

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-8

Première édition
First edition
1997-10

**Transformateurs de puissance –
Guide d'application**

**Power transformers –
Application guide**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60076-8:1997

Numéros des publications

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

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Accès en ligne*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Accès en ligne)*

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

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

Numbering

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

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
On-line access*
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line access)*

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

* See web site address on title page.

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

60076-8

Première édition
First edition
1997-10

**Transformateurs de puissance –
Guide d'application**

**Power transformers –
Application guide**

© IEC 1997 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX XC
PRICE CODE

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Généralités	6
2 Propriétés caractéristiques des différentes combinaisons d'enroulements triphasés et conceptions des circuits magnétiques	8
3 Propriétés caractéristiques et application aux autotransformateurs.....	16
4 Propriétés homopolaires – courant de charge du neutre et conditions de défaut à la terre, saturation magnétique et courant d'enclenchement	24
5 Calcul des courants de court-circuit pour les transformateurs triphasés à trois enroulements (transformateurs à enroulements séparés et autotransformateurs) dont les point neutres sont reliés à la terre.....	50
6 Marche en parallèle des transformateurs dans les réseaux triphasés	80
7 Calcul de la chute de tension pour une charge spécifiée, pertes dues à la charge d'un transformateur à trois enroulements	92
8 Spécification des grandeurs assignées et des grandeurs de prises.....	124
9 Application en convertisseur des transformateurs normaux	146
10 Guide pour la mesure des pertes des transformateurs de puissance	150
Annexe A – Relations fondamentales pour les défauts à la terre monophasé et biphasé...	164

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 General	7
2 Characteristic properties of different three-phase winding combinations and magnetic circuit designs	9
3 Characteristic properties and application of auto-connected transformers.....	17
4 Zero-sequence properties – neutral load current and earth fault conditions, magnetic saturation and inrush current	25
5 Calculation of short-circuit currents in three-winding, three-phase transformers (separate winding transformers and auto-connected transformers) with earthed neutrals	51
6 Parallel operation of transformers in three-phase systems.....	81
7 Calculation of voltage drop for a specified load, three-winding transformer load loss .	93
8 Specification of rated quantities and tapping quantities	125
9 Converter applications with standard transformers	147
10 Guide to the measurement of losses in power transformers.....	151
Annex A – Basic relations for single-phase and two-phase earth faults.....	165

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE – GUIDE D'APPLICATION

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60076-8 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Cette première édition de la CEI 60076-8 annule et remplace la CEI 60606 publiée en 1978. Cette édition constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/260/FDIS	14/297/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.

La CEI 60076 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: Transformateurs de puissance.

- Partie 1: 1993, Généralités
- Partie 2: 1993, Echauffement
- Partie 3: 1980, Niveaux d'isolement et essais diélectriques
- Partie 5: 1976, Tenue au court-circuit
- Partie 8: 1997, Guide d'application

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**POWER TRANSFORMERS –
APPLICATION GUIDE**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60076-8 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This first edition of IEC 60076-8 cancels and replaces IEC 60606 published in 1978. This edition constitutes a technical revision.

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

FDIS	Report on voting
14/260/FDIS	14/297/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.

IEC 60076 consists of the following parts, under the general title: Power transformers.

- Part 1: 1993, General
- Part 2: 1993, Temperature rise
- Part 3: 1980, Insulation levels and dielectric tests
- Part 5: 1976, Ability to withstand short circuit
- Part 8: 1997, Application guide

Annex A is for information only.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE – GUIDE D'APPLICATION

1 Généralités

1.1 *Domaine d'application et objet*

Cette norme s'applique aux transformateurs de puissance conformes à la série de normes CEI 60076.

Son but est d'informer les utilisateurs sur

- certaines caractéristiques fondamentales de fonctionnement des différents modes de couplage et des conceptions des circuits magnétiques avec une référence particulière au phénomène homopolaire;
- les courants de défaut des réseaux dans les transformateurs avec couplage YNynd et similaires;
- la marche en parallèle des transformateurs, le calcul de la chute ou de l'augmentation de tension due à la charge et le calcul des pertes dues à la charge pour les combinaisons de charge à trois enroulements;
- la sélection des grandeurs assignées et des grandeurs de prises au moment de l'achat, en se basant sur les conditions prévisionnelles;
- l'application des transformateurs normaux à la charge par convertisseur;
- les techniques de mesure et de précision lors de la mesure des pertes.

Une partie de ces informations est de nature générale et est applicable à tous les transformateurs de puissance quelle que soit leur taille. D'autres chapitres traitent, cependant, des aspects du problème ne concernant que la spécification et l'utilisation des grandes unités à haute tension.

Les recommandations ne sont pas obligatoires et ne constituent pas en elles-mêmes des prescriptions de spécification.

Les informations relatives à la capacité de charge des transformateurs de puissance sont précisées dans la CEI 60354 pour les transformateurs immergés dans l'huile, et dans la CEI 60905 pour les transformateurs du type sec.

Des recommandations pour l'exécution des essais de choc sur les transformateurs de puissance sont fournies dans la CEI 60722.

1.2 *Références normatives*

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(421):1990, *Vocabulaire électrotechnique international (VEI) – Chapitre 421: Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

CEI 60076, *Transformateurs de puissance*

CEI 60076-1:1993, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

POWER TRANSFORMERS – APPLICATION GUIDE

1 General

1.1 *Scope and object*

This Standard applies to power transformers complying with the series of publications IEC 60076.

It is intended to provide information to users about:

- certain fundamental service characteristics of different transformer connections and magnetic circuit designs, with particular reference to zero-sequence phenomena;
- system fault currents in transformers with YNyn and similar connections;
- parallel operation of transformers, calculation of voltage drop or rise under load, and calculation of load loss for three-winding load combinations;
- selection of rated quantities and tapping quantities at the time of purchase, based on prospective loading cases;
- application of transformers of conventional design to converter loading;
- measuring technique and accuracy in loss measurement.

Part of the information is of a general nature and applicable to all sizes of power transformers. Several chapters, however, deal with aspects and problems which are of the interest only for the specification and utilization of large high-voltage units.

The recommendations are not mandatory and do not in themselves constitute specification requirements.

Information concerning loadability of power transformers is given in IEC 60354, for oil-immersed transformers, and IEC 60905, for dry-type transformers.

Guidance for impulse testing of power transformers is given in IEC 60722.

1.2 *Normative references*

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent edition of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(421):1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 421: Power transformers and reactors*

IEC 60076: *Power transformers*

IEC 60076-1:1993, *Power transformers – Part 1: General*

CEI 60076-3:1980, *Transformateurs de puissance – Partie 3: Niveaux d'isolement et essais diélectriques*

CEI 60289:1988, *Bobines d'inductance*

CEI 60354:1991, *Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile*

CEI 60722:1982, *Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manoeuvre des transformateurs de puissance et des bobines d'inductance*

CEI 60905:1987, *Guide de charge pour transformateurs de puissance du type sec*

CEI 60909:1988, *Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif*

CEI 60909-1:1991, *Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif – Partie 1: Facteurs pour le calcul des courants de court-circuit dans les réseaux alternatifs triphasés conformément à la CEI 60909 (1988)*

CEI 60909-2:1992, *Matériel électrique – Données pour le calcul des courants de court-circuit conformément à la CEI 60909 (1988)*

CEI 61378-1:1997, *Transformateurs de conversion – Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles*

ISO 9001:1994, *Systèmes qualité – Modèle pour l'assurance de la qualité en conception, développement, production, installation et prestations associées*

2 Propriétés caractéristiques des différentes combinaisons d'enroulements triphasés et conceptions des circuits magnétiques

Ce chapitre est une vue d'ensemble du sujet. Des informations complémentaires sont fournies à l'article 4 relatif aux propriétés homopolaires.

2.1 Enroulements avec couplage Y, D et Z

Il existe deux principaux couplages triphasés des enroulements de transformateur: le couplage étoile (couplage Y) et le couplage triangle (couplage D). Pour des buts spécifiques, notamment dans les transformateurs de petite puissance, un autre type de couplage appelé «couplage en zigzag» ou «Z» est aussi utilisé. Historiquement, plusieurs autres schémas ont été utilisés (triangle tronqué, triangle étendu, connexion en T, connexion en V, etc.). Tandis que de telles connexions sont utilisées dans les transformateurs pour applications spéciales, elles n'existent plus dans les réseaux de transmission de puissance et de distribution.

2.1.1 Avantages de l'enroulement à couplage Y

Ce type d'enroulement

- est plus économique pour un enroulement haute tension;
- a un point neutre disponible;
- permet la mise à la terre directe ou la mise à la terre à travers une impédance;
- permet de réduire le niveau d'isolation du neutre (isolation graduée);
- permet de loger les prises d'enroulement et les changeurs de prises à l'extrémité neutre de chaque phase;
- permet l'application d'une charge monophasée avec courant de neutre (voir 2.2 et 4.8).

IEC 60076-3:1980, *Power transformers – Part 3: Insulation levels and dielectric tests*

IEC 60289:1988, *Reactors*

IEC 60354:1991, *Loading guide for oil-immersed power transformers*

IEC 60722:1982, *Guide to the lightning impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors*

IEC 60905:1987, *Loading guide for dry-type power transformers*

IEC 60909:1988, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems*

IEC 60909-1:1991, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems – Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three-phase a.c. systems according to IEC 60909 (1988)*

IEC 60909-2:1992, *Electrical equipment – Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 60909 (1988)*

IEC 61378-1: 1997, *Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

ISO 9001: 1994, *Quality systems – Model for quality assurance in design, development, production, installation and servicing*

2 Characteristic properties of different three-phase winding combinations and magnetic circuit designs

This chapter is an overview of the subject. Additional information is given in clause 4 on zero-sequence properties.

2.1 Y-, D-, and Z-connected windings

There are two principal three-phase connections of transformer windings: star (Y-connection) and delta (D-connection). For special purposes, particularly in small power transformers, another connection named zigzag or Z is also used. Historically, several other schemes have been in use (such as "truncated delta", "extended delta", "T-connection", "V-connection", etc.). While such connections are used in transformers for special applications, they no longer appear in common power transmission systems.

2.1.1 Advantages of a Y-connected winding

This type of winding:

- is more economical for a high-voltage winding;
- has a neutral point available;
- permits direct earthing or earthing through an impedance;
- permits reduced insulation level of the neutral (graded insulation);
- permits the winding taps and tapchanger to be located at the neutral end of each phase;
- permits single-phase loading with neutral current (see 2.2 and 4.8).

2.1.2 *Avantages de l'enroulement à couplage D*

Ce type d'enroulement

- est plus économique pour un enroulement à courant fort et à basse tension;
- combiné avec un enroulement à couplage étoile, réduit l'impédance homopolaire dans cet enroulement.

2.1.3 *Avantages de l'enroulement à couplage Z*

Ce type d'enroulement

- peut recevoir une charge de courant de neutre avec une basse impédance homopolaire inhérente. (Il est utilisé dans les transformateurs de mise à la terre pour créer une borne neutre artificielle d'un réseau);
- réduit le déséquilibre de tension dans les réseaux où la charge n'est pas répartie également entre les phases.

2.2 *Propriétés caractéristiques des combinaisons de couplages d'enroulements*

La notation des couplages des enroulements de transformateur suit les conventions de la CEI 60076-1, article 6.

Ce paragraphe est un résumé du comportement au courant de neutre des différentes combinaisons d'enroulement. On fait référence à de telles conditions comme ayant des «composantes homopolaires» de courant et de tension. Les articles 4 et 5 traitent de ce concept.

Ces énoncés sont également valables pour les bancs triphasés de transformateurs monophasés couplés ensemble extérieurement.

2.2.1 *YNyn et YNauto*

Le courant homopolaire peut circuler entre les enroulements avec ampères-tours équilibrés, rencontrant une faible impédance de court-circuit dans le transformateur. Les transformateurs de réseaux dotés de telles connexions peuvent en outre être équipés d'un enroulement de stabilisation à couplage triangle (voir 4.7.2 et 4.8).

2.2.2 *YNy et Yyn*

Le courant homopolaire dans l'enroulement avec neutre mis à la terre n'a pas d'ampères-tours équilibrés dans l'enroulement opposé, dans lequel le neutre n'est pas mis à la terre. Il constitue donc un courant magnétisant pour le circuit magnétique et est contrôlé par une impédance magnétisante homopolaire. L'impédance est forte ou très forte, selon la conception du circuit magnétique (voir 2.3). La symétrie des tensions entre phase et neutre sera affectée et il peut exister des limitations du courant homopolaire permis provoquées par l'échauffement du flux de fuite parasite (voir 4.8).

2.2.3 *YNd, Dyn, YNyd (tertiaire avec capacité de charge) ou YNy + d (enroulement de stabilisation en triangle sans capacité de charge)*

Le courant homopolaire de l'enroulement en étoile avec neutre mis à la terre provoque un courant de circulation de compensation dans l'enroulement triangle. L'impédance est faible, approximativement égale à l'impédance directe de court-circuit entre les enroulements.

S'il existe deux enroulements en étoile avec neutres mis à la terre (y compris le cas de l'autotransformateur avec neutre commun), on trouve un cas d'application d'une charge à trois enroulements pour un courant homopolaire. Cette situation est traitée en 4.3.2 et en 4.7.2 et dans l'article 5.

2.1.2 *Advantages of a D-connected winding*

This type of winding:

- is more economical for a high-current, low-voltage winding;
- in combination with a star-connected winding, reduces the zero-sequence impedance in that winding.

2.1.3 *Advantages of a Z-connected winding*

This type of winding:

- permits neutral current loading with inherently low zero-sequence impedance. (It is used for earthing transformers to create an artificial neutral terminal of a system);
- reduces voltage unbalance in systems where the load is not equally distributed between the phases.

2.2 *Characteristic properties of combinations of winding connections*

The notation of winding connections for the whole transformer follows the conventions in IEC 60076-1, clause 6.

This subclause is a summary of the neutral current behaviour in different winding combinations. Such conditions are referred to as having "zero-sequence components" of current and voltage. This concept is dealt with further in clauses 4 and 5.

The statements are also valid for three-phase banks of single-phase transformers connected together externally.

2.2.1 *YNyn and YNauto*

Zero-sequence current may be transformed between the windings under ampere-turn balance, meeting low short-circuit impedance in the transformer. System transformers with such connections may in addition be provided with delta equalizer winding (see 4.7.2 and 4.8).

2.2.2 *YNy and Yyn*

Zero-sequence current in the winding with earthed neutral does not have balancing ampere-turns in the opposite winding, where the neutral is not connected to earth. It therefore constitutes a magnetizing current for the iron core and is controlled by a zero-sequence magnetizing impedance. This impedance is high or very high, depending on the design of the magnetic circuit (see 2.3). The symmetry of the phase-to-neutral voltages will be affected and there may be limitations for the allowable zero-sequence current caused by stray-flux heating (see 4.8).

