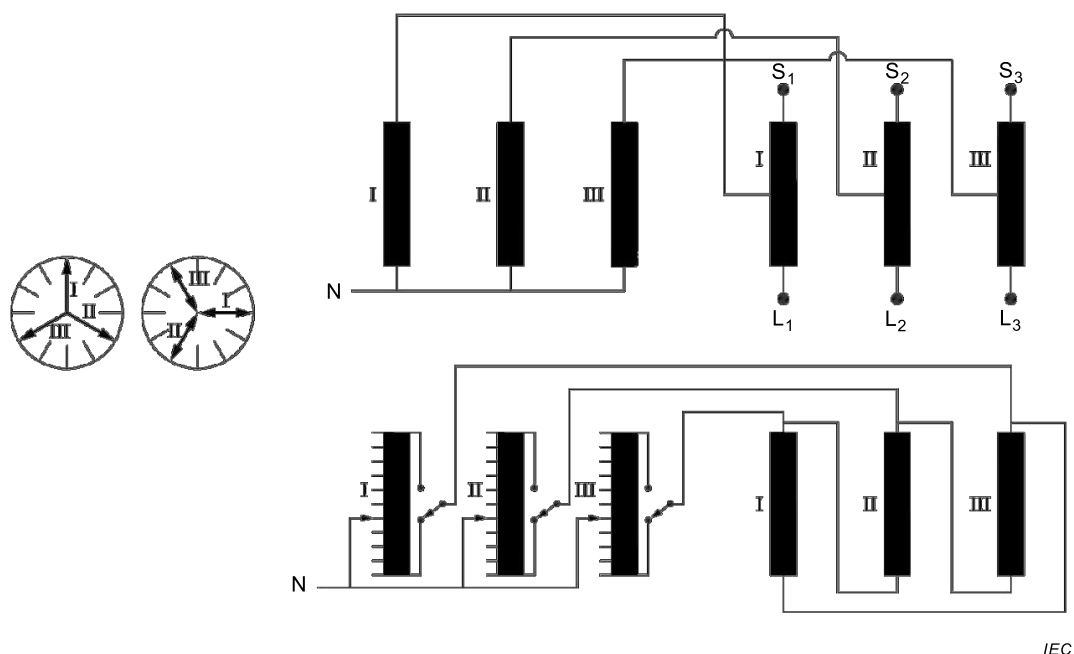


Figure 4 – Exemple D: YNyn/IIIId S0-3/9

9.4.2.2 Exemple E: YNyn+d/III d A0-3/9

L'exemple E est un PST à conception asymétrique à deux parties actives comportant un enroulement d'excitation connecté en étoile, un enroulement à prises connecté en étoile et un enroulement de stabilisation connecté en triangle sur le premier circuit magnétique, ainsi qu'un enroulement excité connecté en triangle et des enroulements série sur le second circuit magnétique (transformateur déphaseur en quadrature à deux parties actives). Il correspond au symbole de couplage et de déphasage YNyn+d/III d A0-3/9. Le schéma de connexion est représenté à la Figure 5.

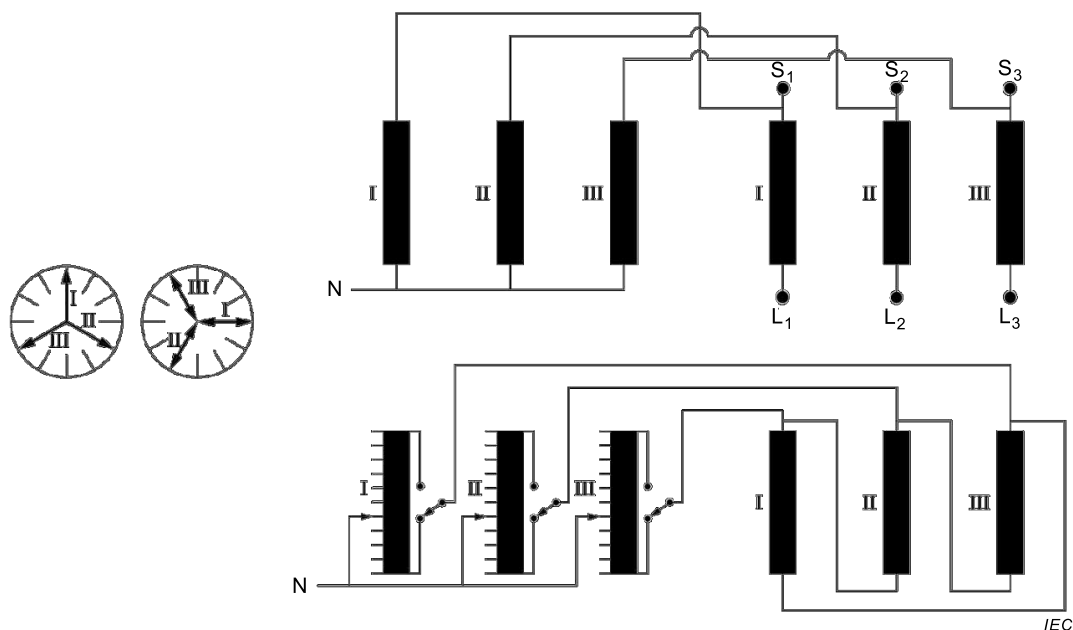


Figure 5 – Exemple E: YNyn+d/III d A0-3/9

9.4.3 Transformateurs incorporant un élément de déphasage

9.4.3.1 Exemple F: YNa0yn/dIII A0-3/9

L'exemple F est un autotransformateur incorporant un élément de déphasage à conception asymétrique sur un second circuit magnétique. Il correspond au symbole de couplage et de déphasage YNa0yn/dIII A0-3/9. Le schéma de connexion est représenté à la Figure 6.

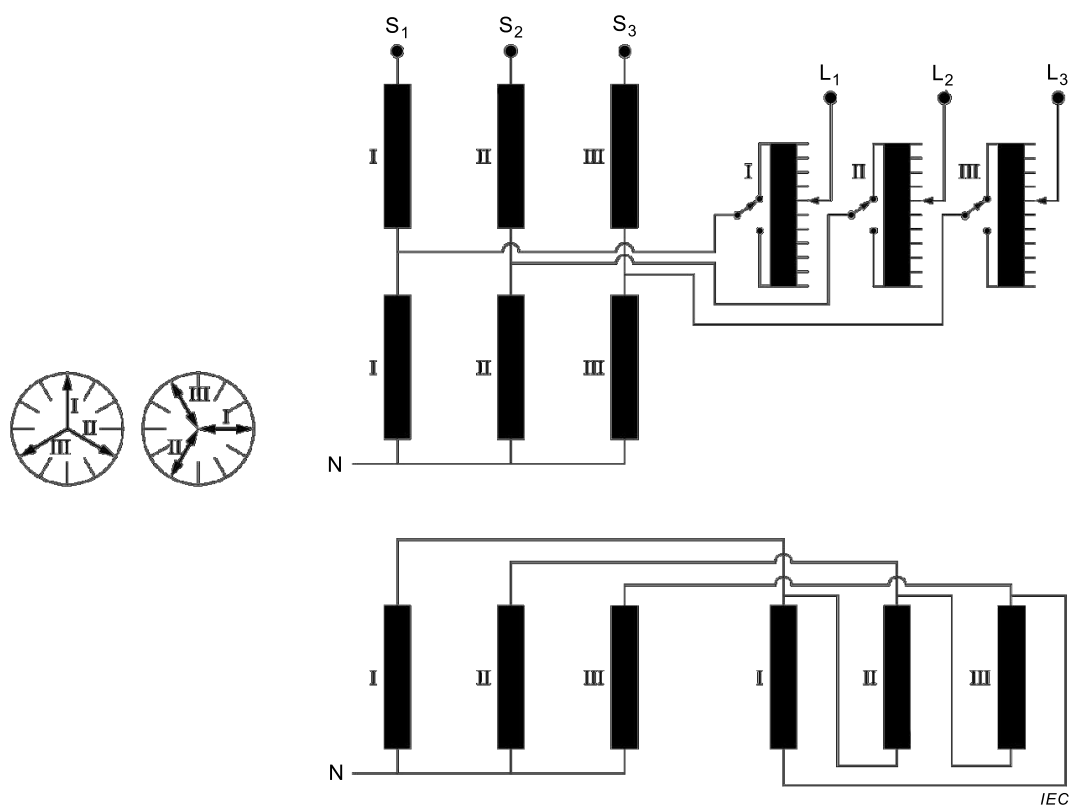


Figure 6 – Exemple F: YNa0yn/dIII A0-3/9

9.4.3.2 Exemple G: V A0-2/8

L'exemple G est un transformateur incorporant un élément de déphasage à conception asymétrique sur le même circuit magnétique. Il correspond au symbole de couplage et de déphasage V A0-2/8. Le schéma de connexion est représenté à la Figure 7.

