



# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE

---

**Converter transformers –  
Part 3: Application guide**

**Transformateurs de conversion –  
Partie 3: Guide d'application**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 29.180

ISBN 978-2-8322-2233-1

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

## CONTENTS

FOREWORD.....	6
INTRODUCTION.....	8
0.1 General.....	8
0.2 Rating data (Clause 5) .....	8
0.3 Winding configurations (Clause 6) .....	8
0.4 Tappings and impedances (Clause 7) .....	8
0.5 Insulation aspects and dielectric tests (Clause 8) .....	9
0.6 Losses (Clause 9) .....	9
0.7 Core and sound aspects (Clause 10) .....	9
0.8 Transformer specification (Clause 11).....	9
0.9 Short circuit considerations (Clause 12).....	9
0.10 Components (Clause 13).....	10
0.11 Maintenance (Clause 14).....	10
0.12 Monitoring and on-site investigations (Clause 15) .....	10
0.13 Additional sources of information .....	10
1 Scope.....	11
2 Normative references.....	11
3 Terms and definitions .....	11
4 Symbols and abbreviations .....	11
5 Rating data.....	12
6 Winding configurations.....	13
6.1 General.....	13
6.2 Industrial applications .....	15
6.2.1 Rectifier .....	15
6.2.2 Voltage regulation .....	16
6.2.3 Autotransformer design .....	17
6.3 HVDC applications .....	22
6.3.1 Different types of transformer arrangement.....	22
6.3.2 Winding arrangements .....	23
6.3.3 Consideration of impedance – mutual impedance .....	24
7 Tappings and impedances – HVDC applications .....	25
7.1 Value of impedance.....	25
7.2 Variability of impedance .....	25
8 Insulation aspects and dielectric tests .....	26
8.1 Hybrid insulation systems.....	26
8.1.1 General .....	26
8.1.2 Hybrid insulation for converter transformers.....	27
8.2 Dielectric tests .....	28
8.2.1 General .....	28
8.2.2 Dielectric safety margins in long term d.c. and polarity reversal testing .....	30
8.2.3 Comments on the dielectric test procedures.....	31
9 Losses .....	33
9.1 General.....	33
9.1.1 General considerations .....	33
9.1.2 Losses and frequency .....	34

9.1.3	Current sharing, losses and hot spot in high current windings .....	35
9.1.4	Current harmonics .....	35
9.1.5	Transformers with three or more windings wound on the same core limb .....	36
9.1.6	Dual frequency testing of HVDC transformers .....	41
9.1.7	Transformers with more than one active part in the same tank .....	43
9.1.8	Transformers connected to a voltage source converter .....	44
9.2	Thermal tests .....	44
9.2.1	General .....	44
9.2.2	Calculation of test currents and losses for industrial transformers .....	44
9.2.3	Calculation of losses and test currents for HVDC transformers .....	44
9.2.4	Considerations on the hot spot and limits of the thermal tests .....	45
9.2.5	Considerations on temperature rise test of industrial transformers .....	45
9.2.6	Tank hot spots in industrial transformers .....	46
10	Core and sound aspects .....	46
10.1	Core .....	46
10.1.1	Constructional features .....	46
10.1.2	Effect of harmonics on transformer active part cores .....	47
10.1.3	DC bias voltage effect on main active part cores .....	47
10.1.4	Summary about cores .....	48
10.2	Sound .....	48
10.2.1	General .....	48
10.2.2	Fundamental considerations .....	49
11	Transformer specification .....	50
11.1	General .....	50
11.2	Technical specification versus functional specifications .....	51
11.2.1	General .....	51
11.2.2	Technical specifications .....	51
11.2.3	Functional specifications .....	51
11.3	HVDC transformer specifications .....	51
11.4	Notes and comments on specification items to be provided individually by purchaser and supplier .....	52
11.5	Information to be provided by the purchaser or by the system designer .....	52
11.5.1	General description .....	52
11.5.2	System data .....	52
11.5.3	Environmental data .....	53
11.5.4	Performance requirements .....	53
11.5.5	Testing requirements .....	55
11.5.6	Sequence of factory tests .....	57
11.5.7	Site tests .....	57
11.5.8	Design and construction requirements .....	58
11.5.9	Auxiliary equipment .....	58
11.5.10	Availability and measures to minimize service downtime .....	60
11.6	Information to be provided by the supplier .....	60
11.6.1	General .....	60
11.6.2	General description .....	60
11.6.3	Performance data .....	60
11.6.4	Supplementary data .....	61
11.7	Quality assurance and test program .....	63
11.8	Availability and measures to minimize service downtime .....	63