2.2.3 *YNd, Dyn, YNyd (loadable tertiary) or YNy + d (non-loadable delta equalizer winding)*

Zero-sequence current in the star winding with earthed neutral causes compensating circulating current to flow in the delta winding. The impedance is low, approximately equal to the positive-sequence short-circuit impedance between the windings.

If there are two star windings with earthed neutrals (including the case of auto-connection with common neutral), there is a three-winding loading case for zero-sequence current. This is dealt with in 4.3.2 and 4.7.2, and in clause 5.

2.2.4 *Yzn ou ZNy*

Le courant homopolaire dans l'enroulement en zigzag produit un équilibre d'ampères-tours inhérent entre les deux moitiés de l'enroulement sur chaque noyau et fournit une faible impédance de court-circuit.

2.2.5 *Bancs triphasés de grandes unités monophasées – utilisation d'un enroulement tertiaire à couplage triangle*

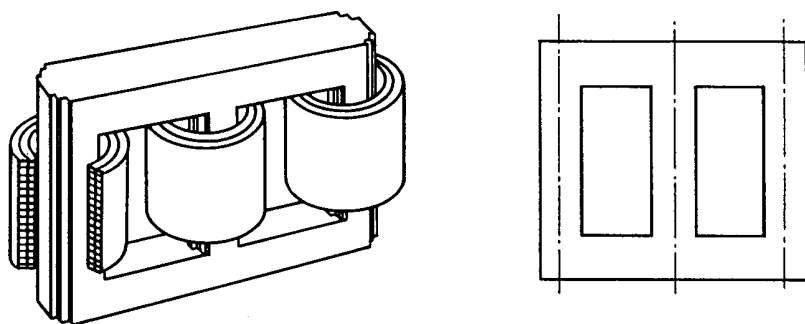
Dans certains pays, les transformateurs pour l'interconnexion des réseaux haute tension sont en général construits en bancs d'unités monophasées. Le coût, la masse et les pertes d'un tel banc sont supérieurs à ceux d'un transformateur triphasé correspondant (dans la mesure où il peut être réalisé). L'avantage du concept du banc est le coût relativement faible d'une quatrième unité de secours pouvant servir de réserve stratégique. Il se peut aussi que l'unité triphasée correspondante dépasse la limite de la masse d'expédition.

Les trois transformateurs monophasés apportent des circuits magnétiques indépendants, représentant une impédance très magnétisante pour une composante homopolaire de tension.

Il peut être nécessaire de prévoir un enroulement de stabilisation en triangle dans le banc ou encore d'avoir une puissance auxiliaire à relativement basse tension provenant d'un enroulement tertiaire. Cela peut être réalisé par une connexion extérieure barre omnibus entre unités de la station. La connexion externe représente un risque supplémentaire de défaut à la terre ou de court-circuit sur l'enroulement tertiaire combiné du banc.

2.3 *Différentes conceptions de circuits magnétiques*

La conception du circuit magnétique la plus fréquente pour un transformateur triphasé est le circuit magnétique à trois colonnes (voir figure 1). Trois colonnes verticales parallèles sont reliées sur les parties inférieure et supérieure par des culasses horizontales.



IEC 1119/97

Figure 1 – Circuit magnétique à trois colonnes

Le circuit magnétique à cinq colonnes (voir figure 2) comporte trois colonnes bobinées et deux colonnes latérales non bobinées de section droite moins importante. Les culasses raccordant les cinq colonnes comportent aussi une section droite réduite si on la compare aux colonnes bobinées.

2.2.4 *Yzn or ZNy*

Zero-sequence current in the zigzag winding produces an inherent ampere-turn balance between the two halves of the winding on each limb, and provides a low short-circuit impedance.

2.2.5 *Three-phase banks of large single-phase units – use of delta connected tertiary windings*

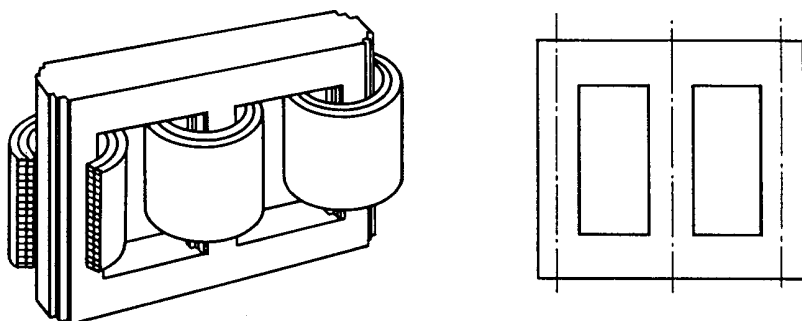
In some countries, transformers for high-voltage system interconnection are traditionally made as banks of single-phase units. The cost, mass, and loss of such a bank is larger than for a corresponding three-phase transformer (as long as it can be made). The advantage of the bank concept is the relatively low cost of providing a spare fourth unit as a strategic reserve. It may also be that a corresponding three-phase unit would exceed the transport mass limitation.

The three single-phase transformers provide independent magnetic circuits, representing high magnetizing impedance for a zero-sequence voltage component.

It may be necessary to provide a delta equalizer winding function in the bank, or there may be a need for auxiliary power at relatively low-voltage from a tertiary winding. This can be achieved by external busbar connection from unit to unit in the station. The external connection represents an additional risk of earth fault or short circuit on the combined tertiary winding of the bank.

2.3 *Different magnetic circuit designs*

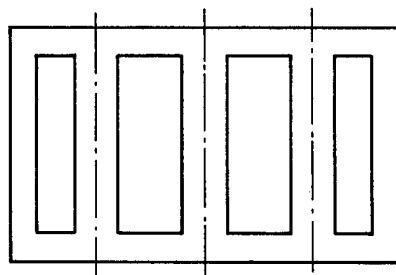
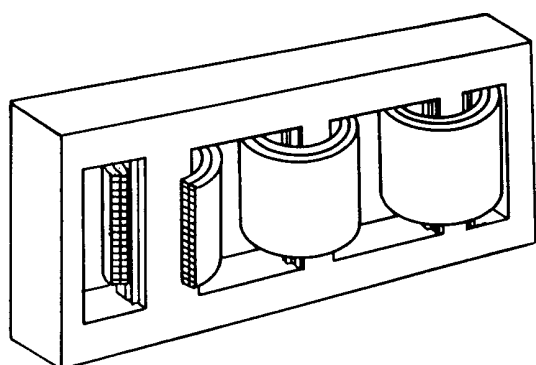
The most common magnetic circuit design for a three-phase transformer is the three-limb core-form (see figure 1). Three parallel, vertical limbs are connected at the top and bottom by horizontal yokes.



IEC 1119/97

Figure 1 – Three-limb, core-form magnetic circuit

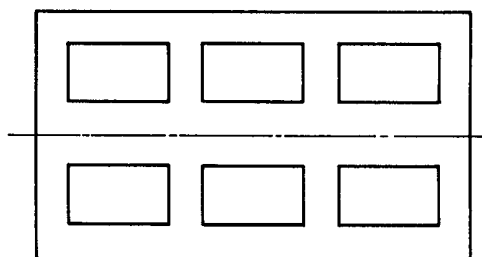
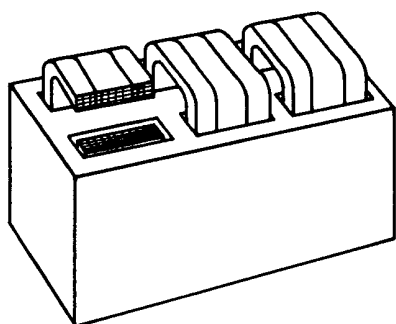
The five-limb, core-form magnetic circuit (see figure 2) has three limbs with windings and two unwound side limbs of lesser cross-section. The yokes connecting all five limbs also have a reduced cross-section in comparison with the wound limbs.



IEC 1120/97

Figure 2 – Circuit magnétique à cinq colonnes

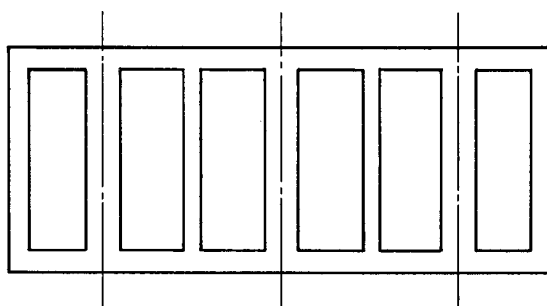
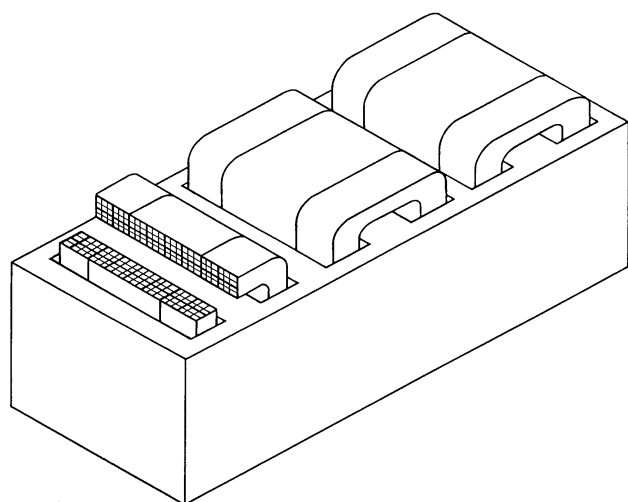
La conception conventionnelle cuirassée triphasée (voir figure 3) est formée d'un cadre doté de trois noyaux bobinés horizontaux et disposant d'une ligne centrale commune. Les noyaux en tôles magnétiques à l'intérieur des enroulements ont une section droite essentiellement rectangulaire et les parties adjacentes du circuit magnétique entourent les enroulements comme une cuirasse.



IEC 1121/97

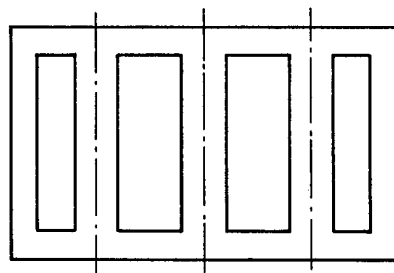
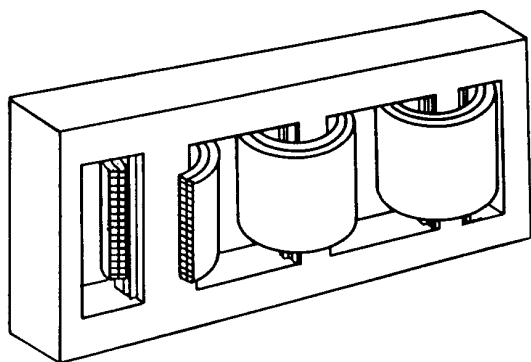
Figure 3 – Circuit magnétique cuirassé triphasé conventionnel

Un nouveau circuit magnétique triphasé cuirassé est le circuit à sept colonnes, dans lequel les noyaux bobinés sont orientés de manière différente (voir figure 4).



IEC 1122/97

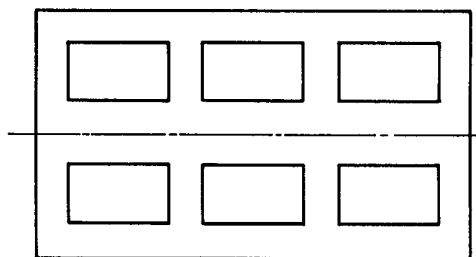
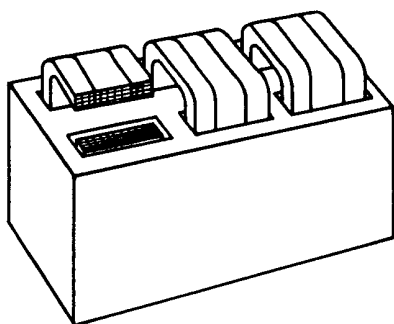
Figure 4 – Circuit magnétique cuirassé triphasé à sept branches



IEC 1120/97

Figure 2 – Five-limb, core-form magnetic circuit

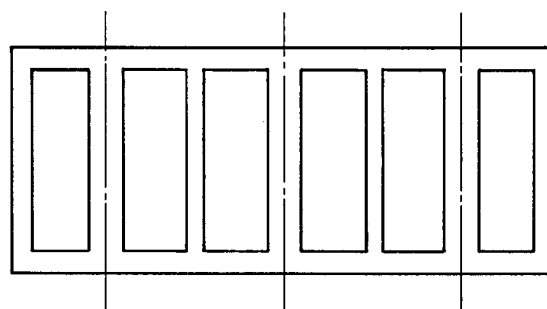
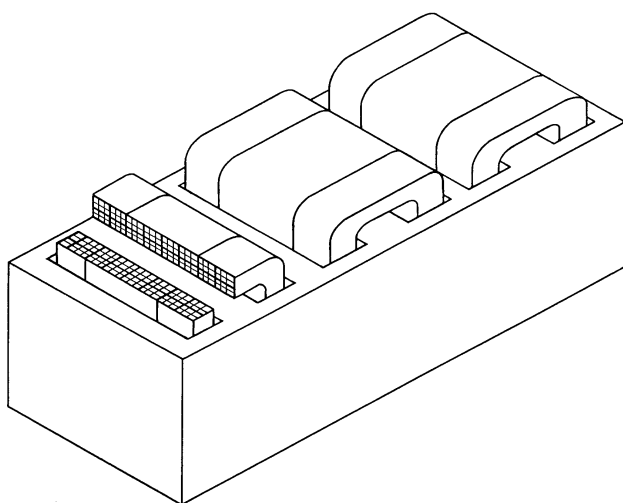
The conventional shell-form three-phase design has a frame with the three wound limbs horizontal and having a common centre line (see figure 3). The core-steel limbs inside the windings have an essentially rectangular cross-section and the adjoining parts of the magnetic circuit surround the windings like a shell.



IEC 1121/97

Figure 3 – Three-phase conventional shell-form magnetic circuit

A new three-phase shell-form magnetic circuit is the seven-limb core, in which the wound limbs are oriented in a different way (see figure 4).



IEC 1122/97

Figure 4 – Three-phase seven-limb shell-form magnetic circuit

La principale différence entre ces conceptions qui doit être traitée ici réside dans leur comportement lorsqu'elles sont soumises à un ensemble de tensions triphasées déséquilibrées ayant une somme non nulle, c'est-à-dire ayant une composante homopolaire.

Cette condition peut aussi être décrite en commençant par le courant homopolaire sans équilibrage des ampères-tours dans tous les autres enroulements. Un tel courant apparaît comme un courant magnétisant pour le circuit magnétique et est contrôlé par l'impédance magnétisante à travers laquelle une chute de tension homopolaire se développe.

Les types habituels de circuits magnétiques se comportent comme indiqué ci-dessous.