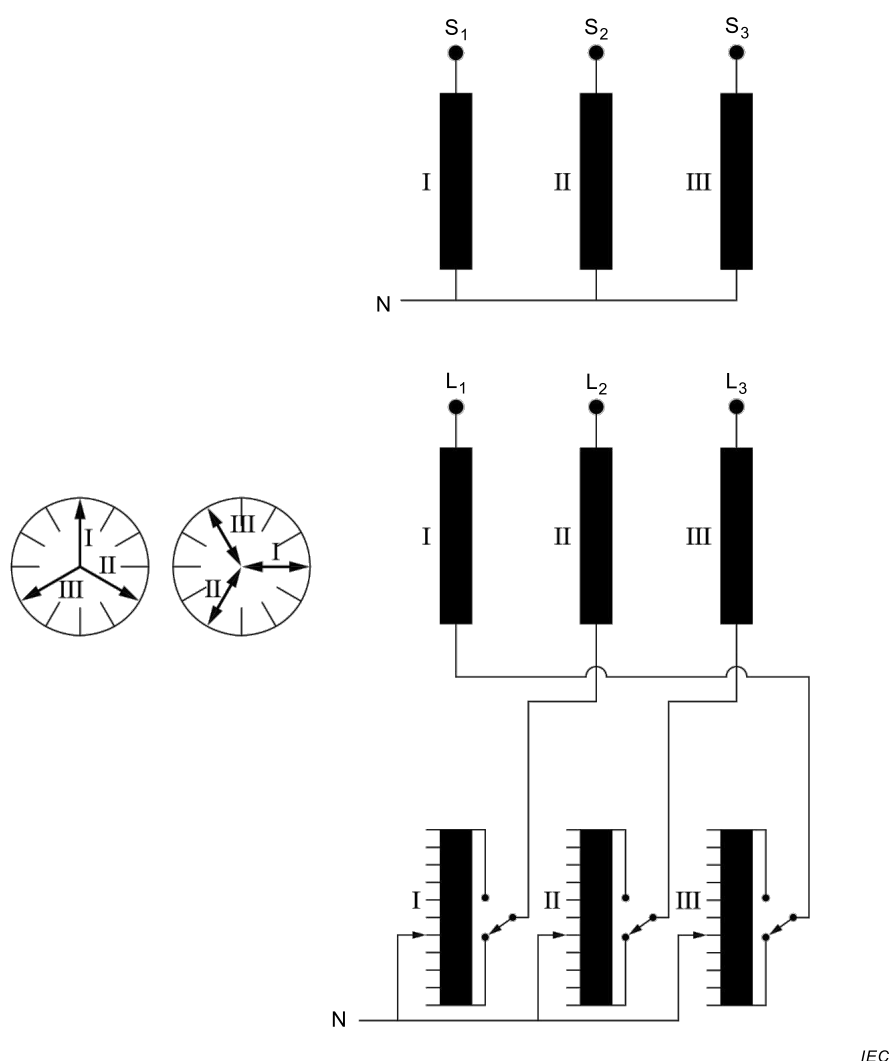


Figure 7 – Exemple G: V A0-2/8

10 Plaques signalétiques

Le transformateur déphaseur doit être équipé d'une plaque signalétique conforme à l'IEC 60076-1 ou à l'IEEE Std C57.12.00.

Un tableau comportant une ligne par position de prise, ainsi que des colonnes donnant les informations suivantes pour chaque position de prise est ajoutée, soit sur la plaque signalétique soit sur une plaque séparée:

- Prise – désignation de la position de prise, habituellement le numéro de prise;
- Déphasage à vide – déphasage en degrés par rapport aux bornes S et L à vide avec une avance "a" et un retard "r";
- Impédance – impédance de court-circuit mesurée;
- Limite de puissance S sur L – puissance maximale à la borne L (au facteur de puissance unité, à la tension et à la fréquence assignées à la borne L) en fonctionnement de transfert de puissance de la borne S à la borne L qui n'engendrera pas de surexcitation du ou des circuits magnétiques ni de sur-contraintes de composants tels que le changeur de prises, hors limites thermiques;
- Limite de puissance L sur S – comme d) ci-dessus, mais pour un fonctionnement avec un transfert de puissance de la borne L à la borne S.

La légende suivante doit être indiquée sur la plaque signalétique, sous le tableau:

"La charge au-delà de ces limites de puissance n'est pas permise. La charge est également soumise à des limites de surcharge thermique normales, qui peuvent être inférieures."

S'il y a des prises de tension et des prises d'angle de phase, des informations supplémentaires peuvent être exigées.

Si des informations supplémentaires doivent figurer sur la plaque signalétique, il convient que l'acheteur en fasse la mention dans l'appel d'offres.

En particulier, si les données de déphasage en pleine charge sont spécifiées par l'acheteur, le déphasage en degrés calculé à partir de l'impédance mesurée à la puissance assignée avec un transfert de puissance de la borne S à la borne L (et de la borne L à la borne S si cela est exigé) au facteur de puissance égal à un à chaque position de prise doit être indiqué. Si la puissance assignée n'est pas disponible sur certaines prises de dévoltage, il convient d'accompagner la valeur d'un *.

Pour les PST qui comportent plus d'une enceinte séparée contenant du liquide, le volume de liquide et la résistance au vide de chaque enceinte (y compris les compartiments de connexion) doivent figurer sur la plaque signalétique. Si des barrières entre enceintes sont incorporées, la résistance au vide de chaque enceinte doit indiquer si le compartiment adjacent nécessite ou non d'être vidangé et d'être à la pression atmosphérique.

La plaque signalétique doit indiquer si le PST convient à une utilisation avec un shuntage en charge, un shuntage en service continu ou sans shuntage, selon l'essai aux chocs de foudre appliqués simultanément à plusieurs bornes de ligne (LIMT³) réalisé.

11 Marquage des bornes et rotation de phase

Sauf spécification contraire par l'acheteur, les marquages de bornes suivants doivent être utilisés:

- bornes S: S avec la désignation de phase 1, 2 et 3, par exemple: S₁ S₂ S₃;
- bornes L: L avec la désignation de phase 1, 2 et 3, par exemple: L₁ L₂ L₃;
- neutre de l'enroulement d'excitation (si présent): S₀ ou N₁ N₂ N₃ si les neutres de phase sont séparés;
- neutre de l'enroulement excitant (si présent et sorti): n₀ ou n₁ n₂ n₃ si les neutres de phase sont séparés;
- enroulements additionnels (si sortis): Y, Z.

La connexion de phase pour obtenir l'avance définie en 3.17 et le retard défini en 3.18 entre les bornes S et L (comme indiqué sur la plaque signalétique) doit suivre l'ordre 1, 2, 3. Si cette rotation est inversée, le sens de l'avance et du retard est également inversé par rapport à la plaque signalétique.

Sauf spécification contraire, les bornes doivent être dans l'ordre 1, 2, 3 de gauche à droite face aux bornes L et de droite à gauche face aux bornes S.

³ LIMT = *Lightning Impulses applied to Multiple line Terminals simultaneously*

12 Informations à fournir par le fabricant

Le fabricant doit fournir au moment de l'appel d'offres les détails de la capacité de charge en mode dévolteur, ainsi que la tension et la fréquence de la position de prise.

Le fabricant doit fournir au moment de la conception les détails suffisants de la conception pour pouvoir modéliser le fonctionnement transitoire du PST afin de pouvoir spécifier correctement la coordination de l'isolation. Voir 5.2.5.

13 Essais

13.1 Généralités

Des essais doivent être réalisés conformément aux exigences de l'IEC 60076-1 ou de l'IEEE Std C57.12.00 (voir l'Article 4), sauf pour les modifications introduites dans l'Article 13. Pour les besoins des essais, un PST complet doit être défini comme un PST entièrement assemblé et connecté lorsqu'il sera mis en service, mais sans aucun parafoudre externe installé.

Voir 7.6 pour les connexions d'essai.

Lorsque le transformateur déphaseur est constitué d'appareils monophasés distincts, des essais peuvent être effectués sur chaque phase séparément et des essais de type (conception) ne sont exigés que sur une phase. Les essais doivent être structurés de manière à satisfaire aux exigences d'essai. Les essais diélectriques sur les enroulements interconnectés sont exigés à des niveaux représentatifs de ceux qui surviendraient si l'appareil était soumis à l'essai entièrement assemblé dans la configuration triphasée.

13.2 Essais individuels de série

Les essais individuels de série suivants doivent être effectués sur tous les PST:

- a) mesure de la résistance des enroulements (13.5);
- b) mesure du rapport de transformation, de l'angle de phase et du contrôle du déphasage (13.6);
- c) mesure de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge (13.7);
- d) mesure des pertes et du courant à vide (13.9);
- e) essais diélectriques individuels de série (13.12);
- f) essais sur changeurs de prises en charge (13.13);
- g) recherche de fuite sous pression pour les transformateurs immergés dans un liquide (essai d'étanchéité) (13.14);
- h) vérification du rapport et de la polarité des transformateurs de courant incorporés;
- i) vérification de l'isolation des circuits magnétiques et de leurs habillages pour les transformateurs immergés dans du liquide avec isolation des circuits magnétiques et de leurs habillages (IEC 60076-1 ou norme IEEE Std C57.12.00);
- j) détermination de la capacité entre chaque enroulement et la terre et, si possible, entre les enroulements;
- k) mesure de la résistance d'isolation en courant continu entre chaque enroulement et la terre et, si possible, entre les enroulements;
- l) mesure du facteur de dissipation ($\tan \delta$) des capacités du système d'isolation;
- m) mesure des gaz dissous dans le liquide diélectrique de chaque enceinte d'huile séparée, à l'exception du compartiment du commutateur.

13.3 Essais de type (conception)

Les essais de type (conception) suivants doivent être réalisés sur le premier appareil de chaque conception:

- a) essai d'échauffement (13.8);
- b) essais de type (conception) diélectriques (13.12);
- c) détermination du niveau de bruit (13.10);
- d) mesure de l'impédance homopolaire (13.11);
- e) mesure de la puissance absorbée par les moteurs des ventilateurs et des pompes de liquide.