12	Short circuit considerations .....	63
13	Components .....	67
13.1	On-load tap-changers .....	67
13.1.1	General .....	67
13.1.2	Converters for industrial applications .....	67
13.1.3	Converter for HVDC applications .....	68
13.2	Valve-side bushings .....	68
13.2.1	General .....	68
13.2.2	Station layout.....	69
13.2.3	Technical considerations .....	69
13.2.4	Bushing types .....	69
13.2.5	Testing .....	69
14	Maintenance.....	71
14.1	General.....	71
14.2	Oil .....	72
14.2.1	General .....	72
14.2.2	Oil quality and transformer quality indicators.....	73
14.3	Insulation quality .....	73
14.3.1	General .....	73
14.3.2	Oil sampling requirements .....	74
14.3.3	Oil tests .....	75
14.3.4	Oil handling, storage and treatment .....	76
14.3.5	Oil preservation systems .....	76
14.4	Tap-changers.....	77
14.5	Accessories and fittings.....	79
15	Monitoring .....	79
15.1	General.....	79
15.2	Transformer condition assessment in service .....	80
15.3	Types of monitor .....	80
15.3.1	General .....	80
15.3.2	Oil condition monitoring.....	80
15.3.3	Off-line condition assessment.....	81
15.3.4	On and off-line monitors .....	81
15.3.5	Expert systems .....	83
15.3.6	Fingerprinting.....	83
15.4	Monitoring summary .....	84
16	Design review of converter transformers .....	84
16.1	General.....	84
16.2	Scheduling and confidentiality .....	85
16.3	Subject for design review .....	86
16.3.1	General .....	86
16.3.2	System information .....	86
16.3.3	Environmental Information.....	87
16.3.4	Transformer specific requirements.....	87
	Bibliography .....	91
	Figure 1 – Bridge connection for six-pulse arrangement.....	14

Figure 2 – Bridge connection for twelve-pulse arrangement .....	14
Figure 3 – Transformer connections star-delta and star-star or alternatively, delta-delta and delta-star to give a 30 electrical degree separation between the valve-side voltages.....	14
Figure 4 – 15° phase shifting is preferably realized by extended delta or zigzag connection.....	15
Figure 5 – Double-star connection.....	15
Figure 6 – Typical connection of transducers.....	16
Figure 7 – Autotransformer concept for open phases with coarse and fine regulation steps .....	17
Figure 8 – Conventional autotransformer concept for closed phases with coarse and fine regulation steps .....	18
Figure 9 – Conventional autotransformer concept for closed phases with multi coarse regulation .....	19
Figure 10 – Booster autotransformer concept for closed phases with coarse and fine regulation steps.....	20
Figure 11 – Autotransformer concept for open phases with coarse and fine regulation steps .....	21
Figure 12 – Transformer concept for closed phases with coarse and fine regulation steps .....	22
Figure 13 – Two basic arrangements of the individual windings of a two-winding transformer.....	23
Figure 14 – Mutual impedance .....	25
Figure 15 – Typical impedance pattern.....	26
Figure 16 – Components of a typical industrial converter transformer insulating system.....	27
Figure 17 – Insulation system, equivalent R-C circuit.....	29
Figure 18 – Voltage distribution before and immediately after polarity reversal .....	30
Figure 19 – a.c./d.c. conversion – Simplified sketch.....	32
Figure 20 – Leakage fields for a three-winding transformer with closely coupled valve windings.....	38
Figure 21 – Leakage fields for a three-winding transformer with decoupled valve windings.....	39
Figure 22 – Leakage fields for a three winding transformer with loosely coupled double concentric valve windings .....	40
Figure 23 – Leakage fields for a three winding transformer with loosely coupled double-tier valve windings.....	41
Figure 24 – Short-circuit fault conditions in rectifier bridge .....	64
Figure 25 – Arrangement of valve bushings.....	70
Figure 26 – Examples of a.c., d.c. and combined electric field dispositions adjacent to HVDC bushings and associated electric insulation systems .....	71
Table 1 – Arrangements of two windings .....	24
Table 2 – Data for calculation of load losses with harmonic currents .....	43
Table 3 – Monitoring types .....	82

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

### CONVERTER TRANSFORMERS –

#### Part 3: Application guide

#### FOREWORD

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

International Standard IEC 61378-3 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2006 and constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) revision of clause on losses to reflect the changes introduced by the second edition of IEC 61378-1;
- b) addition of a new clause about design review of converter transformer for both industrial and HVDC applications;
- c) addition of content for transformer connected to voltage source converters;
- d) reference to the work of CIGRE JWG A2/B4.28 on HVDC transformers.