2.3.1 *Circuit magnétique à trois colonnes*

Dans le transformateur à circuit magnétique à trois colonnes, les composantes de flux directe et inverse dans les noyaux bobinés (qui ont chacune une somme nulle à chaque instant) s'annulent via les culasses, mais le flux résiduel homopolaire doit trouver un chemin de retour en dehors des enroulements de culasse à culasse. Ce flux «fuite de culasse» externe voit une grande valeur de réluctance, et, pour une quantité de flux (une tension homopolaire appliquée donnée), une force magnétomotrice considérable (courant hautement magnétisant) est nécessaire. En termes de circuit électrique, le phénomène représente donc une impédance (magnétisante) homopolaire relativement faible. Cette impédance varie de façon non linéaire avec l'amplitude de la composante homopolaire.

Réciproquement, le courant homopolaire non compensé constitue un courant magnétisant qui est contrôlé par une impédance magnétisante homopolaire. Le résultat est une dissymétrie superposée de tensions phase-neutre, la composante homopolaire de tension.

Le flux de fuite de culasse homopolaire induit des courants de Foucault et de circulation dans le dispositif de serrage et dans la cuve, entraînant des pertes parasites supplémentaires dans ces constituants. Dans les enroulements, une augmentation des pertes par courants de Foucault provoquée par le flux anormalement parasité peut également se produire. Il existe des limitations dans l'amplitude permise du courant de neutre en service en longue période. Ce problème est évoqué en 4.8.

2.3.2 *Circuit magnétique à cinq colonnes ou circuit magnétique cuirassé*

Dans un transformateur à cinq colonnes ou dans un transformateur cuirassé, des chemins de retour existent pour le flux homopolaire par l'intermédiaire des parties non bobinées du circuit magnétique (jambes de retour de flux du circuit magnétique à cinq colonnes, parties extérieures du cadre de la cuirasse, et pour les circuits magnétiques cuirassés à sept branches, les deux branches non bobinées entre jambes bobinées). Le flux homopolaire voit une faible réluctance magnétisante équivalente à une impédance fortement magnétisante similaire à celle d'une tension directe normale. Cela s'applique jusqu'à une certaine limite où les parties non bobinées du circuit magnétique atteignent la saturation. De plus, l'inductance chute, donnant lieu à un courant déformé en pointe.

Un banc triphasé de transformateurs monophasés réagit de la même manière. Les circuits magnétiques sont séparés et indépendants quelle que soit la tension de service appliquée.

A cause du phénomène décrit ci-dessus, il est habituel d'équiper de tels transformateurs ou bancs de transformateurs d'enroulements de stabilisation à couplage triangle (voir article 4).

3 Propriétés caractéristiques et application aux autotransformateurs

3.1 Par définition, un autotransformateur est un transformateur dont au moins deux enroulements ont une partie commune (voir 3.1.2 de la CEI 60076-1).

The principal difference between the designs, to be discussed here, lies in their behaviour when subjected to an asymmetrical three-phase set of voltages having a non-zero sum i.e. having a zero-sequence component.

This condition may also be described as starting from a zero-sequence current without balancing ampere-turns in any other winding. Such a current appears as a magnetizing current for the magnetic circuit and is controlled by a magnetizing impedance, across which a zero-sequence voltage drop is developed.

The usual types of magnetic circuits behave as follows.

2.3.1 Three-limb core-form magnetic circuit

In the three-limb core-form transformer, positive and negative sequence flux components in the wound limbs (which have a zero sum at every instant) cancel out via the yokes, but the residual zero-sequence flux has to find a return path from yoke to yoke outside the excited winding. This external yoke leakage flux sees high reluctance and, for a given amount of flux (a given applied zero-sequence voltage), a considerable magnetomotive force (high magnetizing current) is required. In terms of the electrical circuit, the phenomenon therefore represents a relatively low zero-sequence (magnetizing) impedance. This impedance varies in a non-linear way with the magnitude of the zero-sequence component.

Conversely, uncompensated zero-sequence current constitutes a magnetizing current which is controlled by the zero-sequence magnetizing impedance. The result is a superposed asymmetry of the phase-to-neutral voltages, the zero-sequence voltage component.

The zero-sequence yoke leakage flux induces circulating and eddy currents in the clamping structure and the tank, generating extra stray losses in these components. There could also be increased eddy losses in the windings caused by the abnormal stray flux. There are limitations to the magnitude of any long duration neutral current which is allowable in service. This is considered in 4.8.

2.3.2 Five-limb core-form, or shell-form magnetic circuit

In a five-limb core-form, or a shell-form transformer, there are return paths available for the zero-sequence flux through unwound parts of the magnetic circuit (side limbs of five-limb core, outside parts of the shell frame plus, and for the seven-limb shell-form core, the two unwound inter-winding limbs). The zero-sequence flux sees low magnetic reluctance equivalent to a very high magnetizing impedance, similar to that of normal positive-sequence voltage. This applies up to a limit, where the unwound parts of the magnetic circuit reach saturation. Above that, the impedance falls off, resulting in peaked, distorted current.

A three-phase bank of single-phase transformers reacts similarly. The magnetic circuits are separate and independent at any applied service voltage.

Due to the phenomena described above, it is customary to provide such transformers or transformer banks with a delta-connected stabilizing winding (see clause 4).

3 Characteristic properties and application of auto-connected transformers

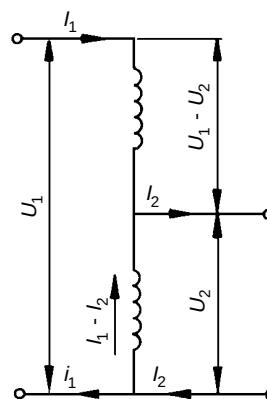
3.1 By definition, an auto-connected transformer is a transformer in which at least two windings have a common part (see 3.1.2 of IEC 60076-1).

Le schéma unifilaire de la figure 5 représente un autotransformateur à deux enroulements. Le côté haute tension du transformateur (représenté par U_1, I_1 dans la figure) est composé de l'enroulement commun ainsi que de l'enroulement série. Le côté basse tension (U_2, I_2) n'est composé que de l'enroulement commun. La haute et la basse tension sont électriquement connectées.

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 = S$$

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_2} = \alpha$$

$$(U_1 - U_2) I_1 = U_2 (I_2 - I_1) = \alpha S$$



IEC 1123/97

Figure 5 – Autotransformateur, schéma unifilaire

3.2 Le facteur de réduction ou le facteur de l'autotransformateur α

Pour la même puissance traversante, l'autotransformateur est physiquement plus petit et ses pertes sont plus faibles qu'un transformateur à enroulements séparés. Plus le rapport de transformation est proche de l'unité, plus l'économie relative est grande. Les deux enroulements (série et commun) représentent l'équivalent des puissances assignées ou, en d'autres termes, l'équilibrage des ampères-tours. Les relations décrites à la figure 5 expliquent immédiatement le facteur de réduction α de la connexion en autotransformateur. Si S est la puissance assignée des enroulements autoconnectés, écrite sur la plaque signalétique, le transformateur est équivalent, eu égard aux dimensions et masses physiques, à un transformateur à enroulements séparés ayant une puissance assignée $\alpha \times S$. Cela se rapporte souvent à des expressions telles que puissance assignée intrinsèque ou puissance assignée équivalente à deux enroulements.

Exemple

Un autotransformateur 420/240 kV, 300 MVA est comparable à un transformateur à enroulements séparés ayant une puissance assignée de

$$((420 - 240)/420) \times 300 = 129 \text{ MVA}$$

Si le transformateur est en outre fourni avec un enroulement séparé à couplage triangle d'une puissance assignée de 100 MVA (YNauto d 300/300/100 MVA), la puissance de dimensionnement équivalente à deux enroulements sera donc de

$$(129 + 129 + 100)/2 = 179 \text{ MVA}$$

3.3 Impédance de court-circuit et effets du flux de fuite

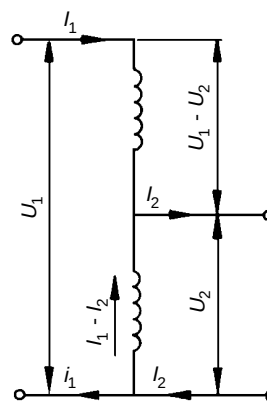
L'impédance de court-circuit d'un transformateur peut être décrite physiquement en termes de puissance réactive dans le champ de fuite, puissance qui à son tour dépend de la taille physique et de la géométrie des enroulements.

The single line diagram of an auto-transformer is shown in figure 5. The high-voltage side of the transformer (identified with U_1 , I_1 in the figure) consists of the common winding together with the series winding. The low-voltage side (U_2 , I_2) consists of the common winding alone. The high- and low-voltage systems are electrically connected.

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 = S$$

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_2} = \alpha$$

$$(U_1 - U_2) I_1 = U_2 (I_2 - I_1) = \alpha S$$



IEC 1123/97

Figure 5 – Auto-connected transformer, single-line diagram

3.2 The reduction factor or auto-factor, α

The auto-transformer is physically smaller and has lower losses than a separate winding transformer for the same throughput power. The relative saving is greater the closer the transformation ratio is to unity. The two windings (series and common) represent the same equivalent power ratings or, expressed in other terms, balancing ampere-turns. The relations shown in figure 5 immediately explain the reduction factor, α , of the auto-connection. If S is the rated power of the auto-connected windings, noted on the rating plate, then the transformer is similar, with regard to physical size and mass, to a separate winding transformer having rated power $\alpha \times S$. This is often referred to with expressions such as intrinsic rated power or equivalent two-winding rating.

Example

An auto-connected transformer 420/240 kV, 300 MVA, is comparable with a separate winding transformer having a rated power of:

$$((420 - 240)/420) \times 300 = 129 \text{ MVA}$$

If the transformer in addition is provided with a non-auto-connected tertiary winding of 100 MVA rated power (YNauto d 300/300/100 MVA), then its equivalent two-winding rating will be

$$(129 + 129 + 100)/2 = 179 \text{ MVA}$$

3.3 Short-circuit impedance and leakage flux effects

The short-circuit impedance of a transformer may be described physically in terms of the reactive power in the leakage field. This in turn depends on the physical size and geometry of the windings.

Pour un autotransformateur de dimensions réduites, la puissance réactive dans le champ de fuite est naturellement inférieure à celle d'un transformateur à enroulements séparés de même puissance assignée. Son impédance exprimée en pourcentage sera donc proportionnellement plus faible. Le facteur de l'autotransformateur α fait également partie de l'évaluation de l'impédance de court-circuit exprimée en pourcentage.

Cependant, on peut aussi observer que, si l'impédance exprimée en pourcentage d'un autotransformateur est spécifiée avec une valeur élevée (dans le but d'une limitation de l'amplitude du courant de défaut du côté réseau secondaire), ce transformateur sera, sur le plan de la conception, physiquement une petite unité avec un champ de fuite particulièrement important. Cela se traduira par des pertes supplémentaires élevées (pertes par courants de Foucault dans les enroulements aussi bien que pertes dues au flux de fuite dans les parties mécaniques) et même par de possibles effets de saturation dus à la circulation des flux de fuite en partie au travers du circuit magnétique. De tels effets restreindraient la capacité de charge de l'unité au-dessus des conditions assignées, mais cela n'est pas mis en évidence par des essais normaux.

Le guide de charge pour transformateurs de puissance, CEI 60354, prend en compte ces phénomènes quand il sépare les transformateurs de puissance en grande et en moyenne puissance. Les autotransformateurs doivent être classifiés suivant leur puissance assignée équivalente, et leur impédance correspondante exprimée en pourcentage, à la place des valeurs écrites sur la plaque signalétique.

3.4 Restrictions du réseau, coordination de l'isolement

La connexion électrique directe entre les réseaux primaire et secondaire (triphasés) implique qu'ils auront un point neutre commun et que le couplage triphasé du transformateur est en étoile. En pratique, les réseaux seront effectivement normalement reliés à la terre et le point neutre de l'autotransformateur sera en général spécifié pour un niveau d'isolement réduit.

- S'il faut que le neutre du transformateur soit relié à la terre directement, le niveau d'isolement nécessaire est très faible (voir 5.5.2 de la CEI 60076-3).
- En variante, il peut être prévu que tous les neutres de plusieurs transformateurs ne soient pas directement mis à la terre pour réduire les courants de défauts à la terre éventuels. Les neutres non reliés à la terre seront cependant habituellement équipés d'un parafoudre pour les protéger contre les chocs transitoires. La tension assignée du parafoudre spécifié et le niveau d'isolement du neutre seront en coordination avec la tension à fréquence industrielle du réseau apparaissant au neutre isolé de la terre pendant un défaut à la terre de réseau.
- Dans les réseaux à très haute tension dotés de longues lignes aériennes, la possibilité d'un réenclenchement unipolaire peut être améliorée par la mise à la terre d'une bobine d'inductance spécialement accordée. Cela nécessite une isolation relativement élevée du neutre du transformateur, qui est connecté via la bobine d'inductance d'accord à la terre.

Du point de vue de la conception, les enroulements série d'un autotransformateur posent parfois des difficultés pour l'isolement longitudinal de l'enroulement. Il est supposé que la borne X, borne de ligne du côté basse tension, reste à un faible potentiel à l'incidence d'une surtension transitoire sur la borne de ligne côté haute tension. La contrainte correspondant à l'intégralité du niveau d'isolement au choc du côté haute tension ne sera donc distribuée que le long de l'enroulement série. Cela représente une tension correspondante entre spires plus élevée, si on la compare à la surtension du niveau d'isolement au choc du côté basse tension, distribuée le long de l'enroulement commun.

3.5 Réglage de tension dans les autotransformateurs d'interconnexion de réseaux

La variation du rapport de transformation d'un autotransformateur peut être obtenue de différentes façons. Certaines d'entre elles suivent les principes sous-jacents de 5.1 de la CEI 60076-1. D'autres ne suivent pas ces principes car le nombre des spires effectives est modifié simultanément dans les deux enroulements.

For an auto-transformer with its reduced dimensions, the reactive power in the leakage field is naturally smaller than for a separate winding transformer with the same rated power. Its impedance, expressed as a percentage, will then be correspondingly lower. The auto-connection factor, α , is also a benchmark for the percentage impedance.

However, it may also be observed that if the percentage impedance of an auto-transformer is specified with an elevated value (with a view to limiting fault-current amplitudes in the secondary-side system) then this transformer will, from a design point of view, be a physically small unit with a quite large leakage field. This will be reflected as higher additional losses (winding eddy loss as well as stray field loss in mechanical parts) and possibly even saturation effects due to leakage flux circulating in part through the magnetic circuit. Such effects would restrict the loadability of the unit above rated conditions, but this is not revealed by standard tests.

The transformer loading guide, IEC 60354, takes these phenomena into account when separating between large and medium power transformers. Auto-transformers are to be classified according to their equivalent power rating, and the corresponding percentage impedance, instead of by the rating-plate figures.