13.4 Essais spéciaux

Les essais spéciaux suivants doivent être réalisés s'ils sont spécifiés individuellement par l'acheteur dans l'appel d'offres et la commande:

- a) essais spéciaux diélectriques (13.12);
- b) essai de tenue au court-circuit (IEC 60076-5 ou norme IEEE Std C57.12.90);
- c) essai de déformation sous vide (IEC 60076-1 ou norme IEEE Std C57.12.90);
- d) essai de déformation sous pression (IEC 60076-1 ou norme IEEE Std C57.12.90);
- e) essai d'étanchéité au vide sur site (IEC 60076-1 ou norme IEEE Std C57.12.90);
- f) mesure de la réponse en fréquence (IEC 60076-18 ou norme IEEE Std C57.149 [7]);
- g) vérification du revêtement extérieur (ISO 2178 et ISO 2409, ou suivant la spécification);
- h) essai mécanique ou évaluation de l'aptitude au transport de la cuve (suivant la spécification du client);
- i) détermination du poids de chaque appareil PST en condition de transport par calcul ou, si l'acheteur l'exige au moment de l'appel d'offres, par mesure;
- j) mesures de tension transitoire, par exemple mesures des impulsions à basse tension (RSO) et/ou mesures de fréquence de résonance.

13.5 Résistance des enroulements

La résistance de chaque enroulement du PST doit être mesurée individuellement (y compris les enroulements à prise) à chaque position de prise en utilisant des traversées d'essai provisoires ou avant que des connexions internes entre enroulements ne soient réalisées si nécessaire.

Selon accord, les mesures à certaines positions de prise peuvent être omises si aucune information supplémentaire n'est obtenue.

13.6 Mesure du rapport de transformation, mesure de l'angle de phase et contrôle du déphasage

Le rapport de transformation et l'angle de phase entre les bornes S et L doivent être mesurés à chaque position de prise et aux deux positions de l'ARS (si le système en est équipé). Voir l'IEC 62032 [1] ou l'IEEE Std C57.135 [2].

Le rapport de transformation de chaque transformateur pris individuellement doit être mesuré en utilisant des traversées d'essai provisoires ou avant que des connexions internes entre enroulements ne soient réalisées si nécessaire.

Lorsque des enroulements supplémentaires sont présents, un contrôle du déphasage doit être effectué selon l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.90.

13.7 Mesure de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge

L'impédance de court-circuit et les pertes dues à la charge doivent être mesurées sur le PST complet à chaque position de prise. L'impédance de court-circuit et la perte doivent être mesurées à chacune des positions de prises extrêmes et de prise à déphasage nul, ainsi qu'aux autres positions de prise où l'une de ces valeurs est garantie, à un courant correspondant à la puissance assignée. D'autres positions de prise peuvent être mesurées à courant réduit, auquel cas la mesure à chacune des positions de prise extrêmes et à déphasage nul doit être répétée au même courant réduit.

NOTE 1 Ces mesures sont nécessaires parce que l'impédance est un paramètre important pour le calcul de la performance du PST à chaque position de prise. L'impédance n'est pas censée varier de manière significative en fonction du courant. Les mesures de pertes sont moins importantes aux positions de prise autres que les positions de prise extrêmes, les positions à déphasage nul ainsi que toute autre position de prise pour laquelle elles sont garanties, les erreurs associées à courant réduit sont donc habituellement acceptables.

Selon accord, les mesures relatives aux transformateurs pris individuellement peuvent être combinées pour déduire l'impédance et les pertes du PST à condition que cette approche ait été validée sur un appareil précédemment fourni de la même conception ou à courant réduit si nécessaire en raison de limitations du matériel d'essai.

NOTE 2 L'impédance et les pertes dues à la charge sont basées sur la puissance et la tension assignées définies en 3.5 et en 3.19 (pour les conceptions asymétriques).

13.8 Essai d'échauffement

L'essai d'échauffement doit être effectué conformément à l'IEC 60076-2 ou l'IEEE Std C57.12.90.

Sauf accord contraire, l'essai doit être réalisé sur la position de prise extrême présentant les pertes maximales dues à la charge. Si, dans cette condition, un enroulement autre qu'un enroulement à prises reçoit moins de 90 % du courant maximal qu'aura l'enroulement à la puissance assignée sur une autre position de prise, une mesure supplémentaire du gradient de l'enroulement doit être réalisée sur la position de prise pour le courant maximal dans cet enroulement.

L'échauffement de tous les enroulements doit être déterminé. Cela peut exiger l'utilisation de traversées d'essai provisoires.

Sauf accord contraire entre le fabricant et l'acheteur, l'essai doit être réalisé sur le PST entièrement assemblé. Après accord, l'essai peut être réalisé sur l'appareil d'excitation et l'appareil série séparément s'ils sont montés dans des cuves distinctes avec leurs propres systèmes de refroidissement. Dans ce cas, toutes les connexions entre l'appareil d'excitation et l'appareil série doivent être soumises à l'essai avec au moins l'un des appareils. Etant donné que la distribution du flux dans l'appareil série sera différente de la condition combinée dans un essai distinct, une revue de cette différence doit être effectuée et les corrections nécessaires éventuelles appliquées.

Si l'appareil d'excitation et l'appareil série comportent chacun leur propre système de refroidissement et qu'ils sont soumis à l'essai ensemble, les pertes totales calculées à réaliser dans chaque appareil ne pourront généralement pas être égalées simultanément. Alors le courant sélectionné pour la mesure de l'échauffement du liquide au sommet devra permettre d'atteindre la somme des pertes totales pour les deux appareils et une correction sera appliquée aux résultats de chaque appareil individuellement.

Par accord, les pertes et courants réalisés lors de l'essai d'échauffement peuvent être diminués conformément aux dispositions de l'IEC 60076-2 ou de l'IEEE Std C57.12.90. Toute limitation concernant les pertes et courants réalisables imposés par la conception du PST ou les moyens d'essais du fabricant qui exigerait un tel accord doit être clairement indiquée par le fabricant dans l'appel d'offres.

13.9 Mesure des pertes et du courant à vide

Les pertes et le courant à vide doivent être mesurés à 90 %, à 100 % et à 110 % de la tension assignée apparaissant aux bornes S à chacune des positions de prise extrêmes et à déphasage nul. Des traversées provisoires connectées à l'un des enroulements peuvent être utilisées pour réaliser cette mesure.

13.10 Détermination du niveau de bruit

13.10.1 Généralités

Les mesures du niveau de bruit doivent être réalisées conformément à l'IEC 60076-10 ou l'IEEE Std C57.12.90. S'il est souhaité être en mesure d'estimer le niveau de bruit du PST dans d'autres conditions de fonctionnement que celles couvertes par l'ensemble des mesures normalisées ci-dessous, des mesures supplémentaires seront exigées. Voir Annexe D.

13.10.2 Pour les PST comportant un système de refroidissement combiné

Sauf spécification contraire, les mesures suivantes doivent être réalisées pour les PST possédant un système de refroidissement combiné:

- a) le PST alimenté à la tension assignée, à vide, sur la position de prise de déphasage nul, avec en fonctionnement la seule part d'équipement de refroidissement qui le serait lorsque le PST est à vide;
- b) le PST alimenté à la tension assignée, à vide, sur la position de prise de déphasage nul, avec l'équipement de refroidissement complet en fonctionnement;
- c) le PST alimenté à la tension assignée, à vide, sur la position de prise d'avance extrême (ou sur la position de prise de retard extrême en l'absence de fonction d'avance), avec l'équipement de refroidissement complet en fonctionnement.

13.10.3 Pour les PST comportant des systèmes de refroidissement distincts pour l'appareil d'excitation et l'appareil série

Si les appareils d'excitation et les appareils série sont montés dans des cuves distinctes avec chacun leur système de refroidissement, sauf spécification contraire, les mesures suivantes doivent être réalisées:

- a) le PST alimenté à la tension assignée, à vide, sur la position de prise de déphasage nul, avec en fonctionnement la seule part d'équipement de refroidissement qui le serait lorsque le PST est à vide;
- b) Le PST alimenté à la tension assignée, à vide, sur la position de prise de déphasage nul, avec en fonctionnement la seule part d'équipement de refroidissement de l'appareil d'excitation qui le serait lorsque le PST est à vide et l'équipement de refroidissement complet de l'appareil série;
- c) le PST alimenté à la tension assignée, à vide, sur la position de prise d'avance extrême (ou sur la position de prise de retard extrême en l'absence de fonction d'avance), avec l'équipement de refroidissement complet en fonctionnement.

Le PST doit être en condition de service si possible; si cela n'est pas réalisable, des mesures distinctes pour chaque cuve et système de refroidissement peuvent être réalisées et les résultats combinés.

13.11 Mesure de l'impédance homopolaire

Les mesures suivantes d'impédance homopolaire doivent être réalisées pour chacune des positions de prise extrêmes et de déphasage nul:

- a) entre les bornes S connectées ensemble et le neutre, les bornes L étant en circuit ouvert;
- b) entre les bornes S connectées ensemble et le neutre, les bornes L étant connectées au neutre;

c) entre les bornes L connectées ensemble et le neutre, les bornes S étant en circuit ouvert.

Pour les conceptions ne comportant pas de connexion neutre, la mesure de l'impédance homopolaire doit être réalisée entre les bornes S connectées ensemble et les bornes L connectées ensemble.

Pour les conceptions comportant plus d'un neutre, tous les neutres connectés à la terre en service doivent être connectés ensemble.

Des mesures supplémentaires d'impédance homopolaire peuvent être spécifiées par l'acheteur.