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

FDIS	Report on voting
14/803/FDIS	14/808/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 61378 series, published under the general title *Converter transformers*, can be found on the IEC website.

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

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

## INTRODUCTION

### 0.1 General

IEC 61378 series is written in three parts:

- Part 1 applies to transformers associated with general "Industrial" converter uses. (Copper making, aluminium smelting and the electrolysis of certain gases).
- Part 2 applies to transformers required for HVDC applications.
- Part 3 is this application guide which contains the topic headings described in 0.2 to 0.13.

The scope of IEC 61378-1 is limited to application of power converters of any power rating. Typical applications are: thyristor rectifiers for electrolysis; diode rectifiers for electrolysis; thyristor rectifiers for large drives; thyristor rectifiers for scrap melting furnaces, and diode rectifiers feeding inverters for variable speed drives. The standard also covers the regulating unit utilized in such application as step down regulating transformers or autotransformers. The valve winding highest voltage for equipment is limited to 36 kV.

IEC 61378-2 covers converter transformers used in "HVDC Applications". There are two types of HVDC power transmission systems known generically as "back to back" and "transmission" schemes. The operation and evaluation of transformers operating within these two systems are covered by Part 2 and the present part of IEC 61378.

Neither IEC 61378-1:2011 nor IEC 61378-2:2001, explicitly include in their scope transformers connected to voltage source converters (VSC). Because VSC applications are becoming more and more common, some guidance is provided in this standard.

### 0.2 Rating data (Clause 5)

In both IEC 61378-1 and IEC 61378-2, the method of rating converter transformers is different to that used historically. In the traditional method, the r.m.s. value of current was used in defining the nameplate rating of the transformer. IEC 61378 has introduced a fundamental change in the method of defining the rating of transformers. The concept of using the fundamental components of voltage and current as the basis for the transformer nameplate rating is explained. The nameplate rating derived from these fundamental components becomes the basis for the guaranteed impedances and losses.

### 0.3 Winding configurations (Clause 6)

There are a large number of winding connections and configurations that are specific to converter transformers for both industrial and HVDC applications. They have been developed over many years. The operating characteristics of the various rectifier connections are mostly covered in IEC 60146 series. In the present part of IEC 61378, the connections are discussed in so far as they affect the construction and some operational aspects of the transformer.

The use of regulating schemes is common in industrial applications. The present part of IEC 61378 covers the principles for a number of these schemes.

### 0.4 Tappings and impedances (Clause 7)

The impedance of transformers for HVDC applications requires special attention and design solutions. The requirements primarily concern the limitation of the impedance variability over the whole tapping range, the limitation of the impedance difference between transformers and in some applications, the impedance difference between star and delta windings. This standard discusses these requirements and their practical aspects.



In general, the tapping range in converter transformers is wider than in conventional transformers. The impact of the wider tapping range on the transformer and the tap-changer is discussed in this standard.

### **0.5 Insulation aspects and dielectric tests (Clause 8)**

Two aspects are covered in Clause 8. First, the increasing use of “hybrid” insulation systems in transformers for industrial applications. Secondly, the ability of transformer insulation structures of HVDC transformers when tested with d.c. voltage and in service.

The basic principles, the methods of testing and the test voltage levels used for both a.c. and d.c. testing are discussed. The safety margins associated with the proposed testing regime are also reviewed.

### **0.6 Losses (Clause 9)**

The present part of IEC 61378 details the derivation of the principles, testing and calculation methods used that take into account the effects of non-sinusoidal load currents on converter transformers of all types.

The principles of testing at two frequencies for HVDC applications are detailed along with a worked example of the calculation. The losses derived from these tests and calculations are used as the base for specifying the test losses and currents to be used in establishing the oil and winding gradients during the thermal testing.

### **0.7 Core and sound aspects (Clause 10)**

The effects of voltage harmonics and a d.c.-bias circulating-current on the performance and construction of the core are discussed and summarized.

The causes of sound and the differences that may be expected between conventional factory sound measurements and those to be expected and experienced at site are reviewed.