3.4 *System restrictions, insulation co-ordination*

The direct electrical connection between the primary and secondary (three-phase) systems implies that they will have a common neutral point and that the three-phase connection of the auto-transformer is in star. In practice, the systems will normally be effectively earthed and the neutral point of the auto-transformer will usually be specified with reduced insulation level.

- If the transformer neutral is to be directly earthed, the necessary insulation level is very low (see 5.5.2 of IEC 60076-3).
- It may alternatively be foreseen that not all neutrals of several transformers in a station will be directly earthed. This is in order to reduce the prospective earth fault currents. The unearthed neutrals will, however, usually be provided with a surge arrester for protection against transient impulses. The specified arrester rated voltage and the insulation level of the neutral will be co-ordinated with the power frequency voltage appearing at the unearthed neutral during a system earth fault.
- In extra-high-voltage systems with long overhead lines, the possibility of successful single-pole reclosing may be improved by specially tuned reactor earthing. This requires a relatively high insulation of the transformer neutral, which is connected via the tuning reactor to earth.

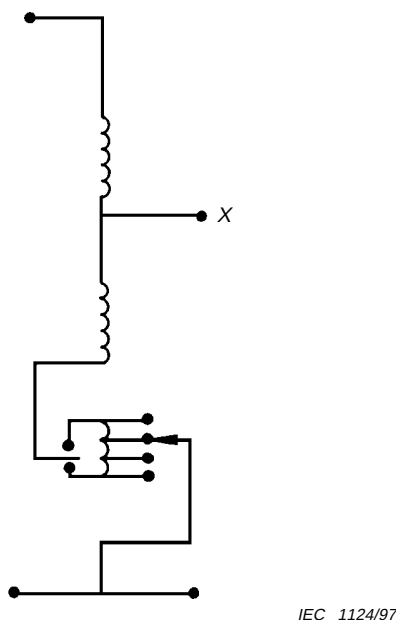
The series winding of an auto-transformer sometimes presents design difficulties for the insulation across the winding. It is assumed that the X-terminal, the low-voltage side-line terminal, stays at low potential at the incidence of a transient overvoltage on the high-voltage side-line terminal. The stress corresponding to the whole impulse insulation level of the high-voltage side will therefore be distributed along the series winding only. This represents a correspondingly higher turn-to-turn voltage, compared with an overvoltage across the low-voltage side, distributed along the common winding.

3.5 *Voltage regulation in system-interconnection autotransformers*

Variation of the voltage ratio in an auto-connected transformer may be arranged in different ways. Some of these follow the underlying principles of 5.1 of IEC 60076-1. Others do not because the number of effective turns is changed in both windings simultaneously.

Les prises de réglage seront arrangées soit du côté neutre, soit au point de jonction entre les enroulements commun et série (point commun) (voir figure 6).

3.5.1 Prises de réglage au neutre



Le réglage au neutre augmente et diminue le nombre des spires simultanément dans les enroulements haute tension et basse tension mais le rapport entre les enroulements change. Ce type de réglage sera inefficace lorsqu'il nécessitera beaucoup de spires de réglage pour une étendue spécifiée de variation du rapport de transformation. Les volts par spire dans le transformateur varieront donc considérablement le long de l'étendue du réglage (flux variable); le phénomène devient plus prononcé plus le rapport de transformation est proche de l'unité (faible valeur de α). Cela doit être couvert par un surdimensionnement correspondant du circuit magnétique. Il en résultera alors des échelons inégaux de tension.

L'avantage évident du réglage au neutre est que l'enroulement de réglage et le changeur de prises seront près du potentiel du neutre et ne nécessiteront qu'un faible niveau d'isolement par rapport à la terre.

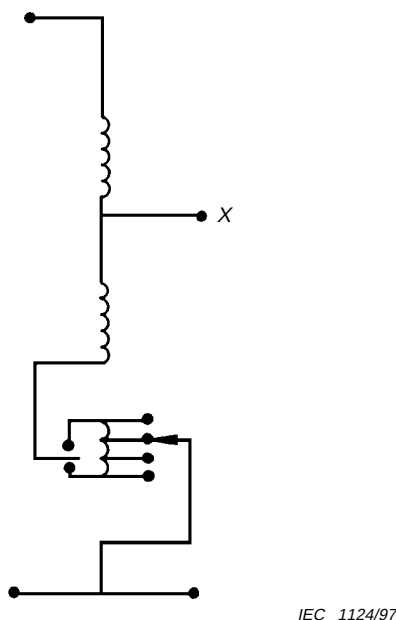
Figure 6 – Spires de réglage au neutre commun

3.5.2 Prise de réglage à la borne X

Pour que le réglage soit organisé au point commun dans le transformateur (la borne de ligne du côté basse tension), il faut que l'enroulement à prises et les changeurs de prises soient conçus avec le niveau d'isolement de la borne X. Ils seront immédiatement exposés à des surtensions transitoires à front raide provenant de chocs de foudre ou de manoeuvre. La figure 7 décrit un certain nombre d'arrangements possibles.

The tapping turns will be either at the neutral terminal or at the joint between the common and the series windings (common point) (see figure 6).

3.5.1 Tapping turns at the neutral



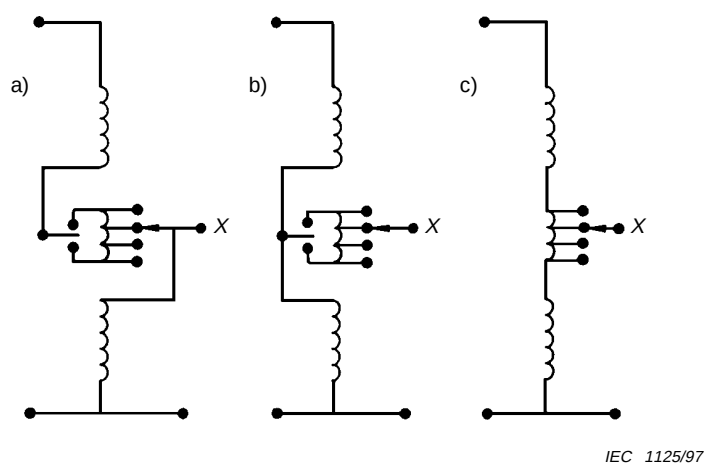
Regulation at the neutral simultaneously increases or decreases the number of turns in both the high-voltage and low-voltage windings but the ratio between the windings changes. This type of regulation will be insufficient in the sense that it requires many regulating turns for the specified range of variation of ratio. Therefore, the volts per turn in the transformer will vary considerably across the tapping range (variable flux). The phenomenon gets more pronounced the closer the ratio of the transformer approaches unity (low α value). This has to be covered by a corresponding over-dimensioning of the magnetic circuit. It will also result in unequal voltages per step.

The obvious advantage of regulation in the neutral is that the tapping winding and the tap-changer will be close to neutral potential and require only low insulation level to earth.

Figure 6 – Tapping turns at the common neutral

3.5.2 Tapping turns at the X-terminal

Regulation arranged at the auto-interconnection in the transformer (the low-voltage side-line terminal) requires the tapping winding and tapchanger to be designed with the insulation level of the X-terminal. They will be directly exposed to steep-front voltage transients from lightning or switching surges. Figure 7 shows a number of different arrangements.



a) Le nombre de spires de l'enroulement commun reste inchangé. C'est un choix logique si la tension du réseau basse tension reste relativement constante, tandis que la tension du réseau haute tension est plus variable.

b) Cette variante est le contraire de a). Le nombre de spires faisant face à la tension du réseau haute tension reste constant, tandis que le nombre effectif de spires du côté basse tension varie.

c) Le nombre de spires est constant sur le côté haute tension, mais pour un nombre spécifique de spires reconnectées, le rapport varie plus que dans l'exemple b). Le cas b) d'autre part permet une utilisation «plus ou moins» de l'enroulement à prises avec inversion comme cela est indiqué dans la figure.

Figure 7 – Prises de réglage à la borne basse tension

4 Propriétés homopolaires – courant de charge du neutre et conditions de défaut à la terre, saturation magnétique et courant d'enclenchement

Cet article traite des caractéristiques des transformateurs triphasés et des bancs de transformateurs monophasés en ce qui concerne les conditions de service triphasé déséquilibré.

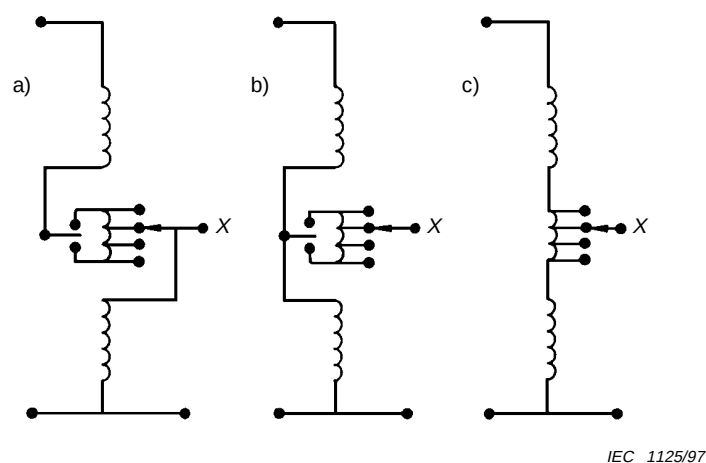
Il existe des différences en fonction de la géométrie du circuit magnétique et de la combinaison des connexions triphasées des enroulements.

Les conditions déséquilibrées comprennent des perturbations transitoires ainsi que des déséquilibres en régime permanent, donnant lieu à

- une perte temporaire de symétrie des tensions triphasées et, en conséquence, de la symétrie de magnétisation des noyaux;
- un déséquilibre temporaire ou permanent des courants de charge, notamment du courant dans la borne neutre, ce qui aura un effet sur la stabilité de la tension, du flux de fuite et de la magnétisation des noyaux.

4.1 Introduction des composantes symétriques des réseaux triphasés

Il est fait une courte présentation, en 4.1.1, de la méthode analytique classique appelée «composantes symétriques» à laquelle il est souvent fait référence dans l'analyse des réseaux de distribution d'énergie. Pour de plus amples renseignements sur cette méthode et sur son application, on se reportera aux ouvrages traitant de l'analyse des réseaux de distribution d'énergie.



- a) The number of turns in the common winding remains unchanged. This is a logical choice if the low-voltage system voltage remains relatively constant while the high-voltage system voltage is more variable.
- b) This alternative is the opposite to a). The number of turns facing the high-voltage system voltage remains constant, while the effective number of turns of the low-voltage side varies.
- c) The number of turns is constant on the high-voltage side, but for a specific number of reconnected turns, the ratio varies more than in case b). Case b) on the other hand permits plus-minus utilization of the tapping winding by reversing it as indicated in the figure.

Figure 7 – Tapping turns at the lower voltage terminal

4 Zero-sequence properties – neutral load current and earth fault conditions, magnetic saturation and inrush current

This clause outlines the characteristics of three-phase transformers and banks of single-phase transformers with regard to asymmetrical three-phase service conditions.

There are differences depending on the geometry of the magnetic circuit and on the combination of three-phase connections of the windings.

The asymmetrical conditions comprise transient disturbances as well as asymmetries during continuous service, giving rise to:

- temporary loss of symmetry of three-phase voltages and, consequently, of the symmetry of magnetization of the core;
- temporary or permanent asymmetry of load currents, particularly current in the neutral, which will affect the voltage stability, leakage flux and core magnetization.

4.1 Introduction of the symmetrical components of a three-phase system

A short explanation of the conventional analytical method called symmetrical components, which is frequently referred to in power system analysis, is given in 4.1.1. For further information on this method and its application, see textbooks on power system analysis.

Une présentation plus complète en 4.1.2 concerne les aspects pratiques de la mise à la terre du réseau par l'intermédiaire des neutres des transformateurs.

4.1.1 *Principes et terminologie des composantes symétriques de tension et de courant*

La méthode, telle qu'elle est appliquée de façon classique, présuppose des tensions et des courants synchrones et sinusoïdaux reliés par des éléments de circuit sous la forme d'impédance ou d'admittance constante, avec une valeur égale pour les trois phases. Ces hypothèses impliquent que toutes les équations du circuit sont linéaires et que les changements de variables par transformation linéaire sont possibles. Une de ces transformations permet d'obtenir des composantes symétriques.

Dans le cas général déséquilibré, les trois tensions simples ou les courants de phases individuels possèdent des amplitudes inégales et ne sont pas espacés de façon égale dans le temps (ne sont pas déphasés de 120 degrés électriques). La somme des valeurs momentanées peut être différente de zéro. Le schéma des phaseurs est une étoile dissymétrique. La somme vectorielle des trois phaseurs ne forme pas nécessairement un triangle fermé (somme différente de zéro).

Cependant, il est toujours possible de remplacer les trois variables déséquilibrées originales par la combinaison des trois composantes symétriques suivantes:

- une composante directe ayant un ensemble ordinaire entièrement symétrique de tensions ou de courants triphasés;
- une composante inverse ayant un autre ensemble symétrique, mais en sens opposé;
- une composante homopolaire ayant la même valeur dans les trois phases sans rotation des phases.

Les deux premières composantes ont chacune une somme égale à zéro à chaque instant. La troisième composante représente le résiduel, la somme différente de zéro des variables originales et apparaît avec un tiers de celle-ci dans chaque phase.

L'avantage de la méthode des composantes symétriques pour le calcul des tensions et des courants est que le réseau original de trois équations couplées avec trois inconnues est remplacé par trois équations monophasées distinctes à une inconnue, une pour chaque composante. Chaque équation utilise les paramètres d'impédance ou d'admittance en rapport avec la composante correspondante.

Les solutions des équations pour les composantes symétriques distinctes sont alors superposées en commençant par la dernière, phase par phase, pour obtenir les courants des phases et les tensions simples du réseau réel.

Les algorithmes de transformation des grandeurs de phases originales en composantes symétriques et inversement se trouvent dans les manuels qui traitent de cette méthode.

4.1.2 *Aspects pratiques*

Les propriétés des composantes ont les conséquences pratiques suivantes en ce qui concerne les courants et les tensions.

- Les trois courants de ligne d'un réseau sans retour à la terre ou conducteur de neutre ont une somme égale à zéro. Leur transformation en composantes symétriques contient les composantes directe et inverse mais aucune composante homopolaire.

Les courants allant d'un réseau à un enroulement à couplage triangle possèdent cette propriété.

A further explanation regarding the practical aspects of earthing of the system through transformer neutrals is given in 4.1.2.

4.1.1 *Principles and terminology of symmetrical components of voltage and current*

The method, as conventionally applied, presupposes synchronous and sinusoidal voltages and currents, linked by circuit elements in the form of constant impedance or admittance, with equal value for the three phases. These assumptions imply that all circuit equations are linear, and that changes of variables by linear transformations are possible. One such transformation is that of symmetrical components.