13.12 Essais diélectriques

13.12.1 Généralités

La classification des essais diélectriques en tant qu'essais individuels de série, de type (conception) et spéciaux doit être conforme à l'IEC 60076-3 ou à l'IEEE Std C57.12.00, sauf pour l'essai aux chocs de foudre appliqués simultanément à plusieurs bornes de ligne (LIMT) décrit en 13.12.5.

Les essais diélectriques doivent être réalisés sur le PST complet sauf si toutes les conditions suivantes sont remplies:

- les essais ne peuvent raisonnablement pas être réalisés sur le PST entièrement assemblé;
- il peut être démontré que les essais sur des parties distinctes du PST représentent complètement les tensions qui surviendraient sur le PST entièrement assemblé;
- l'ensemble des enroulements et des connexions sont soumis à l'essai;
- les installations d'essai sont fixées par accord entre le fabricant et l'acheteur.

Si le fabricant ne peut pas soumettre à l'essai le PST complet, cela doit être indiqué dans l'appel d'offres en plus des dispositions de rechange correspondantes.

NOTE L'application d'un essai de tension alternative d'une borne de ligne (LTAC⁴) selon l'IEC 60076-3 se complique dans le cas d'un transformateur déphaseur à cause des couplages entre phases et spécifier cet essai peut conduire à un niveau d'isolement supérieur.

13.12.2 Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)

Les essais de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD⁵) doivent être réalisés aux deux positions de prise extrêmes conformément à l'IEC 60076-3 ou l'IEEE Std C57.12.90.

Si des courants assignés sur des prises particulières en mode dévolteur sont spécifiés, un ou plusieurs essais doivent être réalisés à un niveau qui présente la plus grande augmentation de la tension interne survenant lors du fonctionnement en mode dévolteur aux puissances assignées et aux positions de prise spécifiées. Cette tension interne augmentée doit être prise comme tension assignée pour les besoins de la détermination des niveaux d'essai de tension induite pour cet enroulement. Afin d'éviter des essais excessifs de l'appareil d'excitation, il peut s'avérer nécessaire de réaliser cet essai en déconnectant au préalable la connexion enroulement excitant–appareil série lors de l'essai de l'appareil série.

⁴ LTAC = line terminal AC

⁵ IVPD = induced voltage with partial discharge

Par ailleurs, la structure interne du PST doit être analysée pour garantir l'obtention de la tension d'essai prescrite dans l'ensemble des enroulements et connexions. Certaines conceptions peuvent exiger des essais supplémentaires de tension induite.

13.12.3 Essai au choc de manœuvre (SI)

L'essai au choc de manœuvre (SI⁶) doit être réalisé sur le PST complet, la tension étant appliquée sur les bornes 'S' et 'L' de la phase à essayer réunies, en position de prise de déphasage nul. Si une connexion de neutre est prévue dans la conception elle doit être mise à la terre sinon l'autre extrémité de l'enroulement d'excitation de la phase essayée doit être mise à la terre. Les autres bornes peuvent être en circuit ouvert, connectées ensemble ou mises à la terre par l'intermédiaire d'une impédance.

NOTE 1 La prise à déphasage nul est choisie de manière à fournir la tension la plus élevée dans l'enroulement d'excitation.

Pour les conceptions où un essai au choc de manœuvre sur la prise à déphasage nul n'induirait pas de tension dans l'enroulement série, un essai alternatif ou additionnel à une position de prise extrême ou à une autre position de prise peut être spécifié par l'acheteur. Dans ce cas, les bornes S et L ne sont pas connectées ensemble. S'il s'agit d'un essai additionnel et que la tension d'une ou de plusieurs bornes de ligne non connectées au générateur de choc est supérieure à la tension de la borne soumise au choc, la tension de choc appliquée peut être réduite sous réserve que le niveau de la tension de choc de manœuvre et que la forme d'onde exigés soient réalisés sur la ou les autres bornes.

NOTE 2 Pour les PST de conception à deux parties actives, il pourrait s'avérer difficile d'obtenir la durée jusqu'à zéro exigée; dans ce cas, les procédures telles que la prémagnétisation des circuits magnétiques avec un courant continu ou des chocs réduits supplémentaires pourraient être utiles.

NOTE 3 Des impulsions à temps de montée court pourraient entraîner des tensions entre phases oscillatoires élevées.

13.12.4 Essai au choc de foudre

L'essai au choc de foudre doit être réalisé sur les bornes S et L, chacune à leur tour, l'autre borne de ligne (S ou L) de la même phase devant être mise à la terre de manière directe ou, si nécessaire pour obtenir la forme d'onde exigée, par le biais d'une impédance. L'impédance ne doit pas dépasser l'impédance d'onde de la ligne connectée si une valeur est fournie par l'acheteur, ou 400 Ω , dans le cas contraire.

Si la valeur de l'impédance d'onde n'est pas spécifiée, la tension apparaissant lors de l'essai au choc de foudre à l'autre borne de ligne ne doit pas excéder plus de 75 % de la tension de tenue assignée aux chocs de foudre. Dans tous les cas, la valeur d'impédance la plus faible nécessaire pour réaliser la forme d'onde exigée doit être utilisée.

Toutes les autres bornes doivent être mises à la terre.

Le fabricant doit déterminer, soit par calcul soit en procédant à des mesures de choc à basse tension, la ou les positions de prise donnant les tensions internes et les différences de tension les plus importantes entre les enroulements et les sections d'enroulements. A la demande de l'acheteur, le fabricant doit communiquer les détails des formes d'onde et tensions de choc anticipées au sein du transformateur déphaseur aux positions de prise particulières ou les détails des cas les plus défavorables.

Un essai doit être réalisé sur une phase sur la prise d'avance extrême, un sur la prise de retard extrême et un autre sur la prise à déphasage nul. Si le fonctionnement de l'ARS ou du présélecteur donne deux configurations possibles ou plus pour la prise à déphasage nul, la

⁶ SI = switching impulse

configuration donnant les tensions internes les plus élevées doit être utilisée. Dans certains cas, si le fabricant détermine que des positions de prise différentes de celles données ci-dessus produisent des tensions internes supérieures, cela doit être porté à l'attention de l'acheteur et utilisé après accord de l'acheteur.

Sinon, la ou les positions de prise peuvent être choisies par l'acheteur, qui choisit habituellement la ou les positions de prise donnant les tensions internes les plus importantes. Un total de trois séquences d'impulsions seulement est exigé sur chaque ensemble de bornes, à savoir une sur chaque phase.

NOTE Le principe de choix des différentes positions de prise sur chaque phase consiste à garantir que les différentes parties du PST reçoivent des contraintes lors de l'essai représentatives de la plage de contraintes qui surviennent aux différentes positions de prise en service. Même si la valeur de contrainte la plus importante dans une partie spécifique de la structure d'isolation peut survenir sur une position de prise particulière, différentes positions de prise peuvent être utilisées pour contraindre d'autres parties du PST qui ne sont pas effectivement contraintes par ailleurs sur cette prise particulière. Il est admis qu'un essai par borne par phase ne puisse pas couvrir chaque condition, le meilleur compromis est donc nécessaire.

Pour les conceptions où les bornes S et L sont connectées ensemble par le changeur de prises sans impédance sur la prise à déphasage nul, les essais aux bornes S et L sur la prise à déphasage nul sont réalisés en même temps. C'est pourquoi une connexion à la terre à partir de l'une de ces bornes sur la phase à l'essai ne peut pas être utilisée pour les essais sur la prise à déphasage nul. Les essais sur les prises extrêmes pour ces conceptions doivent être réalisés de la manière décrite ci-dessus.

13.12.5 Essai aux chocs de foudre appliqués simultanément à plusieurs bornes de ligne (LIMT)

En guise d'essai de type (conception), un essai LIMT (avec les bornes S et L connectées ensemble sur la phase à l'essai) doit être réalisé sur la position de prise à déphasage nul à 80 % du niveau du plein essai ou à 110 % de la tension résiduelle à 10 kA du parafoudre (valeur à fournir par l'acheteur au moment de l'appel d'offres), selon la valeur la plus élevée des deux.

NOTE 1 Cette exigence par défaut implique que le PST comporte un dispositif de shuntage en charge qui ne sera fermé en service que pendant le temps nécessaire à la réalisation d'une séquence de coupure afin de mettre le PST en service ou hors service, c'est pourquoi un essai au niveau d'essai complet n'est pas justifié.

Si le PST est spécifié pour une utilisation normale dans la condition où un dispositif de shuntage en charge est fermé en service avec le PST alimenté à partir des bornes S et L, un essai LIMT doit être réalisé à 100 % du niveau d'essai complet sur la prise à déphasage nul en tant qu'essai de type (conception) et un essai individuel de série (routine) doit être réalisé à 80 % du niveau. L'essai de routine n'est pas exigé sur l'appareil soumis à un essai de type (conception).

NOTE 2 Si le PST peut être et sera utilisé alors que le dispositif de shuntage est fermé sur une prise autre que la prise à déphasage nul (cela étant considéré comme une fonction inhabituelle étant donné que des courants en circulation très élevés sont attendus et que la plupart des PST ne seront pas conçus pour une telle situation), l'effet des chocs sur le PST dans cette condition et la réalisation de l'essai LIMT sur cette prise pourraient faire l'objet d'une attention particulière.

Si le PST est spécifié pour ne pas être utilisé avec un dispositif de shuntage en charge, l'essai LIMT ne s'applique pas.