The latest methods of assessment of sound associated with converter transformers are discussed.

### **0.8 Transformer specification (Clause 11)**

Transformers for converters differ significantly from power transformers with respect to the transformer specification. An outline of the details required in any specification is included as part of the guide for both technical and functional types of specification.

Some guidance as to what should be specified by the purchaser and what should be expected from the manufacturer during the tender and order process is given.

### **0.9 Short circuit considerations (Clause 12)**

In conventional power transformers, the calculation of the short circuit currents within the windings are dependent solely on the impedance and resistance components of the transformer and supply to which it is connected.

In the case of transformers used to supply converter applications, there are fault conditions within the converter that need to be considered where the peak value of the fault currents may be higher than those derived for conventional power transformers. These conditions are detailed in the present part of IEC 61378.

### **0.10 Components (Clause 13)**

In the design of transformers for both industrial and HVDC converter applications, the choice and operation of the on-load tap-changer is crucial. The present part of IEC 61378 outlines some of the principles governing the use of tap-changers in these applications.

In the HVDC application, the choice and integration of the valve-side bushings into the overall design is of vital importance.

The general requirements and recommendations for the construction, integration of the bushings with the transformer and testing are detailed. An IEC standard specifically for HVDC bushing is in preparation and the recommendations in the present part of IEC 61378 draws upon the requirements of the new standard.

### **0.11 Maintenance (Clause 14)**

Statistics suggest that the HVDC transformers require maintenance to a high standard. Those items that require particular attention are on-load tap-changers and valve-side bushings. Attention is drawn in this standard to maintenance requirements.

### **0.12 Monitoring and on-site investigations (Clause 15)**

Transformer monitoring is recommended if on-site problems are to be minimized and in this respect, condition monitoring is discussed. The present part of IEC 61378 also presents recommendations for the procedure and practices to be followed in the event of a failure at site. These recommendations are made so that vital evidence and data are not destroyed or contaminated at the initial stages of the investigation.

The use of condition monitoring for this application is also discussed in Clause 15.

### **0.13 Additional sources of information**

The preparation of the present part of IEC 61378, specifically for IEC 61378-2 HVDC converter applications, was significantly influenced by the working papers on various topics of CIGRE Joint Working Group 12/14.10.

## CONVERTER TRANSFORMERS –

### Part 3: Application guide

#### 1 Scope

This part of IEC 61378 provides information to users about specific topics related to industrial and HVDC converter transformers with design, construction, testing and operating conditions differing from conventional transformers used in power systems. In addition, it is the aim of the present part of IEC 61378 to provide manufacturers with the technical background that forms the basis for the principles used within IEC 61378-1 and IEC 61378-2.

It is intended that this part of IEC 61378 is used to supplement and not replace or supersede the application guide for power transformers, IEC 60076-8, since many of the general principles contained within it are equally applicable to converter transformers.

#### 2 Normative references

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

IEC 60076-1:2011, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-5:2006, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

IEC 60076-14:2013 *Power transformers – Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*

IEC 60296, *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*

IEC 60422, *Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance*

IEC 61378-1:2011, *Converter transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

IEC 61378-2:2001, *Convertor transformers – Part 2: Transformers for HVDC applications*

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	99
INTRODUCTION.....	101
0.1 Généralités .....	101
0.2 Caractéristiques assignées (Article 5).....	101
0.3 Configurations d'enroulement (Article 6) .....	101
0.4 Prises de réglage et impédances (Article 7) .....	102
0.5 Aspects liés à l'isolation et essais diélectriques (Article 8).....	102
0.6 Pertes (Article 9).....	102
0.7 Noyau et aspects liés au niveau de bruit (Article 10) .....	102
0.8 Spécification du transformateur (Article 11).....	102
0.9 Considérations relatives aux courts-circuits (Article 12).....	103
0.10 Composants (Article 13).....	103
0.11 Maintenance (Article 14).....	103
0.12 Surveillance et analyses sur site (Article 15).....	103
0.13 Autres sources d'information .....	103
1 Domaine d'application.....	104
2 Références normatives .....	104
3 Termes et définitions .....	104
4 Symboles et abréviations .....	105
5 Caractéristiques assignées .....	105
6 Configurations d'enroulement.....	106
6.1 Généralités .....	106
6.2 Applications industrielles .....	108
6.2.1 Redresseur .....	108
6.2.2 Régulation de la tension.....	110
6.2.3 Conception de l'autotransformateur .....	110
6.3 Applications CCHT .....	116
6.3.1 Différents types de montages de transformateurs .....	116
6.3.2 Dispositions d'enroulement.....	117
6.3.3 Prise en compte de l'impédance – impédance mutuelle .....	118
7 Prises de réglage et impédances – Applications CCHT .....	119
7.1 Valeur de l'impédance .....	119
7.2 Variabilité de l'impédance.....	119
8 Aspects liés à l'isolation et essais diélectriques .....	120
8.1 Systèmes d'isolation hybrides.....	120
8.1.1 Généralités .....	120
8.1.2 Isolation hybride pour transformateurs de conversion.....	121
8.2 Essais diélectriques .....	122
8.2.1 Généralités .....	122
8.2.2 Marges de sécurité diélectrique au cours des essais de courant continu de longue durée et d'inversion de la polarité .....	124
8.2.3 Commentaires sur les méthodes d'essais diélectriques .....	125
9 Pertes .....	127
9.1 Généralités .....	127
9.1.1 Considérations d'ordre général.....	127