In the general asymmetrical case, the three individual phase voltages or phase current have unequal amplitudes and are not spaced equally in time (not 120 electrical degrees apart). The sum of the momentary values may be different from zero. The phasor picture is an asymmetrical star. The vectorial sum of the three phasors does not necessarily form a closed triangle (non-zero sum).

It is however always possible to replace the original three asymmetrical variables by a combination of the following three symmetrical components:

- a positive sequence component having a fully symmetrical, ordinary set of three-phase voltages or currents;
- a negative sequence component having another symmetrical set, but with opposite phase sequence;
- a zero sequence component having the same phasor value in all three phases with no phase rotation.

The two first components each have zero sum at every instant. The third component represents the residual, non-zero sum of the original variables, with one-third appearing in each phase.

The advantage of the method of symmetrical components for calculation of voltages and currents is that the original system of three coupled equations with three unknown variables is replaced by three separate, single-phase equations with one unknown, one for each component. Each equation makes use of the relevant impedance or admittance parameters for the respective component.

The solution of the equations for the separate symmetrical components are then superposed back, phase by phase, to obtain the phase voltages or currents of the real system.

The algorithms for transformation of the original phase quantities into symmetrical components and back again can be found in appropriate textbooks.

4.1.2 *Practical aspects*

The properties of the components have the following practical consequences with regard to currents and voltages.

- The three line currents in a system without earth return or neutral conductor have zero sum. Their transformation into symmetrical components contains positive and negative sequence components but no zero-sequence component.

The currents from a system to a delta-connected winding have this property.

- Par un courant de neutre à la terre ou par l'intermédiaire d'un conducteur de neutre (quatrième fil), le système des courants de phase peut comporter une composante homopolaire. C'est une condition normale dans les réseaux de distribution à quatre fils avec des charges monophasées appliquées entre phase et neutre. Les circuits de transmission haute tension ne transportent pas normalement un courant de charge de neutre intentionnel. Dans la mesure où cette charge déséquilibrée existe, elle a plutôt la caractéristique d'une charge entre deux phases, ce qui entraîne une composante inverse mais pas une composante homopolaire.
- Une composante homopolaire est définie comme existant dans la phase et avec la même amplitude dans les trois phases. Une composante homopolaire de courant représente, en conséquence, précisément un tiers du courant de neutre.
- La somme de l'ensemble des tensions composées traversant un enroulement en triangle est égale à zéro à cause de la connexion fermée, et ne contient donc pas de composante de tension homopolaire. Néanmoins, à l'intérieur de l'enroulement à couplage triangle, il peut y avoir circulation d'un courant homopolaire, un courant de circulation de court-circuit dans le triangle, qui est induit à partir d'un autre enroulement (voir 4.5).

4.2 Paramètres d'impédance des composantes symétriques

Les paramètres d'impédance (ou d'admittance) des différents éléments du réseau peuvent être différents pour les trois composantes. En pratique, tout élément statique, tel un transformateur et une bobine d'inductance, comporte des paramètres d'impédance égaux pour la séquence directe et la séquence inverse. Pour un transformateur, ils sont pris comme des valeurs mesurées pendant les essais individuels.

Les paramètres homopolaires d'un transformateur, cependant, sont différents. Il peut être possible que des transformateurs ayant des valeurs égales d'impédance directe aient des caractéristiques homopolaires inégales dépendant du type de circuit magnétique, des connexions et de la position des différents enroulements, des chemins de guidage des flux de fuite, etc.

Dans quelques cas, l'impédance homopolaire sera non linéaire. Cela est décrit par référence aux caractéristiques physiques du transformateur dans les cas suivants. Ils fournissent quelques estimations quantitatives à titre de recommandation générale. Si des certitudes plus précises sur un transformateur spécifique sont requises, des mesures de ses caractéristiques homopolaires peuvent être conduites en essai spécial, sur demande (voir 10.7 de la CEI 60076-1).

4.3 Schéma équivalent unifilaire du transformateur pour les phénomènes homopolaires

Les notions fondamentales de la méthode des composantes symétriques sont soulignées en 4.1, 4.1.1, 4.1.2 et 4.2. Il a été expliqué que l'analyse des phénomènes déséquilibrés, linéaires et sinusoïdaux est traitée sous la forme d'équations monophasées simultanées, dont une pour chaque composante. Pour la composante directe et la composante inverse, le transformateur est représenté avec ses impédances normales à vide et en court-circuit, mais pour la composante homopolaire le schéma est parfois différent et dépend de la conception. Ce paragraphe donne des informations quantitatives sur les grandeurs homopolaires.

- If there is neutral current to earth or through a neutral conductor (fourth wire), then the system of phase currents may have a zero-sequence component. This is a normal condition in four-wire distribution systems with single-phase loads applied between phase and neutral. High-voltage transmission lines do not normally carry any intentional neutral load current. To the extent that load asymmetry exists, it rather has the character of load between two phases which results in a negative-sequence component, but no zero-sequence component.
- A zero-sequence component is defined as existing in phase, and with the same amplitude, in all three phases. A zero-sequence component of current is, consequently, precisely one-third of the neutral current.
- The set of line-to-line voltages across a delta-connected winding have zero sum, because of the closed connection, and consequently do not contain any zero-sequence voltage component. But inside the delta winding, there may flow zero-sequence current, a short-circuit current circulating around the delta, which is induced from another winding (see 4.5).

4.2 Impedance parameters for symmetrical components

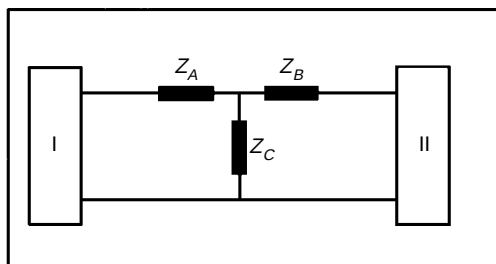
The impedance (or admittance) parameters of different elements of the system may be different for the three components. In practice, components such as transformers and reactors have equal parameters for positive sequence and negative sequence impedance. For a transformer, they are taken as the values measured during the routine tests.

The zero-sequence parameters of a transformer, however, are different. It may be that transformers having equal values of positive-sequence reactance still have unequal zero-sequence characteristics depending on the type of magnetic circuit, the connection and location of the different winding, the way of guiding leakage flux, etc.

In some cases, a zero-sequence impedance will be non-linear. This is described with reference to the physics of the transformer in the following clauses. They also provide some approximate quantitative estimates for general guidance. If more accurate evidence about a specific transformer is wanted, measurements of its zero-sequence characteristics may be carried out as a special test, on request (see 10.7 of IEC 60076-1).

4.3 Single-line equivalent diagram of the transformer for zero-sequence phenomena

The fundamentals of the symmetrical component method have been outlined in 4.1, 4.1.1, 4.1.2 and 4.2. It was stated that the analysis of asymmetrical, linear, sinusoidal phenomena is handled in the form of simultaneous, single-phase equations, one for each component. For positive and negative sequence, the transformer is represented with its normal no-load and short-circuit impedances but, for zero-sequence, the diagram is sometimes different, depending on the design. Quantitative information about the zero-sequence parameters can be found in this subclause.



IEC 1126/97

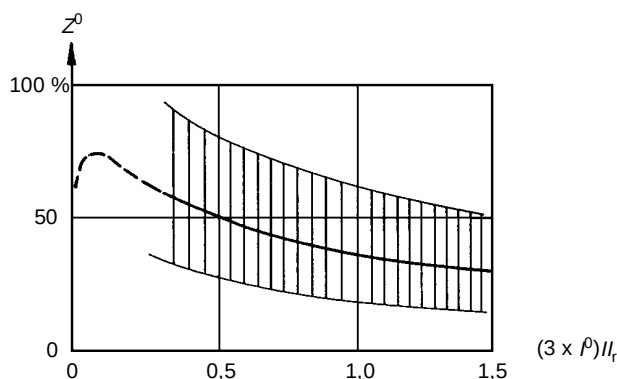
Figure 8 – Schéma homopolaire d'un transformateur à deux enroulements

La schéma équivalent d'un transformateur triphasé à deux enroulements pour les composantes homopolaires est composé d'une impédance série et d'une branche en dérivation. Dans la figure 8, la somme des deux éléments d'impédance série Z_A et Z_B est égale à l'impédance normale de court-circuit pour le courant direct. La subdivision entre les deux éléments est arbitraire et peut être prise égale à zéro.

Z_m est une impédance magnétisante dont la valeur dépend de la conception du circuit magnétique. Un circuit magnétique triphasé à cinq colonnes ou de type cuirassé présente une impédance magnétisante très grande pour une tension homopolaire (voir 4.4).

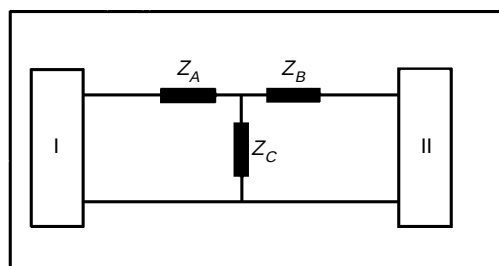
D'autre part, un circuit à trois noyaux possède une impédance magnétisante modérée pour une tension homopolaire. Cette impédance est non linéaire avec l'amplitude du courant ou de la tension et varie d'une conception à une autre. Le flux de fuite de culasse (voir 4.4) induit un flux de courants de Foucault autour de la cuve toute entière. Il existe donc une différence entre les transformateurs comportant des cuves en fines tôles d'acier ondulé et ceux comportant des cuves en tôle plate. Pour des tôles de construction de cuve de transformateur de qualité chaudière, l'impédance homopolaire relative est en général de l'ordre de 0,25 à 1,0 quand le courant de neutre $3 \times I^0$ est égal au courant assigné de l'enroulement. La variation générale de l'impédance avec le courant est décrite à la figure 9.

Pour un transformateur neuf, le fabricant procédera sur demande à la mesure de l'impédance homopolaire (voir 10.1.3 et 10.7 de la CEI 60076-1).



IEC 1127/97

Figure 9 – Variation en fonction du courant de l'impédance magnétisante homopolaire d'un transformateur à trois colonnes sans enroulement à couplage en triangle



IEC 1126/97

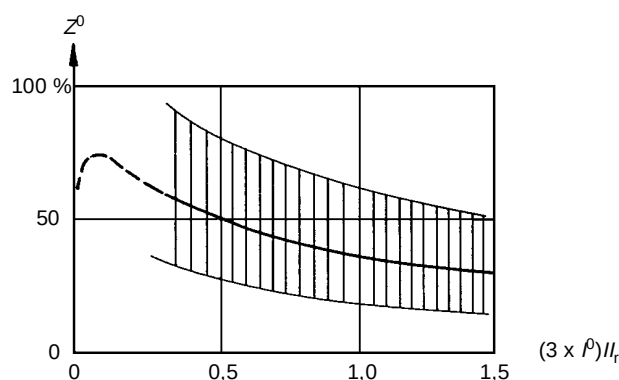
Figure 8 – Zero-sequence diagram for two-winding transformer

The equivalent diagram of a two-winding three-phase transformer for zero-sequence is composed of a series impedance and a shunt branch. In figure 8, the sum of the two series impedance elements Z_A and Z_B is equal to the ordinary short-circuit impedance for positive-sequence current. The subdivision between the two elements is arbitrary, and either can be put equal to zero.

Z_m is a magnetizing impedance, the order of magnitude of which depends on the design of the magnetic circuit. A five-limb core or a shell-form three-phase magnetic circuit presents very high magnetizing impedance for zero-sequence voltage (see 4.4).

A three-limb core, on the other hand, has a moderate magnetizing impedance for zero-sequence voltage. This impedance is non-linear with the current or voltage magnitude and varies from design to design. The yoke leakage flux (see 4.4) induces flow of eddy currents around the whole tank. There is, therefore, a difference between transformers having corrugated tanks of thin steel sheet and those having tanks of flat boilerplate. For boilerplate tank transformers, the per unit zero-sequence impedance is, in general, of the order of 0,25 to 1,0 when the neutral current $3 \times I^0$ is equal to the rated current of the winding. The general variation of impedance with current is shown in figure 9.

For a new transformer, the manufacturer will perform a measurement of the zero-sequence impedance on request (see 10.1.3 and 10.7 of IEC 60076-1).



IEC 1127/97

Figure 9 – Variation with current of zero-sequence magnetizing impedance of three-limb transformer without a delta winding

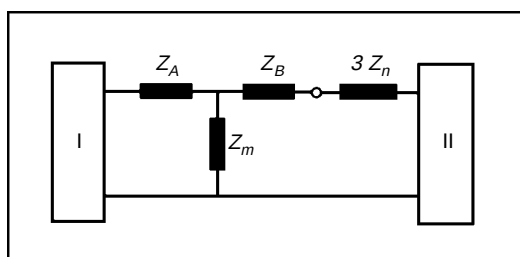
Pour les cas particuliers de couplage de transformateurs, les conséquences sont décrites en 4.3.1 et en 4.3.2.

4.3.1 Transformateur YNyn sans enroulement supplémentaire à couplage en triangle

Lorsque les deux neutres d'enroulement sont connectés sur des réseaux effectivement mis à la terre, le courant homopolaire peut être transmis entre les réseaux, rencontrant une faible impédance dans le transformateur. Les impédances des réseaux ne sont pas, dans ce cas, plus grandes que l'impédance série du transformateur. Avec un circuit magnétique à trois colonnes, l'impédance magnétisante modérée n'est pas négligeable. Elle diminue l'impédance traversante du transformateur d'environ 90 % à 95 % par rapport à l'impédance directe de court-circuit. Avec un circuit magnétique à cinq colonnes ou de type cuirassé, une telle réduction ne se produit pas.

Si le réseau de l'enroulement opposé n'accepte pas le courant homopolaire, l'impédance d'entrée de l'un ou l'autre des enroulements est l'impédance magnétisante, qui dépend de la conception du circuit magnétique comme précisé plus haut.

Si le neutre du réseau de l'enroulement opposé est mis à la terre par l'intermédiaire d'un élément d'impédance Z_n , cela est représenté dans le schéma homopolaire avec une impédance série supplémentaire égale à $3Z_n$ (voir figure 10).



IEC 1128/97

Figure 10 – Transformateur YNyn avec impédance de mise à la terre du neutre – représentation homopolaire

4.3.2 Transformateur YNynd ou YNyn + d

Il s'agit d'une combinaison à trois enroulements. Il y a une configuration en étoile des éléments de l'impédance série en combinaison avec l'impédance magnétisante en représentation homopolaire. Dans la figure 11, $Z_A + Z_C$ représente l'impédance de court-circuit entre l'enroulement A et le troisième enroulement C à couplage triangle dans lequel le courant homopolaire peut circuler (voir 4.5). Cette impédance est l'impédance d'entrée pour le courant homopolaire partant du réseau I pour entrer dans l'enroulement A.

De la même manière, l'impédance pour le courant homopolaire partant du réseau II dans l'enroulement B est $Z_B + Z_C$.