13.13 Essai sur les changeurs de prises en charge – Essai de fonctionnement

Après que le changeur de prises a été complètement monté sur le transformateur, la séquence d'opérations suivante doit être réalisée sans aucune défaillance:

- a) huit cycles de fonctionnement complets, le PST n'étant pas alimenté (un cycle de fonctionnement balaie toute l'étendue de prises dans un sens puis dans l'autre);
- b) un cycle de fonctionnement complet, le PST n'étant pas alimenté, la tension auxiliaire étant réduite à 85 % de sa valeur assignée;

- c) un cycle de fonctionnement complet, le PST étant sous tension à vide, à la fréquence et à la tension assignées. Lorsque l'enroulement à prises est utilisé pour mettre sous tension le PST, une ou plusieurs positions de prise ne pourront pas être soumises à l'essai. Dans ce cas, selon accord, il convient que les positions de prise ne pouvant pas être soumises à l'essai en usine soient soumises à l'essai sur site lors de la mise en service;

NOTE L'utilisation de l'enroulement à prises pour l'alimentation du PST est une caractéristique des appareils à haute tension, qui n'incluent pas d'enroulement d'essai ni d'enroulement de stabilisation ou d'enroulement tertiaire adapté.

- d) les bornes L étant en court-circuit et les bornes S alimentées, autant que possible, par le courant assigné, 10 cycles d'opérations de changement de prise sur les deux échelons de part et d'autre de la position où opère un présélecteur à réglage grossier ou un présélecteur inverseur ou un commutateur avance/retard, ou dans les autres cas autour de la position moyenne mécanique du changeur de prise (le changeur de prise passera 20 fois par la position de présélection). S'il y a un commutateur avance/retard et un présélecteur à réglage grossier à différentes positions de prise, cet essai doit être répété pour soumettre à l'essai les deux dispositifs. Lorsque l'impédance du PST est égale à zéro (nulle) sur l'une des positions de prise, cet essai ne peut normalement pas être réalisé dans les conditions indiquées. Dans ce cas, il est permis de réaliser l'essai en utilisant une impédance externe à courant réduit si nécessaire, ou des positions de prises différentes pour l'essai peuvent être fixées par accord.

13.14 Essai de recherche de fuite sous pression

L'ensemble des cuves et connexions remplies de liquide doivent être soumises à l'essai de recherche de fuite conformément à l'IEC 60076-1 ou à l'IEEE Std C57.12.00.

13.15 Essai de déformation sous vide

L'ensemble des cuves et connexions remplies de liquide doivent être soumises à l'essai de déformation conformément à l'IEC 60076-1 ou à l'IEEE Std C57.12.00.

13.16 Essai de déformation sous pression

L'ensemble des cuves et connexions remplies de liquide doivent être soumises à l'essai de déformation conformément à l'IEC 60076-1 ou à l'IEEE Std C57.12.00.

14 Tolérances

14.1 Généralités

Les tolérances doivent être celles données dans l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.12.00. Les tolérances supplémentaires spécifiques aux PST doivent être celles indiquées ci-après.

14.2 Tolérance relative à l'impédance et à l'angle de phase

Lorsque des valeurs minimales et maximales d'impédance sont spécifiées, ces limites sont exprimées sans tolérance.

Lorsque des angles de phase d'avance et de retard à vide sont spécifiés, la valeur de conception sur les prises extrêmes en termes absolus ne doit pas être inférieure à la valeur spécifiée et donc ces limites sont exprimées sans tolérance.

Lorsque des angles de phase absolus minimaux en survoltage et/ou en dévoltage à la puissance assignée sont spécifiés, ces limites sont exprimées sans tolérance. Pour les besoins de l'Article 14, les angles de phase en survoltage et en dévoltage à la puissance assignée doivent être calculés en utilisant les valeurs mesurées d'impédance et d'angle de phase à vide, d'après les formules suivantes:

$$\alpha_{\text{boost}} = \alpha_{0\text{max}} - \arctan\left(\frac{Z}{100}\right)$$

$$\alpha_{\text{buck}} = \alpha_{0\text{max}} + \arctan\left(\frac{Z}{100}\right)$$

où

- $\alpha_{0\text{max}}$ est l'angle de phase à vide à la position de prise extrême;
- Z est l'impédance à la position de prise extrême, exprimée en pourcentage;
- α_{buck} est l'angle de phase en charge en mode dévolteur à la puissance assignée et à la position de prise extrême;
- α_{boost} est l'angle de phase en charge en mode survoltage à la puissance assignée et à la position de prise extrême.

Les formules sont une approximation qui implique un facteur de puissance égal à 1 et une impédance largement supérieurs à la résistance. Si le facteur de puissance spécifié n'est pas égal à 1 ou si la résistance n'est pas réduite comparée à l'impédance, la formule à utiliser doit être celle donnée à l'Annexe E ou être fixée par accord.

Sauf spécification contraire, lorsque des valeurs d'impédance spécifiques sont spécifiées, la tolérance d'impédance doit s'élever à $\pm 7,5$ % de la valeur spécifiée pour chaque position de prise pour laquelle est spécifiée l'impédance.

Dans tous les cas et indépendamment des tolérances ci-dessus, la tolérance d'impédance doit être égale à $\pm 7,5$ % de la valeur de conception et la tolérance de l'angle de phase à vide doit être égale à ± 1 % ou $\pm 0,1^\circ$ de la valeur de conception (la valeur retenue étant la plus élevée des deux).

Dans les cas où il est attendu que les PST soient montés en parallèle, il convient d'établir les tolérances d'impédance et d'angle de phase à vide par accord entre l'utilisateur et le fabricant.

Annexe A (informative)

Liste de vérification des renseignements à fournir lors d'un appel d'offres et d'une commande

A.1 Régime assigné et caractéristiques générales

A.1.1 Informations habituelles

Les informations suivantes doivent être fournies dans tous les cas:

- a) spécifications particulières des normes auxquelles le PST doit satisfaire (IEC ou IEEE);
- b) fréquence;
- c) type intérieur ou extérieur;
- d) puissance assignée – si le PST est spécifié avec d'autres méthodes de refroidissement, les valeurs de puissance basses respectives doivent être indiquées en même temps que la puissance assignée (qui se réfère au mode de refroidissement de puissance le plus élevé);
- e) tension assignée pour les bornes S et L;
- f) soit:
 - angle de phase à vide et impédance minimaux, soit
 - angle de phase à la puissance assignée.

NOTE Voir 6.5.

- g) nombre minimal d'échelons de prise;
- h) direction du flux de puissance (pouvant être bidirectionnel);
- i) impédance minimale à la position de prise à déphasage nul (pourrait être égale à zéro);
- j) courant ou puissance de court-circuit symétrique du réseau connecté aux bornes S et L;
- k) tension la plus élevée pour le matériel (U_m) pour la borne de ligne et la borne neutre de chaque enroulement (par rapport à l'isolation, voir l'IEC 60076-3 ou l'IEEE Std C57.12.00);
- l) méthode de mise à la terre du système;
- m) absence ou fermeture habituelle d'un commutateur de shuntage en charge connectant les bornes S et L;
- n) niveau d'isolement et niveaux d'essais diélectriques (voir l'IEC 60076-3 ou l'IEEE Std C57.12.00) pour la borne de ligne et la borne neutre de chaque enroulement;
- o) exigences relatives au marquage des bornes et à la rotation de phase (si différentes de celles données à l'Article 11), idéalement en fournissant un schéma de disposition des bornes;
- p) toutes particularités d'installation, de montage, de transport et de manutention. Restrictions de dimensions et de masse;
- q) détails sur la tension d'alimentation des auxiliaires (pour les ventilateurs et les pompes, le changeur de prises, les alarmes, etc.);
- r) accessoires exigés et indication du côté sur lequel les appareils de mesure, plaques signalétiques, indicateurs de niveau de liquide, etc. doivent être lisibles;
- s) si un type particulier de système de conservation de liquide est exigé;
- t) informations sur l'échauffement maximal garanti;
- u) conditions inhabituelles de service (voir Article 5);
- v) détails concernant le type et la disposition des bornes, par exemple traversées aériennes ou boîte à câbles ou jeu de barres isolé au gaz;

- w) s'il convient que les connexions du circuit magnétique et de son habillage soient sorties pour mise à la terre à l'extérieur;
- x) impédance d'onde de la ligne connectée, si elle est connue (voir 13.12.4);
- y) nombre minimal de manœuvres de l'ARS avant qu'un remplacement du contact ou du commutateur soit exigé. Si un ARS est inclus dans la conception, ce point doit être éclairci par accord entre les fabricants du PST et de l'ARS avant l'appel d'offres, car le nombre de manœuvres admissibles dépend de la conception du PST. Le fabricant du PST doit indiquer clairement dans l'appel d'offre la fréquence et le domaine d'application du travail exigé sur l'ARS, le cas échéant. Voir Annexe F.