9.1.2	Pertes et fréquence.....	128
9.1.3	Partage de courant, pertes et point chaud dans les enroulements à fort courant .....	129
9.1.4	Harmoniques de courant .....	130
9.1.5	Transformateurs à trois enroulements ou plus bobinés sur la même colonne de circuit magnétique .....	130
9.1.6	Essais à double fréquence des transformateurs CCHT.....	135
9.1.7	Transformateurs ayant plus d'une partie active dans la même cuve.....	137
9.1.8	Transformateurs couplés à un convertisseur de source de tension .....	138
9.2	Essais thermiques.....	138
9.2.1	Généralités .....	138
9.2.2	Calcul des courants d'essai et pertes pour les transformateurs industriels .....	138
9.2.3	Calcul des pertes et courants d'essai pour les transformateurs CCHT .....	139
9.2.4	Considérations relatives au point chaud et aux limites des essais thermiques.....	139
9.2.5	Considérations relatives à l'essai d'échauffement des transformateurs industriels .....	139
9.2.6	Points chauds de la cuve dans les transformateurs industriels .....	140
10	Noyau et aspects liés au niveau de bruit .....	141
10.1	Noyau .....	141
10.1.1	Caractéristiques de construction.....	141
10.1.2	Effets des harmoniques sur les noyaux de la partie active du transformateur .....	142
10.1.3	Effet de la tension de polarisation continue sur les principaux noyaux de la partie active .....	142
10.1.4	Résumé sur les noyaux .....	142
10.2	Niveau de bruit.....	143
10.2.1	Généralités .....	143
10.2.2	Considérations de base.....	143
11	Spécification du transformateur.....	145
11.1	Généralités .....	145
11.2	Spécification technique par rapport aux spécifications fonctionnelles.....	146
11.2.1	Généralités .....	146
11.2.2	Spécifications techniques .....	146
11.2.3	Spécifications fonctionnelles .....	146
11.3	Spécifications de transformateurs CCHT.....	146
11.4	Notes et commentaires relatifs aux éléments des spécifications à fournir séparément par l'acheteur et le fournisseur.....	147
11.5	Informations à fournir par l'acheteur ou par le concepteur du réseau .....	147
11.5.1	Description générale .....	147
11.5.2	Caractéristiques du réseau.....	147
11.5.3	Données d'environnement.....	148
11.5.4	Exigences de performance .....	148
11.5.5	Exigences d'essai .....	151
11.5.6	Ordre des essais en usine .....	153
11.5.7	Essais sur site .....	153
11.5.8	Exigences de conception et de construction.....	153
11.5.9	Matériel auxiliaire.....	154