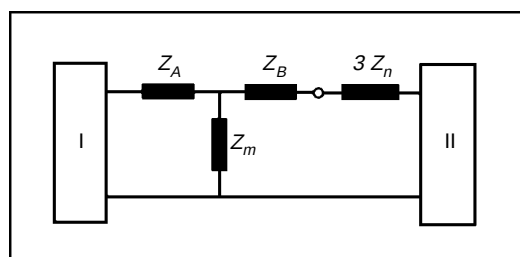
The consequences for particular cases of transformer connections are described in 4.3.1 and 4.3.2.

4.3.1 *YNyn transformer without additional delta winding*

When both winding neutrals are connected to effectively earthed systems, zero-sequence current may be transferred between the systems, meeting low impedance in the transformer. The system impedances are not, in this case, larger than the transformer series impedance. With a three-limb core, the moderate magnetizing impedance is not negligible. It lowers the effective through impedance of the transformer to approximately 90 % to 95 % of the positive-sequence short-circuit impedance. With a five-limb core or a shell-form transformer, there is no such reduction.

If the opposing winding system does not accept zero-sequence current, the input impedance of either winding is the magnetizing impedance, which is dependent on the magnetic circuit design as outlined above.

If the opposing winding system has its neutral earthed through an impedance element Z_n , this is represented in the zero-sequence diagram by an additional series impedance equal to $3Z_n$ (see figure 10).



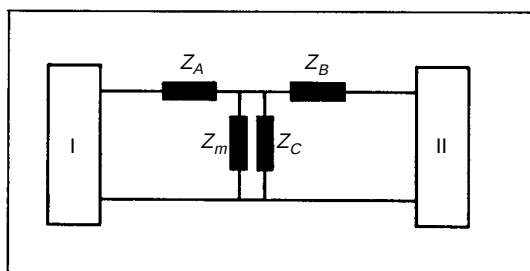
IEC 1128/97

Figure 10 – YNyn transformer with neutral earthing impedance – zero-sequence representation

4.3.2 *YNynd, or YNyn + d transformer*

This is a three-winding combination. There is a star configuration of series impedance elements, in combination with the magnetizing impedance for zero-sequence. In figure 11, $Z_A + Z_C$ is the short-circuit impedance between winding A and the delta-connected third winding C, within which a zero-sequence current may circulate (see 4.5). This impedance is the input impedance for zero-sequence current from system I into winding A.

Similarly, the impedance for zero-sequence current from system II into winding B is $Z_B + Z_C$.



IEC 1129/97

Figure 11 – Transformateur YNyn2 – représentation homopolaire

L'impédance magnétisante Z_m qui est aussi indiquée dans la figure 11 est en général négligée dans les calculs pour cette combinaison d'enroulements. Il est admis que les impédances homopolaires du schéma diffèrent légèrement des valeurs mesurées avec un courant de composante directe. La différence dépend de la disposition des enroulements les uns par rapport aux autres; cette différence reste habituellement comprise entre 10 % et 15 %.

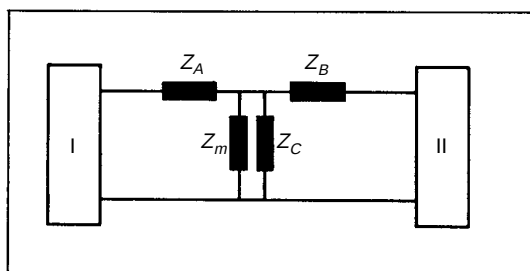
4.4 Impédance magnétisante en conditions déséquilibrées – tension homopolaire et géométrie du circuit magnétique

Pour plusieurs raisons, la symétrie des tensions triphasées dans les réseaux de transmission dans les conditions de fonctionnement normales se maintient très bien et ne pose en général aucun problème pour le fonctionnement du transformateur.

Pendant les défauts à la terre dissymétriques dans le réseau, le système des tensions entre phase et terre comporte une composante homopolaire. Le degré de déséquilibre dépend de la méthode de mise à la terre du réseau. De ce point de vue, le réseau se caractérise par un facteur de défaut à la terre, c'est-à-dire en bref par le rapport entre la tension en courant alternatif entre phases saines pendant le défaut d'une part et la tension symétrique entre phase et terre avant le défaut d'autre part. Cela est important pour la coordination de l'isolement.

Si les circuits magnétiques triphasés d'un transformateur sont soumis à un réseau de tensions induites qui contiennent une homopolarité (dont la somme est différente de zéro), la réaction dépend alors de la géométrie du circuit magnétique et du couplage des enroulements.

Dans un transformateur à circuit magnétique à trois colonnes (voir figure 12), les contributions inégales de flux provenant des trois colonnes ne s'annulent pas dans les culasses. Au lieu de cela, le flux homopolaire résiduel se ferme à l'extérieur du circuit magnétique. Cela représente une forte réluctance et une faible impédance de magnétisation pour la tension homopolaire. Des informations quantitatives sont proposées en 4.3. Le phénomène d'un flux considérable quittant le circuit magnétique et se refermant à l'extérieur peut également se produire lors de conditions transitoires de manoeuvre.



IEC 1129/97

Figure 11 – YNynd transformer – zero-sequence representation

The magnetizing impedance Z_m which is also indicated in figure 11, is usually neglected in calculations for this winding combination. It is accepted that the zero-sequence impedances of the diagram differ somewhat from values measured with positive sequence current. The difference depends on the arrangement of the windings with respect to each other and usually stays within 10 % to 15 %.

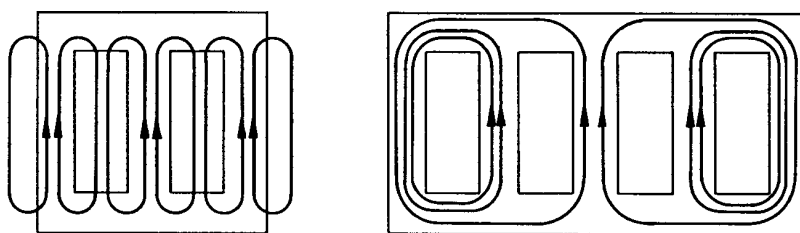
4.4 *Magnetizing impedance under asymmetrical conditions – zero-sequence voltage and magnetic circuit geometry*

For several reasons, the symmetry of three-phase voltages in transmission systems under normal service conditions is maintained quite well and does not in general cause any concern for the operation of the transformer.

During asymmetrical earth faults in the network, the system of phase-to-earth voltages contains a zero-sequence component. The degree of asymmetry depends on the method of system earthing. The system is characterized by an earth fault factor which is, briefly, the ratio between phase-to-earth a.c. voltage on an unfaulted phase during the fault and the symmetrical phase-to-earth voltage prior to the fault. This is of importance with regard to insulation coordination.

If the three-phase limbs of a transformer are subjected to a system of induced voltages which contains a zero-sequence component (i.e. has a non-zero sum), then the reaction depends on the magnetic circuit geometry and the connection of the windings.

In a three-limb core type transformer (see figure 12), the unequal flux contributions from the three limbs do not cancel in the yokes. The residual, zero-sequence flux instead completes its path outside the iron core. This represents high reluctance and a low magnetizing impedance for zero-sequence voltage. Quantitative information is given in 4.3. The phenomenon of considerable flux leaving the magnetic circuit and closing outside may also occur during switching transient conditions.



IEC 1130/97

Figure 12 – Magnétisation homopolaire des noyaux à trois et à cinq colonnes

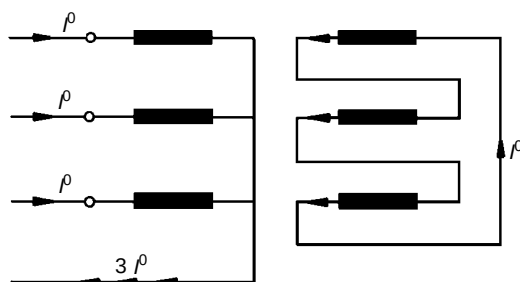
Dans un transformateur à circuit magnétique à cinq colonnes (voir figure 12), les colonnes externes non bobinées présentent des chemins magnétiques de retour de faible réluctance, dans lesquelles le flux homopolaire peut circuler. L'impédance de magnétisation correspondante est élevée comme pour un flux de composante directe normale. La même chose s'applique aux transformateurs triphasés de type cuirassé et, bien sûr, à un banc de trois unités monophasées séparées.

Cependant, la tension et le courant homopolaires appliqués sont aussi influencés par le couplage triphasé de l'enroulement; voir les paragraphes suivants.

4.5 Comportement homopolaire et enroulements à couplage triangle

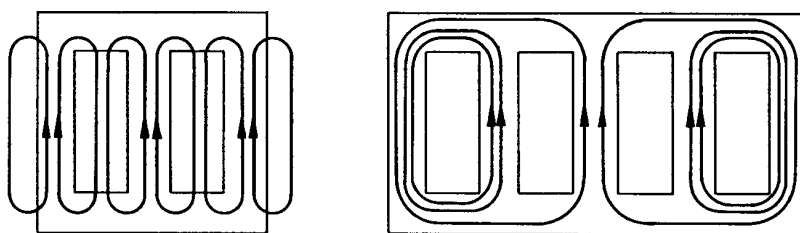
La tension entre phases traversant un enroulement en triangle conduit automatiquement à une somme égale à zéro en raison du couplage en triangle fermé. Sinon, un enroulement en triangle représente un court-circuit pour la composante homopolaire.

Le courant homopolaire ne peut pas s'échanger entre les trois bornes d'un enroulement en triangle et un réseau externe. Mais un courant de court-circuit de circulation peut être induit d'un autre enroulement à couplage YN (voir figure 13). L'impédance homopolaire du transformateur, vue de l'autre enroulement, a la nature d'une impédance de court-circuit entre un autre enroulement et l'enroulement en triangle. Pour des informations quantitatives, voir 4.3.



IEC 1131/97

Figure 13 – Courant de court-circuit homopolaire induit dans un enroulement à couplage triangle



IEC 1130/97

Figure 12 – Zero-sequence magnetization of three-limb and five-limb cores

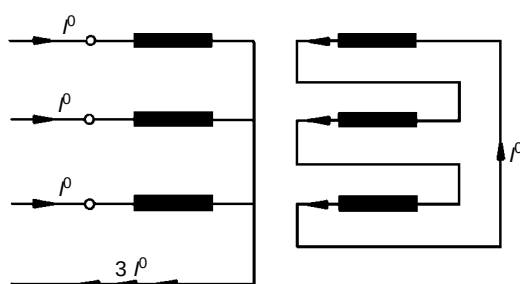
In a five-limb core type transformer (see figure 12), the unwound outer limbs present a low-reluctance return path, where zero-sequence flux may pass. The corresponding magnetizing impedance is high, as for normal positive-sequence flux. The same applies for shell-form three-phase transformers, and, of course, for a bank of three separate single-phase units.

However, applied zero-sequence voltage and current is also influenced by the winding three-phase connection; see the following clauses.

4.5 Zero-sequence and delta windings

The phase-to-phase voltages across a delta-connected winding automatically sum up to zero because of the closed triangle connection. Alternatively, a delta winding can be looked on as a short circuit with regard to zero-sequence voltages.

Zero-sequence current cannot be exchanged between the three terminals of the delta winding and an external system. But a circulating short-circuit current may be induced from another (YN-connected) winding (see figure 13). The zero-sequence impedance of the transformer, seen from the other winding, has the character of a short-circuit impedance between the other winding and the delta winding. For quantitative information, see 4.3.



IEC 1131/97

Figure 13 – Zero-sequence short-circuit current induced in a delta winding

4.6 Comportement homopolaire et enroulements à couplage en zigzag

Dans un enroulement à couplage en zigzag (voir figure 14) chaque colonne du transformateur comporte des morceaux d'enroulements de deux phases ayant des sens d'enroulement opposés. Le nombre d'ampères-tours d'une composante de courant homopolaire est annulé sur chaque noyau sans qu'il en résulte de magnétisation. Le courant est seulement contrôlé par une faible impédance de court-circuit associée à un flux de fuite entre les morceaux d'enroulements sur la colonne (voir aussi 4.7.3).

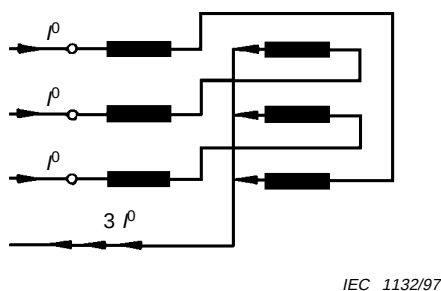


Figure 14 – Enroulement à couplage en zigzag équilibré de façon inhérente pour le courant homopolaire

4.7 Propriétés des impédances homopolaires pour différents couplages de transformateur

Les paragraphes précédents ont décrit les caractéristiques homopolaires des circuits magnétiques et des enroulements individuels spécifiques des transformateurs. Ce paragraphe rassemble les caractéristiques homopolaires de tous les transformateurs ayant des combinaisons d'enroulements habituels.

Le tableau 1 indique les valeurs approximatives des impédances homopolaires pour des combinaisons à deux et trois enroulements quand l'un des enroulements est excité à partir d'un réseau. Ce tableau tel qu'il existe est valable pour des conceptions avec des enroulements concentriques, ici numérotées (1) – (2) – (3), (1) étant l'enroulement disposé le plus à l'extérieur. Les symboles d'enroulement dans la première colonne sont écrits dans le même ordre. Il n'est pas important de savoir quel est l'enroulement haute tension.

Les paragraphes suivants contiennent d'autres textes descriptifs.

Dans le tableau 1, le symbole YN indique que le neutre de l'enroulement est mis à la terre directement ou à travers une faible valeur d'impédance. Le symbole Y montre que le neutre n'est pas connecté à la terre.

Les valeurs exprimées en pourcentage quand elles sont données sont en correspondance avec la référence habituelle d'impédance U^2/S .

Quelques couplages sont marqués avec un astérisque (*). Dans ces cas, les courants homopolaires dans l'enroulement excité ne sont pas compensés par un courant dans aucun autre enroulement. L'impédance homopolaire est alors une impédance magnétisante de valeur relativement grande ou très grande, fonction du circuit magnétique.

Dans tous les autres cas, il y a des courants qui s'équilibrent entre les enroulements et l'impédance homopolaire est égale à, ou très proche de, l'impédance de court-circuit entre les enroulements considérés.

Le tableau indique seulement la contribution du transformateur seul. Les impédances des réseaux associés sont considérées comme négligeables.

4.6 Zero-sequence and zigzag windings

In a zigzag connected winding (see figure 14), each limb of the transformer carries part windings from two phases which have opposite winding directions. The number of ampere-turns of a zero-sequence current component cancel out on each limb, with no resulting magnetization. The current meets only a low short-circuit impedance associated with the leakage flux between the part windings on the limb (see also 4.7.3).