A.1.2 Informations particulières

Les informations particulières suivantes doivent être fournies si l'élément particulier est exigé par l'acheteur:

- a) toute exigence spécifique aux charges au-delà de la puissance assignée;
- b) toute exigence spécifique à la capacité de dévoltage au-delà de celle donnée en 5.2.2 (voir 6.3);
- c) type de PST où une conception particulière est exigée (p. ex: à partie active unique ou à deux parties actives) et si une conception asymétrique est acceptable;
- d) toute exigence spécifique à la variation de tension, éventuellement accompagnée de la variation de l'angle de phase;
- e) si les cuves doivent faire l'objet d'un montage particulier (p. ex: deux parties actives dans une cuve, deux parties actives dans deux cuves distinctes, trois appareils monophasés, etc.);
- f) symboles de couplage et de présence des bornes neutres exigés, pour chaque enroulement;
- g) mode de refroidissement;
- h) si un changeur de prise hors alimentation est requis à la place ou en même temps qu'un changeur de prise en charge;
- i) facteur de puissance en pleine charge minimal du retard et de l'avance de phase;
- j) si un type particulier de liquide isolant est exigé, par exemple un liquide isolant naturel ou un liquide isolant synthétique;
- k) si des essais au choc de foudre sont exigés, et si l'essai doit inclure les ondes coupées lorsque cela n'est pas déjà exigé par la norme (voir l'IEC 60076-3 ou l'IEEE Std C57.12.00);
- l) si un enroulement de stabilisation est exigé et dans ce cas, le mode de mise à la terre;
- m) toute tolérance ou limite particulière pour l'angle de phase et/ou l'impédance de court-circuit;
- n) détails des exigences, des garanties et des essais spéciaux relatifs aux niveaux de bruit (voir Annexe D et IEC 60076-10 ou IEEE Std C57.12.90);
- o) toute exigence particulière nécessaire pour permettre l'utilisation d'une enceinte acoustique non fournie par le fabricant;
- p) tenue au vide de la ou des cuves du PST, du conservateur et de l'équipement de refroidissement, si une valeur spécifique est exigée;
- q) tout essai spécial auquel il n'est pas fait référence ci-dessus et qui est exigé par l'acheteur;
- r) informations sur l'évaluation des pertes ou pertes maximales;
- s) toutes les limitations physiques de dimensions, par exemple pour une installation sur une assise existante ou dans un bâtiment; restrictions particulières relatives à l'espace d'installation qui peuvent avoir une influence sur les distances d'isolement et la position des bornes du transformateur;
- t) toute exigence particulière à des connexions entre des cuves distinctes (voir 7.2);

- u) gabarit de transport et limitations de masse; valeurs minimales de tenue à l'accélération, si elles sont supérieures à celles spécifiées en 6.14;
- v) conditions de transport et de stockage non couvertes par les conditions normales décrites dans l'IEC 60076-1 ou l'IEEE Std C57.150;
- w) toutes exigences ou limitations particulières liées à la maintenance;
- x) si une chambre de coupure est exigée pour les connexions par boîte à câble;
- y) si des dispositifs de surveillance de condition sont exigés;
- z) toute considération environnementale particulière concernant l'impact du PST sur l'environnement devant être prise en compte dans la conception du PST;
- aa) toute considération particulière relative à l'hygiène et à la sécurité devant être prise en compte dans la conception du PST et concernant la fabrication, l'installation, le fonctionnement, la maintenance et la mise au rebut.

Les conditions de fonctionnement électrique inhabituelles suivantes:

- bb) si la forme d'onde du courant de charge peut être fortement altérée, et si une charge triphasée déséquilibrée est prévue; dans les deux cas, donner des détails;
- cc) si le PST doit être connecté directement ou par une ligne aérienne de courte longueur à un appareillage à isolation gazeuse (GIS⁷);
- dd) tensions alternatives déséquilibrées ou écart des tensions alternatives du système par rapport à une forme d'onde pratiquement sinusoïdale;
- ee) charges impliquant des courants harmoniques anormaux tels que ceux qui peuvent résulter lorsque des courants de charge appréciables sont contrôlés par des dispositifs statiques ou similaires. Ces courants harmoniques peuvent causer des pertes excessives, ainsi qu'un échauffement anormal;
- ff) excitation dépassant soit 110 % de la tension assignée, soit 110 % du rapport assigné V/Hz;
- gg) courts-circuits prévus dans le cadre du fonctionnement normal ou du contrôle-commande;
- hh) conditions inhabituelles d'application de courts-circuits différentes de celles données dans l'IEC 60076-5 ou l'IEEE Std C57.12.90;
- ii) conditions inhabituelles de tension, y compris les surtensions transitoires, la résonance, les surtensions de coupure, etc., pouvant nécessiter une attention particulière dans la conception de l'isolation;
- jj) toute exigence relative à la tenue aux courants continus circulant entre les bornes ou entre les bornes et le neutre (p. ex: courants induits de manière géomagnétique);
- kk) enclenchements fréquents réguliers dépassant 24 fois par an;
- ll) toute exigence relative à la commande à distance du PST.

Les conditions inhabituelles liées à l'environnement physique suivantes:

- mm) altitude au-dessus du niveau de la mer si elle dépasse 1 000 m (3 300 pieds);
- nn) conditions particulières de température externe du fluide de refroidissement à l'extérieur de la plage normale ou restrictions à la circulation de l'air de refroidissement;
- oo) activité sismique attendue sur le site d'installation, exigeant une attention particulière;
- pp) fumées et gaz préjudiciables, poussières excessives ou abrasives, mélanges explosifs de poussières ou de gaz, vapeur, brouillard salin, humidité excessive, ou gouttes d'eau, etc.;
- qq) vibration, tangage ou chocs anormaux.

⁷ GIS = gas-insulated switchgear

A.2 Fonctionnement en parallèle

Si le fonctionnement en parallèle d'un autre PST est exigé, cela doit être indiqué et, à moins que les PST ne soient alimentés comme une paire ou un ensemble, les informations suivantes concernant le PST parallèle doivent être indiquées:

- a) puissance assignée;
- b) tension ou rapport de transformation pour chaque position de prise;
- c) angle de phase à vide à chaque position de prise;
- d) impédance à chaque position de prise;
- e) configuration des enroulements et nombre de parties actives (avec un schéma des connexions), ou symbole de couplage, ou les deux;
- f) toute limitation de la capacité de dévoltage;
- g) tout courant maximal admissible à des positions de prise particulières (en raison, par exemple, du courant maximal admissible du changeur de prises);
- h) nombre de positions de prise pour lesquelles le système de commande permettra aux PST d'être déphasés et durée de la condition à l'état déphasé;
- i) méthode de mise en parallèle dans le système de commande.

Annexe B **(informative)**

Comportement d'un transformateur déphaseur face à des courants de défaut non symétriques

Les transformateurs déphaseurs ont la caractéristique de posséder un enroulement série connecté en série aux bornes de ligne d'un réseau électrique. La tension à vide apparaissant sur cet enroulement série à la position de prise extrême est habituellement inférieure à la tension phase-terre assignée du système. Au cours d'une situation de défaut non symétrique, telle qu'un défaut entre un conducteur monophasé et la terre sur l'une des bornes, cet enroulement série peut être soumis à une surtension exprimée par le rapport entre la tension du système et la tension de l'enroulement série.

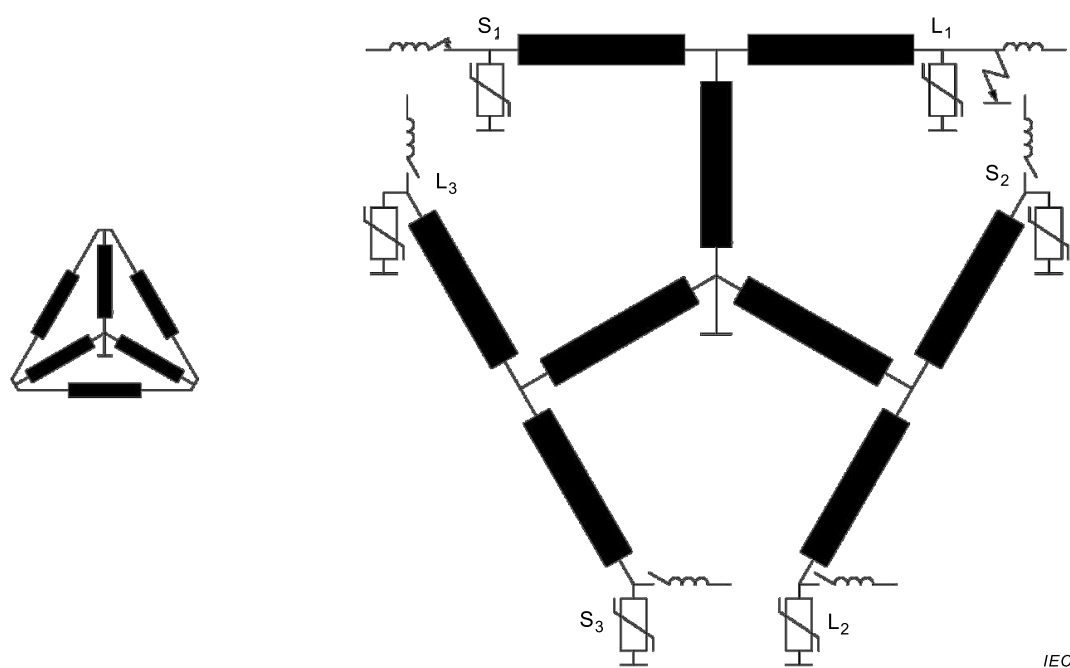
Normalement, un défaut entre le PST et le disjoncteur est coupé en ouvrant les disjoncteurs des deux côtés (côtés source et charge) du PST. Il est peu probable que les ouvertures des disjoncteurs sur chaque phase soient simultanées, la coupure sur la phase conduisant le défaut se produisant habituellement en dernier. Ceci est montré sur la Figure B.1 pour le disjoncteur connecté à la borne S1. Cela signifie qu'une alimentation monophasée momentanée (supérieure à la tension assignée) est appliquée à l'un des enroulements série du PST. Etant donné que les autres phases peuvent déjà être en circuit ouvert, cela peut être considéré comme une situation à vide avec des tensions significativement supérieures à la tension assignée apparaissant aux bornes déconnectées.

Des surtensions momentanées assez importantes entre la phase et la terre sur les bornes des autres phases (coupées) peuvent alors survenir. Les niveaux des surtensions dépendent de l'angle à vide, de la position de prise du PST, du ou des types du ou des circuits magnétiques, de la présence ou non d'un enroulement connecté en triangle, ainsi que de la disposition des enroulements internes. Généralement, une position de prise située à une prise de la position neutre donne les tensions les plus élevées.

C'est pourquoi toutes les bornes d'un déphaseur doivent être protégées au moyen de parafoudres adéquats entre la ligne et le sol. Les parafoudres doivent être connectés le plus possible directement aux bornes, mais assurément entre le déphaseur et le disjoncteur.

L'effet de la tension phase-terre (diminuée par l'impédance du système) appliquée le long de l'enroulement série dans des conditions de court-circuit sur les deux enroulements et toute résistance non linéaire interne doivent être pris en compte dans la conception (voir également Article 8).

Ce phénomène est décrit dans le CIGRE-paper A2-207 [8].



IEC

**Figure B.1 – PST équipé d'une protection monophasée
contre les défauts et les surtensions**

Annexe C (informative)

Exemple de spécification de la capacité de dévoltage

Le Tableau C.1 donne un exemple de la spécification des exigences de puissance assignée et de surcharge pour un transformateur déphaseur devant proposer une capacité de dévoltage.

Dans ce cas, la capacité de surcharge maximale est exigée sur la prise neutre et les deux premières prises, mais un régime assigné réduit est acceptable sur la prise de dévoltage extrême.

Les caractéristiques assignées de capacité de dévoltage devraient être spécifiées à la fréquence et à la tension assignées (ou à toute autre fréquence et toute autre tension particulières).

Tableau C.1 – Capacité du PST exigée en mode dévolteur

Numéro de prise	Angle de phase à vide	Puissance assignée	Régime de surcharge assigné 6 h	Régime assigné 10 min
		MVA	MVA	MVA
1	34	75	75	75
2	32	80	80	80
3	30	85	85	85
4	28	90	90	90
5	26	95	95	95
6	24	100	100	100
7	22	100	105	105
8	20	100	110	110
9	18	100	115	115
10	16	100	120	120
11	14	100	120	125
12	12	100	120	130
13	10	100	120	135
14	8	100	120	140
15	6	100	120	145
16	4	100	120	150
17	2	100	120	150
18	0	100	120	150

Annexe D **(informative)**

Mesures de bruit supplémentaires

Le bruit à vide du PST varie en fonction de la position de prise, car l'excitation du ou des circuits magnétiques peut varier avec la position de prise. Pour les changeurs de prises de type à bobine d'inductance, les positions de prise de liaison pourraient devoir être examinées si le PST incorpore un autotransformateur préventif (voir définition dans l'IEEE Std C57.12.80). La proportion de la charge et donc du bruit en charge dans les différents enroulements varie également en fonction de la position de prise. Les conditions importantes de charge et de position de prise doivent donc être étudiées lors de la spécification des niveaux de bruit maximaux garantis. Par ailleurs, l'excitation du circuit magnétique augmentera lorsque le PST est en mode dévolteur et des mesures supplémentaires du bruit à vide à une tension supérieure à la tension assignée seront exigées pour pouvoir calculer le niveau de bruit dans ces conditions. Le niveau de cette tension supérieure devra être fixé par accord, mais la tension supérieure calculée en tant que base de l'essai de tension induite (IVPD) (voir 13.12.2) peut être utilisée comme référence.

Les mesures exigées sur un appareil complet sont les suivantes:

- a) bruit à vide à la position de prise à déphasage nul et à la tension assignée;
- b) bruit à vide à la position de prise extrême et à la tension assignée;
- c) bruit à vide à la position de prise extrême et à une tension supérieure autant que possible représentative de la condition de dévoltage surexcitée;

NOTE Le coefficient de surexcitation est le résultat de la tension supplémentaire sur le circuit intermédiaire et de l'ajout du flux de fuite et du flux principal dans les culasses. Un calcul du flux de fuite pour évaluer l'impact de la distribution de la densité de flux dans le circuit magnétique sur le bruit résultant peut s'avérer nécessaire pour calculer le coefficient de surexcitation équivalent dans un circuit magnétique excité de manière uniforme.

- d) bruit dû au courant de charge à la prise à déphasage nul et au courant assigné;
- e) bruit en charge à la position de prise extrême et au courant assigné;
- f) bruit du refroidisseur s'il n'est pas inclus dans une autre mesure.

Les mesures exigées lorsque l'appareil d'excitation et l'appareil série peuvent être séparés sont les suivantes:

- 1) bruit à vide de l'appareil d'excitation à la tension assignée
- 2) bruit à vide de l'appareil d'excitation à une tension équivalente à la position de prise extrême et à la tension assignée (cette tension étant inférieure à a));
- 3) bruit à vide de l'appareil série soumise à excitation à la position de prise extrême et à la tension assignée;
- 4) bruit à vide de l'appareil d'excitation à une tension supérieure autant que possible représentative de la surexcitation produite en mode dévolteur;
- 5) bruit à vide de l'appareil série à une tension supérieure autant que possible représentative de la surexcitation produite en mode dévolteur;
- 6) bruit en charge de l'appareil d'excitation au courant assigné;
- 7) bruit en charge de l'appareil série au courant assigné;
- 8) bruit de l'équipement de refroidissement de l'appareil d'excitation;
- 9) bruit de l'équipement de refroidissement de l'appareil série.

La tension supérieure représentative de la condition de dévoltage surexcitée pour une position de prise donnée est différente pour l'appareil d'excitation et l'appareil série. La tension supérieure doit être déterminée par calcul. Elle varie en fonction de la tension d'alimentation (une fluctuation doit être prise en compte), du courant de charge, du facteur de

puissance et de la position de prise. Il doit être reconnu que la condition de surexcitation causée par le fonctionnement en mode dévolteur est différente de celle causée par une augmentation de la tension à vide, car l'équilibre des flux dans les culasses de colonnes principales et les colonnes de retour sera différent. Une tension de compromis devra être trouvée à vide pour prendre en compte ce point.

Afin de pouvoir établir des fiches de calcul pour différentes conditions de charge et de tension, il peut être utile de tracer une courbe de bruit sans charge des unités série et d'excitation à différents niveaux de tension sans charge couvrant la plage appropriée.

Le Tableau D.1 donne les niveaux de bruit mesurés qui doivent être combinés pour représenter les niveaux de bruit relatifs à différentes conditions de charge. Pour connaître les lignes directrices relatives à la combinaison des mesures du niveau de bruit, voir l'IEC 60076-10.

**Tableau D.1 – Combinaisons de mesures du niveau de bruit nécessaires
à la représentation de différentes conditions de charge**

Condition de charge	Bruit à vide 1 p.u. tension		Bruit à vide à la tension de surexcitation		Bruit en charge	
	Série	Excitation	Série	Excitation	Série	Excitation
A vide Prise neutre		X				
Pleine charge Prise neutre		X			X	
Survoltage	X	X			X	X
Dévolteage			X	X	X	X

Annexe E (informative)

Calcul de l'angle de phase en charge

Les Figures E.1 à E.4 et les Formules E.1 à E.10 donnent la méthode de calcul du déphasage en charge, lorsque l'hypothèse selon laquelle la résistance est bien inférieure à l'impédance n'est pas valide, ou lorsque le facteur de puissance n'est pas égal à 1.

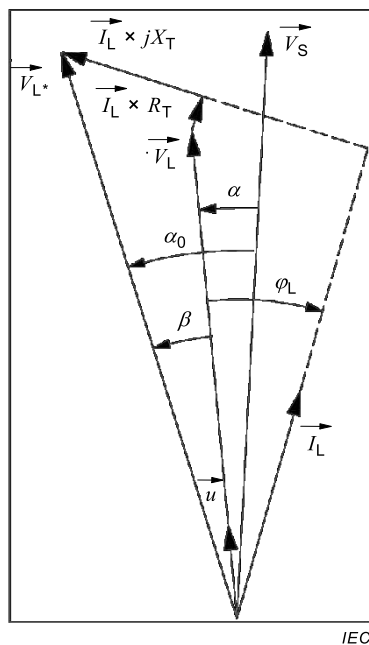


Figure E.1 – Diagramme des angles de phase d'un PST en charge où $\alpha_0 > 0$ et $\varphi_L < 0$

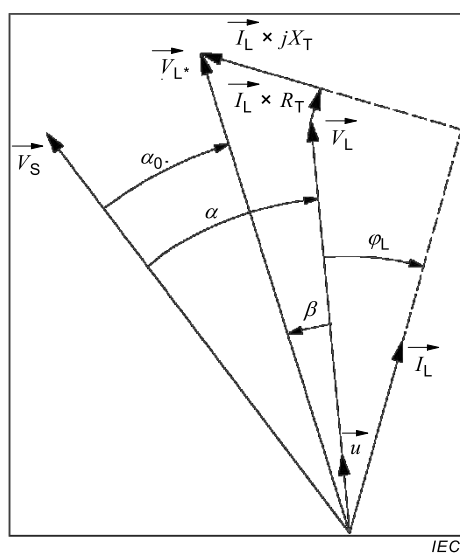


Figure E.2 – Diagramme des angles de phase d'un PST en charge où $\alpha_0 < 0$ et $\varphi_L < 0$



Figure E.4 – Diagramme des angles de phase d'un PST en charge où $\alpha_0 < 0$ et $\varphi_L > 0$



$\vec{V}_L^*$	est le vecteur de tension côté charge, à vide;
$\vec{V}_L$	est le vecteur de tension côté charge, en charge;
$\vec{V}_S$	est le vecteur de tension côté source;
$\vec{I}_L$	est le vecteur de courant de charge;
V_L, V_L^*, V_S et I_L	sont les modules des vecteurs correspondants;
φ_L	est l'angle entre $\vec{I}_L$ et $\vec{V}_L$, $\varphi_L = \left(\vec{V}_L, \vec{I}_L \right)$;

$\cos(\varphi_L)$	est le facteur de puissance de charge;
R_T	est la résistance du PST;
X_T	est la réactance du PST;
Z_T	est l'impédance complexe du PST, $Z_T = R_T + jX_T$;
β	est la chute de l'angle de charge, $\beta = (\vec{V}_L, \vec{V}_L^*)$;
α_0	est l'angle de déphasage, à vide;
α	est l'angle de déphasage, en charge.