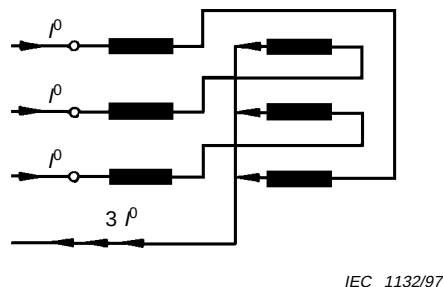


Figure 14 – A zigzag connected winding inherently balanced for zero-sequence current

4.7 Zero-sequence impedance properties of different transformer connections

Previous subclauses have described zero-sequence characteristics of specific magnetic circuits and of specific individual windings in transformers. This subclause summarizes the zero-sequence characteristics of whole transformers having usual winding combinations.

Table 1 indicates approximate zero-sequence impedance values for two and three-winding combinations when either of the windings is excited from a system. This table as it stands is valid for designs with concentric windings, here numbered (1) – (2) – (3) with (1) as the outermost winding. The winding symbols in the first column are written in the same order. It is unimportant which one is the high-voltage winding.

The following subclauses provide further descriptive text.

In table 1, the symbol YN indicates that the winding neutral is earthed directly or via a low impedance. Symbol Y indicates that the neutral is not connected to earth.

Percentage figures, when given, are in relation to the usual reference impedance U^2/S .

Some connections are marked with an asterisk (*). In these cases, the zero-sequence current in the excited winding is not balanced by current in any other winding. The zero-sequence impedance is then a magnetizing impedance of relatively high or very high value, depending on the magnetic circuit.

In all other cases, there is current balance between the windings, and the zero-sequence impedance is equal to, or at least close to, the ordinary short-circuit impedance between the windings involved.

The table only indicates the contribution of the transformer itself. Impedances of associated systems are regarded as negligible.

Cela signifie que dans la représentation des diagrammes homopolaires, un enroulement secondaire YN est considéré comme ayant toutes ses trois phases court-circuitées à la terre.

Tableau 1 – Impédances homopolaires, valeurs typiques

Symbole d'enroulement			Impédance %						Paragraphes
			Enroulement excité, circuit magnétique à 3 colonnes			Enroulement excité, circuit magnétique à 5 colonnes ou circuit magnétique cuirassé			
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
YN	Y	*	≈ 50	–		≈ 10 ⁴	–		4.3, 4.4
Y	YN	*	–	≈ 60		–	≈ 10 ⁴		4.3, 4.4
YN	YN		a ₁ z ₁₂	a ₂ z ₁₂		z ₁₂	z ₁₂		4.7.1
YN	D		a ₁ z ₁₂	–		z ₁₂	–		4.7.2
D	YN		–	a ₂ z ₁₂		–			4.7.2
YN	Y	Y*	≈ 50	–	–	≈ 10 ⁴	–	–	4.3, 4.4
Y	YN	Y*	–	≈ 60	–	–	≈ 10 ⁴	–	4.3, 4.4
Y	Y	YN*	–	–	≈ 70	–	–	≈ 10 ⁴	4.3, 4.4
YN	YN	Y	a ₁ z ₁₂	a ₂ z ₁₂	–	z ₁₂	z ₁₂	–	4.7.1
YN	Y	YN		–	a ₃ z ₁₃	z ₁₃	–	z ₁₃	4.7.1
Y	YN	YN	–		a ₃ z ₂₃	–	z ₂₃	z ₂₃	4.7.1
YN	YN	D	a ₁ (z ₁ +z ₂ ∥z ₃)	a ₂ (z ₂ +z ₁ ∥z ₃)	–	z ₁ +z ₂ ∥z ₃	z ₂ +z ₁ ∥z ₃	–	4.7.2
YN	D	D	a ₁ (z ₁ +z ₂ ∥z ₃)	–	–	z ₁ +z ₂ ∥z ₃	–	–	4.7.2
YN	Y	D		–	–	z ₁₃	–	–	4.7.2
D	YN	YN	–	a ₂ (z ₂ +z ₁ ∥z ₃)	a ₃ (z ₃ +z ₁ ∥z ₂)	–	z ₂ +z ₁ ∥z ₃	z ₃ +z ₁ ∥z ₂	4.7.2
D	YN	Y	–	a ₂ z ₁₂	–	–	z ₁₂	–	4.7.2
D	Y	YN	–	–	a ₃ z ₁₃	–	–	z ₁₃	4.7.2
D	YN	D	–	a ₂ (z ₂ +z ₁ ∥z ₃)	–	–	z ₂ +z ₁ ∥z ₃	–	4.7.2

NOTES

1 z_{12} , z_{13} et z_{23} sont les impédances directes de court-circuit.

2 $z_1 = \frac{z_{12} + z_{13} - z_{23}}{2}$, de même pour z_2 et z_3

3 $z_1 \parallel z_2 = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}$ de même pour $z_1 \parallel z_3$ et $z_2 \parallel z_3$

4 a_1 , a_2 et a_3 sont des facteurs multiplicatifs généralement tels que $0,8 < a_1 < a_2 < a_3 < 1$

5 Les aspects particuliers des propriétés des impédances homopolaires sont données en 4.7.1, 4.7.2 et 4.7.3.

6 Les couplages avec un astérisque (*) indiquent les cas où l'impédance homopolaire est une impédance magnétisante d'une valeur relative grande ou très grande, en fonction de la nature du circuit magnétique.

This means that, in the zero-sequence diagram representation, a YN output winding is regarded as having all three phases short-circuited to earth.

Table 1 – Zero-sequence impedances, typical values

Winding symbol			Impedance %						Subclauses
			Excited winding, 3-limb core			Excited winding, 5-limb core (or shell)			
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
YN	Y	*	≈ 50	—		≈ 10 ⁴	—		4.3, 4.4
Y	YN	*	—	≈ 60		—	≈ 10 ⁴		4.3, 4.4
YN	YN		a ₁ z ₁₂	a ₂ z ₁₂		z ₁₂	z ₁₂		4.7.1
YN	D		a ₁ z ₁₂	—		z ₁₂	—		4.7.2
D	YN		—	a ₂ z ₁₂		—			4.7.2
YN	Y	Y*	≈ 50	—	—	≈ 10 ⁴	—	—	4.3, 4.4
Y	YN	Y*	—	≈ 60	—	—	≈ 10 ⁴	—	4.3, 4.4
Y	Y	YN*	—	—	≈ 70	—	—	≈ 10 ⁴	4.3, 4.4
YN	YN	Y	a ₁ z ₁₂	a ₂ z ₁₂	—	z ₁₂	z ₁₂	—	4.7.1
YN	Y	YN		—	a ₃ z ₁₃	z ₁₃	—	z ₁₃	4.7.1
Y	YN	YN	—		a ₃ z ₂₃	—	z ₂₃	z ₂₃	4.7.1
YN	YN	D	a ₁ (z ₁ + z ₂ z ₃)	a ₂ (z ₂ + z ₁ z ₃)	—	z ₁ + z ₂ z ₃	z ₂ + z ₁ z ₃	—	4.7.2
YN	D	D	a ₁ (z ₁ + z ₂ z ₃)	—	—	z ₁ + z ₂ z ₃	—	—	4.7.2
YN	Y	D		—	—	z ₁₃	—	—	4.7.2
D	YN	YN	—	a ₂ (z ₂ + z ₁ z ₃)	a ₃ (z ₃ + z ₁ z ₂)	—	z ₂ + z ₁ z ₃	z ₃ + z ₁ z ₂	4.7.2
D	YN	Y	—	a ₂ z ₁₂	—	—	z ₁₂	—	4.7.2
D	Y	YN	—	—	a ₃ z ₁₃	—	—	z ₁₃	4.7.2
D	YN	D	—	a ₂ (z ₂ + z ₁ z ₃)	—	—	z ₂ + z ₁ z ₃	—	4.7.2

NOTES

1 z_{12} , z_{13} and z_{23} are short-circuit positive-sequence impedances.

2 $z_1 = \frac{z_{12} + z_{13} - z_{23}}{2}$, similarly z_2 and z_3

3 $z_1 \parallel z_2 = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}$ similarly $z_1 \parallel z_3$ and $z_2 \parallel z_3$

4 a_1 , a_2 and a_3 are multiplying factors generally in the range $0,8 < a_1 < a_2 < a_3 < 1$

5 Particular aspects of zero-sequence impedance properties are given in 4.7.1, 4.7.2 and 4.7.3.

6 Connections marked with an asterisk (*) indicate cases where the zero-sequence impedance is a magnetizing impedance of relatively high or very high value, depending on the nature of the magnetic circuit.

4.7.1 *YNyn ou YNauto sans enroulement à couplage triangle*

Le transformateur reçoit et transmet le courant homopolaire entre les deux réseaux, sous réserve que les neutres soient mis à la terre. Il présente alors une impédance de court-circuit normale pour le courant.

Si le neutre de l'autotransformateur n'est pas mis à la terre, le transfert du courant homopolaire est encore possible, mais avec une impédance différente.

Si aucun transfert du courant homopolaire provenant d'un réseau dans un réseau opposé n'est possible, le transformateur présentera alors une impédance magnétisante pour le courant. Celle-ci est très élevée dans les transformateurs à circuit magnétique à cinq colonnes, dans les transformateurs de type cuirassé et dans un banc de trois transformateurs monophasés.

4.7.2 *YNd ou Dyn ou YNynd ou YNyn + d (enroulement de stabilisation)*

Le transformateur présente une faible impédance (ou un caractère d'impédance de court-circuit) pour le courant homopolaire venant d'un réseau effectivement mis à la terre et pénétrant dans un enroulement à couplage étoile yn. La circulation du courant le long de l'enroulement à couplage triangle permet la compensation des ampères-tours (voir figure 15).

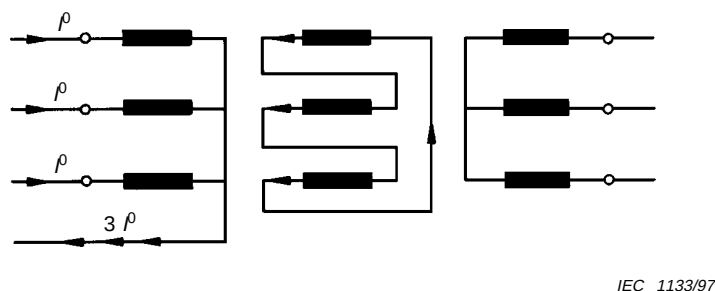


Figure 15 – Fonction d'un enroulement de stabilisation

C'est pour cette raison qu'un enroulement de stabilisation supplémentaire à couplage triangle dans un transformateur Yy (ou un banc de trois transformateurs monophasés) sert à réduire l'impédance homopolaire du système connecté et donc son facteur de défaut à la terre (voir 4.4). Une conséquence éventuelle est l'augmentation du courant de défaut à la terre prévisible.

Il est important d'assurer la tenue au court-circuit d'un enroulement tertiaire couplé en triangle ou d'un enroulement de stabilisation pour un courant homopolaire induit maximal pendant un défaut à la terre dans l'un ou l'autre des réseaux connectés. Une autre solution peut être de connecter des bobines d'inductance intégrées limitant le courant à l'intérieur du triangle pour diminuer le courant de défaut induit à une valeur acceptable.

4.7.3 *Yzn ou ZNy*

Le transformateur présente une faible impédance (caractéristique de celle d'une impédance de court-circuit) pour le courant homopolaire émanant du réseau du côté Z. Il y a un équilibre d'ampères-tours inhérent du courant homopolaire à l'intérieur de l'enroulement en zigzag (Z) lui-même.

4.7.1 *YNyn or YNauto without delta winding*

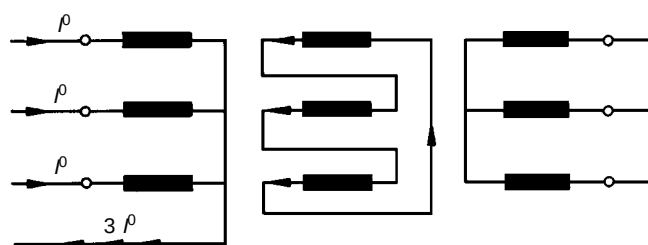
The transformer receives and transfers zero-sequence current between the two systems, provided that the neutrals are earthed. It then presents normal short-circuit impedance for the current.

If the neutral of an auto-connected transformer is not earthed, transfer of zero-sequence current is still possible but it meets a different impedance.

If no transfer of incoming zero-sequence current from a system to the opposing system is possible, then the transformer presents magnetizing impedance to the current. This magnetizing impedance is very high in five-limb core-form transformers, in shell-form transformers, and also in a bank of three single-phase transformers.

4.7.2 *YNd or Dyn or YNynd or YNyn + d (equalizer winding)*

The transformer presents low impedance (of short-circuit impedance character) to zero-sequence current from an effectively earthed system into a yn-connected winding. A circulating current around the delta winding provides compensating ampere-turns (see figure 15).



IEC 1133/97

Figure 15 – The function of an equalizer winding

This is why an additional delta-connected equalizer winding in a Yy transformer (or bank of three single-phase transformers) serves to reduce the zero-sequence impedance of the connected system and thereby its earth fault factor (see 4.4). A consequence is that the prospective earth fault current increases.

It is important to ensure that the short-circuit withstand strength of a tertiary delta winding or an equalizer winding is sufficient for the maximum induced zero-sequence current during an earth fault in either of the connected systems. Alternatively, built-in current-limiting reactors may be connected inside the delta in order to bring down the induced fault current to a tolerable value.

4.7.3 *Yzn or ZNy*

The transformer presents low impedance (of short-circuit impedance character) to zero-sequence current from the Z side system. There is inherent ampere-turn balance for the zero-sequence current within the Z-winding itself.

C'est la raison pour laquelle un transformateur doté d'un enroulement à couplage ZN est utilisé pour fournir un point neutre pour la connexion d'une impédance de mise à la terre du neutre quand l'enroulement du transformateur principal raccordé au système est un enroulement à couplage triangle. On fait référence au transformateur couplé en zigzag sous le nom de «transformateur de mise à la terre» ou de «bobine d'inductance triphasée de mise à la terre»; voir section 6 de la CEI 60289. La même fonction peut être obtenue avec une combinaison d'enroulements YNd sur un transformateur de mise à la terre.

Si le côté étoile a son neutre relié à la terre (YNzn), le transformateur présente une impédance magnétisante en homopolaire à partir de ce côté, qui est environ la même que pour YNyn ci-dessus. L'enroulement en zigzag qui est équilibré de façon inhérente pour le courant homopolaire ne peut fournir des ampères-tours de compensation pour le courant homopolaire dans l'enroulement étoile opposé.

4.8 Application d'une charge homopolaire continue (courant de neutre)

Une charge monophasée sur un transformateur triphasé peut être placée soit entre phases soit entre phase et neutre.