Si $\vec{u}$ est défini comme vecteur unitaire colinéaire à $\vec{V}_L$, on peut écrire:

$$\vec{V}_L = V_L \times \vec{u}, \quad \vec{I}_L = I_L \times e^{j\varphi_L} \times \vec{u}, \quad \text{et} \quad \vec{V}_L^* = V_L^* \times e^{j\beta} \times \vec{u}.$$

En substituant $\vec{V}_L^* = \vec{V}_L + Z_T \times \vec{I}_L$ aux équations ci-dessus, l'équation devient $V_L^* \times e^{j\beta} = V_L + Z_L \times I_L \times e^{j\varphi_L}$ ou:

$$e^{j\beta} = \frac{V_L}{V_L^*} + \frac{Z_L \times I_L}{V_L^*} \times e^{j\varphi_L} \quad (\text{E.1})$$

En prenant $\frac{Z_L \times I_L}{V_L^*} = \frac{R_{T\%}}{100} + j \frac{X_{T\%}}{100}$ où $R_{T\%}$ et $X_{T\%}$ sont les résistance et réactance relatives du PST exprimées en pourcentage de la tension assignée, et en égalisant les parties réelles et imaginaires de la Formule (E.1), deux nouvelles équations sont obtenues:

$$\cos(\beta) = \frac{V_L}{V_L^*} + \frac{R_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L) - \frac{X_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L)$$

$$\sin(\beta) = \frac{R_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + \frac{X_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L)$$

alors

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + \frac{X_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L)\right) \quad (\text{E.2})$$

$$\alpha_0 = \alpha + \beta$$

$$|a_{\text{boost}}| = |\alpha_0| - |\beta| \quad (\text{E.3})$$

$$|a_{\text{buck}}| = |\alpha_0| + |\beta| \quad (\text{E.4})$$

où

$|a_{\text{boost}}|$ est la valeur absolue de l'angle de phase en charge en mode survoltage;

$|a_{\text{buck}}|$ est la valeur absolue de l'angle de phase en charge en mode dévolteur;

Il est à noter que, pour le facteur de puissance égal à 1, la Formule (E.2) devient:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{X_{T\%}}{100}\right) \quad (\text{E.5})$$

La Formule (E.1) peut s'écrire:

$$e^{j\beta} = \frac{V_L}{V_{L*}} \left(1 + \frac{Z_L \times I_L}{V_L} \times e^{j\varphi_L} \right) \quad (\text{E.6})$$

En prenant $\frac{Z_L \times I_L}{V_L} = \frac{3 \times Z_L \times I_L^2}{3 \times V_L \times I_L} = \frac{R'_{T\%}}{100} + j \frac{X'_{T\%}}{100}$, où $R'_{T\%}$ et $X'_{T\%}$ sont les résistance et réactance relatives du PST exprimées en pourcentage de la puissance assignée, l'équation devient:

$$e^{j\beta} = \frac{V_L}{V_{L*}} \left(1 + \frac{R'_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L) - \frac{X'_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + j \times \left(\frac{R'_{T\%}}{100} \times \sin(\varphi_L) + \frac{X'_{T\%}}{100} \times \cos(\varphi_L) \right) \right) \quad (\text{E.7})$$

$$\tan(\beta) = \frac{R'_{T\%} \times \sin(\varphi_L) + X'_{T\%} \times \cos(\varphi_L)}{100 + R'_{T\%} \times \cos(\varphi_L) - X'_{T\%} \times \sin(\varphi_L)} \quad (\text{E.8})$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{R'_{T\%} \times \sin(\varphi_L) + X'_{T\%} \times \cos(\varphi_L)}{100 + R'_{T\%} \times \cos(\varphi_L) - X'_{T\%} \times \sin(\varphi_L)}\right) \quad (\text{E.9})$$

Il est à noter que, pour le facteur de puissance égal à 1 et en négligeant $R'_{T\%}$, la Formule (E.9) devient:

$$\beta \approx \arctan\left(\frac{X'_{T\%}}{100}\right) \quad (\text{E.10})$$

Annexe F **(informative)**

Informations supplémentaires sur le commutateur avance/retard

F.1 Principe

Un commutateur avance/retard (ARS) permet de passer du mode de fonctionnement avance au mode de fonctionnement retard, et inversement, à la position de prise de l'angle de phase nul à vide, sans interrompre le courant de charge ni couper l'alimentation du PST.

Au cours du fonctionnement de l'ARS, le courant I est commuté en fonction d'une impédance Z (R et X), qui est formée par le trajet du câble de l'ARS au changeur de prises en charge, et retour (boucle de commutation).

F.2 Classification au sein du système de normes international

Un ARS ne peut pas être considéré comme un changeur de prises en charge (qui transfère le courant de l'une des prises d'un enroulement à prises à la suivante, en introduisant une certaine impédance dans le circuit électrique) ou comme un changeur de prises hors tension (qui ne peut fonctionner que quand le transformateur est hors tension).

De plus, la comparaison souvent utilisée avec un présélecteur (conçu pour supporter, mais non pour générer ou interrompre un courant traversant et utilisé conjointement avec le sélecteur de prises ou le sélecteur en charge) est incorrecte.

Les changeurs de prises en charge et hors tension sont couverts par les normes pertinentes relatives aux changeurs de prises (IEC 60214-1:2014 et IEEE Std C57.131:2012). Cependant, ces normes ne peuvent être utilisées que dans une certaine mesure pour l'ARS caractérisé ci-dessous.

F.3 Exigences conformes à l'IEC 60214-1 et à l'IEEE Std C57.131

La conception de l'ARS est proche de celle d'un changeur de prises hors tension et, par conséquent, les exigences concernant le type d'essai applicable aux DETC indiquées ci-dessous peuvent être utilisées:

- a) L'essai d'échauffement des contacts décrit en 7.2.2 de l'IEC 60214-1:2014 ou dans l'IEEE Std C57.131:2012 est entièrement applicable.
- b) L'essai de courant de court-circuit décrit en 7.2.3 de l'IEC 60214-1:2014 ou dans l'IEEE Std C57.131:2012 est entièrement applicable.
- c) Les essais mécaniques décrits en 7.2.4 de l'IEC 60214-1:2014 ou dans l'IEEE Std C57.131:2012 sont entièrement applicables (il est recommandé d'augmenter le nombre exigé de 20 000 opérations mécaniques pour les DETC à 100 000 opérations mécaniques pour les ARS).

NOTE En 30 ans de fonctionnement, une durée de vie des contacts dont la valeur est estimée, par hypothèse, à 100 000 opérations de l'ARS correspond à environ 10 opérations de l'ARS par jour (passage du mode avance au mode retard, et inversement).

- d) Les essais diélectriques décrits en 7.2.5 de l'IEC 60214-1:2014 ou dans l'IEEE Std C57.131:2012 sont entièrement applicables.

En plus de ces exigences, il doit être tenu compte de la durée de vie des contacts d'un ARS. L'usure des contacts provoquée par la commutation dépend du courant I qui passe à travers les contacts de l'ARS lors de la commutation, et de l'impédance Z par rapport à laquelle le courant I doit être commuté. L'usure des contacts augmente en même temps que les valeurs I

et Z . Par conséquent, la durée de vie des contacts de l'ARS est affectée de manière significative par la conception du transformateur (valeur de Z) et par la condition de charge (valeur de I).

Bibliographie

- [1] IEC 62032, *Guide for the Application, Specification and Testing of Phase-Shifting Transformers* (disponible en anglais seulement)
 - [2] IEEE Std C57.135™, *IEEE Guide for the Application, Specification and Testing of Phase-Shifting Transformers* (disponible en anglais seulement)
 - [3] IEC 60076-7, *Transformateurs de puissance – Partie 7: Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile*
 - [4] IEEE Std C57.150™, *IEEE Guide for the transportation of transformers and reactors rated 10,000 kVA or higher* (disponible en anglais seulement)
 - [5] IEEE Std 693, *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations* (disponible en anglais seulement)
 - [6] IEEE Std C57.91™, *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators* (disponible en anglais seulement)
 - [7] IEEE Std C57.149™, *IEEE Guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil immersed transformers* (disponible en anglais seulement)
 - [8] CIGRE-paper A2-207, Paris France 2006, *The Specification and Application of Large Quadrature Boosters to Restrict Post-Fault Power Flows* (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
www.iec.ch