Dans le premier cas, le système des courants sur les côtés primaire et secondaire contient des composantes directe et inverse, mais pas d'homopolaire. La distribution des courants de phase sur le côté primaire du transformateur dépend de la connexion triphasée. Il n'est pas possible de convertir une charge monophasée en une charge triphasée symétrique sur le côté primaire par une connexion spéciale du transformateur. La charge permise se rapporte au courant assigné des enroulements respectifs.

Si la charge est tirée entre phase et neutre du transformateur, il peut exister d'autres restrictions que celles données par le courant assigné de l'enroulement. Le paragraphe 8.1 de la CEI 60076-1 prescrit que la borne neutre doit être toujours dimensionnée pour le courant de défaut à la terre et pour un courant de charge en régime permanent traversant le neutre quand cela est spécifié (c'est une condition normale pour les transformateurs de distribution). Il est prescrit dans l'annexe A de la CEI 60076-1 qu'une enquête doit comprendre les informations relatives à

- la méthode préconisée de mise à la terre pour les réseaux sur lesquels les enroulements du transformateur seront connectés, notamment quand un enroulement de stabilisation est spécifié;
- toute charge non équilibrée prévue.

Dans le même ordre d'idée que ce qui a été décrit dans les paragraphes précédents, un neutre d'enroulement secondaire peut en général être chargé en régime permanent comme indiqué ci-dessous, en fonction des couplages des enroulements, de la conception du circuit magnétique et de la mise à la terre du réseau:

- un neutre de transformateur à couplage Dyn peut être chargé avec le courant assigné de l'enroulement;
- un transformateur à couplage YNyn dont les deux neutres sont mis à la terre peut être chargé avec un courant assigné par l'intermédiaire de ses neutres, sous réserve que la mise à la terre du réseau le permette (par rapport au déséquilibre de tension);
- le neutre d'un enroulement à couplage en zigzag (Z) peut être chargé avec le courant assigné;
- un transformateur à couplage Yyn + d (transformateur fourni avec un enroulement de stabilisation) peut avoir sa borne neutre secondaire chargée avec un courant d'une valeur maximale équivalente au courant assigné, sous réserve que l'enroulement à couplage triangle ait une puissance assignée au moins égale au tiers de la puissance assignée de l'enroulement secondaire. (Le courant de circulation par phase de l'enroulement tertiaire équilibre le courant homopolaire dans l'enroulement secondaire qui représente par définition un tiers du courant dans le neutre);

This is why a transformer with a ZN-connected winding is used to provide a neutral point for connection of a neutral earthing impedance to a system when the winding of the main transformer is a delta winding. The Z-connected transformer is referred to as an earthing transformer or neutral coupler; see section 6 of IEC 60289. The same function can be achieved with a winding combination YNd on the earthing transformer.

If the Y side has its neutral connected to earth (YNzn), the transformer presents magnetizing impedance to zero-sequence from that side, about the same as YNyn above. The Z-winding, which is inherently balanced for zero-sequence, cannot provide compensating ampere-turns for zero-sequence current in the opposing Y-winding.

4.8 Continuous zero-sequence loading (neutral point current)

A single-phase load on a three-phase transformer may be placed either between phases or between phase and neutral.

In the first case, the system of currents on the primary and secondary sides contain positive and negative sequence components, but not zero-sequence. The distribution of phase currents on the primary side of the transformer depends on the three-phase connection. It is not possible to convert a single-phase load to a symmetrical three-phase load on the primary side by a particular transformer connection. The allowable loading is referred to rated current of the respective windings.

If the load is drawn between phase and neutral of the transformer, there may be other restrictions than those given by the rated current of the winding. Subclause 8.1 of IEC 60076-1 requires that the neutral terminal shall always be dimensioned for the recognised earth fault current and for continuous load current through the neutral when specified (this is a normal condition for distribution transformers). It is required in annex A of IEC 60076-1 that an enquiry shall contain information on:

- the intended method of operation of the system to which the transformer windings will be connected, particularly when an equalizer winding is specified;
- any anticipated unbalanced loading.

In line with what has been described in the previous subclauses, a secondary winding neutral may in general be continuously loaded as follows, depending on winding connections, magnetic circuit design, and system earthing:

- a Dyn transformer neutral may be loaded with rated current of the winding;
- a YNyn transformer with both neutrals earthed may be loaded with rated current through its neutrals, provided that the system earthing permits this (with regard to voltage asymmetry);
- a Z-connected winding neutral may be loaded with rated current;
- a Yyn + d transformer (a transformer provided with an equalizer winding) may have its secondary neutral terminal loaded with current up to the rated current, provided that the delta-connected winding has a power rating equal to at least one-third of the power rating of the secondary winding. (The circulating current per phase of the tertiary winding balances the zero-sequence current in the secondary winding, which is, by definition, one-third of the current in the neutral);

- dans un transformateur à couplage Yynd possédant un tertiaire disposant d'une capacité de charge, ce tertiaire fonctionnera de la même manière qu'un enroulement de stabilisation (voir alinéa précédent). Tout courant de circulation dans l'enroulement triangle se mélangera avec le courant de charge extérieur de cet enroulement. (Le courant total peut être mesuré s'il y a des transformateurs de courant à l'intérieur de la connexion triangle du transformateur);
- un transformateur à couplage Yyn sans enroulement supplémentaire à couplage triangle n'offre pas un équilibre défini des tensions simples. (Ce cas implique que le neutre primaire n'est pas mis à la terre.)
- un transformateur de distribution formé d'un circuit magnétique à trois colonnes à couplage Yyn n'est pas en général adapté à l'application d'une charge entre phase et neutre. Le déséquilibre de tension peut ne pas être acceptable, si le neutre transporte plus d'environ 10 % du courant assigné de l'enroulement. Des couplages mixtes Dyn ou Yzn sont préférables pour les transformateurs de distribution alimentant les réseaux de distribution à quatre fils;
- un transformateur de taille et de tension moyennes avec ce couplage peut transporter environ 25 % du courant assigné pendant une période de 2 h vers une bobine d'inductance d'extinction d'arc en plus de la pleine charge équilibrée, sans risque thermique. Il convient cependant que de telles exigences soient spécifiquement confirmées.

4.9 *Réductance et impédance magnétisante d'un circuit magnétique, saturation en régime permanent sous une tension à fréquence industrielle anormalement élevée*

Un schéma unifilaire équivalent d'un transformateur de puissance contient un élément en dérivation représentant le courant d'excitation du circuit magnétique. En fonctionnement normal, ce courant est très faible et négligeable par exemple en conjonction avec les calculs de chute de tension, ce qui justifie le circuit équivalent (voir article 7). En d'autres termes, l'inductance magnétisante est très élevée. En termes de caractéristiques de magnétisation, la réductance que le flux magnétique rencontre est très faible, c'est-à-dire que le trajet du flux principal est facilement magnétisé.

Si une tension à fréquence industrielle appliquée sur les enroulements de n'importe quelle colonne du transformateur est anormalement élevée, le matériau constitutif du noyau devient saturé pendant une partie de chaque demi-cycle. Dans les conditions de saturation, la réductance magnétique augmente considérablement. Un courant de crête magnétisant sévèrement augmenté est absorbé à partir de la source d'énergie.

Pendant les phénomènes de saturation du noyau, l'induction est aussi considérable en dehors du noyau, entre le noyau et l'enroulement. Cela peut donner lieu à l'induction de courants de Foucault élevés dans les parties métalliques extérieures aux enroulements, ce qui a pour conséquence un échauffement local et des décharges sur des contacts non intentionnels.

Un phénomène pouvant donner lieu à une saturation locale dans le transformateur est le flux de fuite magnétique excessif se produisant pendant le passage d'un fort courant de surcharge. Le flux de fuite circule entre les enroulements, et une partie de ce flux se referme par le circuit magnétique. En outre, il est probable que dans ces conditions la tension de service soit également anormale. Le résultat combiné peut aboutir à des phénomènes de saturation imprévus dans certaines parties du circuit magnétique.

4.10 *Saturation transitoire, courant d'enclenchement*

Quand un transformateur est soudainement enclenché sous la pleine tension du réseau, un phénomène de saturation aléatoire peut se produire. On l'appelle habituellement «courant d'enclenchement» (voir figure 16).

En régime permanent, l'intégrale volt-temps du demi-cycle entier de tension unidirectionnelle entre deux passages par zéro, appliquée à travers une phase de l'enroulement, correspond au flux oscillant de la pleine induction dans une direction à la pleine induction dans l'autre direction.

- in a Yynd transformer which has a loadable tertiary, this tertiary will function in the same way as an equalizer winding (see previous indent). Any circulating current in the delta winding will combine with the external load current of that winding. (The total current may be measured if there are current transformers inside the delta connection in the transformer);
- a Yyn transformer without any additional delta-connected winding does not provide well-defined symmetry of the phase voltages. (This case presupposes that the primary neutral is not earthed.)
- a three-limb, core-form distribution transformer having a Yyn connection is not in general suitable for loading between phase and neutral. The voltage asymmetry will be objectionable if the neutral carries more than about 10 % of the rated current of the winding. Therefore, mixed connections, Dyn or Yzn, are preferred for distribution transformers feeding four-wire distribution systems;
- a medium-size, medium voltage transformer with this connection may carry about 25 % of the rated current for a duration of 2 h to an arc-suppression coil, in addition to full symmetrical load, without thermal risk. Such requirements should, however be specifically confirmed.

4.9 *Magnetic circuit reluctance and magnetizing impedance, steady-state saturation under abnormally high power frequency voltage*

An equivalent single-line diagram of the power transformer contains a shunt element, representing the excitation current of the magnetic circuit. In normal service, this current is very small and negligible, e.g. in conjunction with voltage drop calculations, which justifies the pattern of the equivalent circuit (see clause 7). In other words, the magnetizing inductance is very high. In terms of magnetization characteristics, the reluctance which the magnetic flux encounters is very low, i.e. the path of the main flux is easily magnetized.

If a power frequency voltage applied across the windings of any limb of the transformer is abnormally high, the core material gets saturated during part of each half-cycle. During the saturated condition, the magnetic reluctance increases considerably. A peaked, drastically increased magnetizing current is drawn from the power source.

During phenomena with saturation of the core, there is also a considerable flux outside the core-steel, between the core and the winding. This may induce high eddy currents in metallic parts outside the windings, resulting in local heating and discharges across unintentional contacts.

A phenomenon which may give rise to local saturation in a transformer is the excessive magnetic leakage flux occurring during the flow of heavy overload current. The leakage flux passes between the windings and part of it has a return path through the magnetic circuit. In addition, it is likely that, under these conditions, the service voltage is also abnormal. The combined result may be unforeseen saturation conditions in certain parts of the core.

4.10 *Transient saturation, inrush current*

When a transformer is suddenly energized with full system voltage, a random saturation phenomenon may occur, which is usually referred to as an inrush current (see figure 16).

In steady state, the volt-time integral of a full half-cycle of unidirectional voltage between two zero passages, applied across a phase of the winding, corresponds to the flux swing from full density in one direction to full density in the other direction.

Immédiatement après énergisation, cependant, une condition transitoire de perturbation se produit. Selon la direction de la rémanence existant dans le circuit magnétique et le point de l'onde auquel la tension est appliquée, l'induction transitoire peut atteindre la limite de saturation de l'acier constitutif du noyau et peut s'élever au-dessus avant que la tension appliquée ne change de signe. L'amplitude du courant magnétisant transitoire peut atteindre toute valeur de crête jusqu'à une valeur maximale qui peut être plus élevée que le courant assigné et s'approcher du courant de court-circuit de défaut du transformateur.

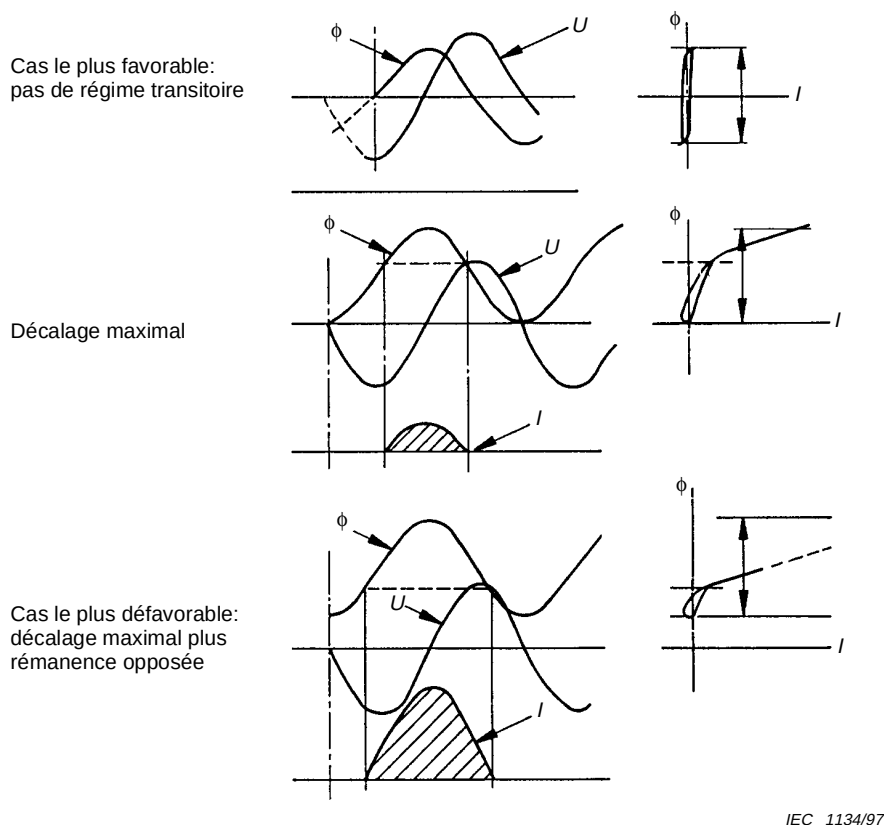


Figure 16 – Transitoires d'enclenchement

A partir de la description du phénomène, il semble évident qu'il s'agit d'un phénomène aléatoire qui ne se produit complètement qu'une fois de temps en temps sur plusieurs enclenchements. Le courant d'enclenchement à partir des réseaux apparaît avec une amplitude différente selon les phases. Quand un enroulement à couplage triangle ou à couplage doté effectivement d'un neutre mis à la terre est mis sous tension, le phénomène est lié à la colonne individuelle tandis que, dans un enroulement à connexion étoile sans connexion de mise à la terre du neutre, une combinaison de deux enroulements de deux colonnes bobinées en série est impliquée initialement.

Quand un courant d'enclenchement élevé se produit, il est toujours décalé et il apparaît avec les grandes amplitudes d'une seule polarité. Le courant d'enclenchement comporte donc une composante en courant continu qui décroît en moins de 1 s. Le temps de décroissance est plus long pour les transformateurs possédant un matériau de noyau à faibles pertes et il tend à être supérieur pour les grands transformateurs. Cette composante en courant continu et le contenu harmonique de rang élevé du courant sont importants pour les relais des circuits de