11.5.10	Disponibilité et mesures permettant de réduire le temps d'arrêt de service.....	155
11.6	Informations exigées du fournisseur .....	156
11.6.1	Généralités .....	156
11.6.2	Description générale .....	156
11.6.3	Données de performance .....	156
11.6.4	Caractéristiques supplémentaires.....	157
11.7	Assurance qualité et programme d'essai.....	159
11.8	Disponibilité et mesures permettant de réduire le temps d'arrêt de service .....	159
12	Considérations relatives au court-circuit.....	160
13	Éléments constitutifs.....	163
13.1	Changeurs de prises en charge .....	163
13.1.1	Généralités .....	163
13.1.2	Convertisseurs pour applications industrielles.....	163
13.1.3	Convertisseur pour applications CCHT .....	164
13.2	Traversées du côté valve .....	165
13.2.1	Généralités .....	165
13.2.2	Implantation du poste.....	165
13.2.3	Considérations d'ordre technique .....	165
13.2.4	Types de traversées.....	166
13.2.5	Essais .....	166
14	Maintenance.....	168
14.1	Généralités .....	168
14.2	Huile.....	169
14.2.1	Généralités .....	169
14.2.2	Qualité de l'huile et indicateurs de la qualité des transformateurs.....	170
14.3	Qualité de l'isolation.....	171
14.3.1	Généralités .....	171
14.3.2	Exigences d'échantillonnage de l'huile.....	172
14.3.3	Essais de l'huile.....	173
14.3.4	Manutention, stockage et traitement de l'huile.....	173
14.3.5	Systèmes de conservation de l'huile .....	174
14.4	Changeurs de prises .....	175
14.5	Accessoires et dispositifs .....	177
15	Surveillance .....	178
15.1	Généralités .....	178
15.2	Évaluation de l'état du transformateur en service .....	178
15.3	Types de dispositifs de surveillance.....	178
15.3.1	Généralités .....	178
15.3.2	Surveillance de l'état de l'huile .....	179
15.3.3	Évaluation hors ligne de l'état.....	179
15.3.4	Dispositifs de surveillance en ligne et hors ligne .....	180
15.3.5	Système expert.....	182
15.3.6	Caractérisation .....	183
15.4	Résumé de la surveillance.....	183
16	Revue de conception des transformateurs de conversion.....	184
16.1	Généralités .....	184
16.2	Planification et confidentialité .....	184

16.3	Objet de la revue de conception .....	186
16.3.1	Généralités .....	186
16.3.2	Informations sur le système.....	186
16.3.3	Informations sur l'environnement.....	186
16.3.4	Exigences spécifiques au transformateur.....	187
	Bibliographie .....	191
	Figure 1 – Montage de pont hexaphasé.....	107
	Figure 2 – Montage de pont dodécaphasé .....	107
	Figure 3 – Couplages de transformateur en étoile-delta et étoile-étoile ou en variante en delta-delta et delta-étoile pour donner une séparation de 30 degrés électriques entre les tensions du côté valve .....	108
	Figure 4 – Déphasage de 15° réalisé de préférence par couplage en zigzag ou en delta étendu.....	108
	Figure 5 – Couplage en étoile double .....	109
	Figure 6 – Couplage classique des transducteurs .....	110
	Figure 7 – Concept d'autotransformateur pour phases ouvertes avec régulation grossière et fine.....	111
	Figure 8 – Concept d'autotransformateur classique pour phases fermées avec régulation grossière et fine.....	112
	Figure 9 – Concept d'autotransformateur classique pour phases fermées avec plusieurs régulations grossières .....	113
	Figure 10 – Concept d'autotransformateur survolteur pour phases fermées avec régulation grossière et fine.....	114
	Figure 11 – Concept d'autotransformateur pour phases ouvertes avec régulation grossière et fine.....	115
	Figure 12 – Concept de transformateur pour phases fermées avec régulation grossière et fine.....	116
	Figure 13 – Deux dispositions de base des enroulements d'un transformateur à deux enroulements.....	117
	Figure 14 – Impédance mutuelle .....	119
	Figure 15 – Modèle d'impédance type .....	120
	Figure 16 – Composants d'un système d'isolation d'un transformateur de conversion industriel type.....	121
	Figure 17 – Système d'isolation, circuit R-C équivalent.....	123
	Figure 18 – Répartition des tensions avant et immédiatement après inversion de la polarité.....	124
	Figure 19 – Conversion courant alternatif/courant continu – Schéma simplifié .....	126
	Figure 20 – Champs de fuite pour transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve à couplage serré.....	132
	Figure 21 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve sans couplage .....	133
	Figure 22 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve biconcentriques à couplage lâche .....	134
	Figure 23 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve double étage à couplage lâche .....	135
	Figure 24 – Conditions de défaut de court-circuit dans un pont redresseur .....	160
	Figure 25 – Disposition des traversées des valves.....	167

Figure 26 – Exemples de champs électriques en courant alternatif, en courant continu et combinés adjacents aux traversées CCHT et systèmes d'isolation électriques associés .....	168
Tableau 1 – Disposition des deux enroulements .....	118
Tableau 2 – Données pour le calcul des pertes dues à la charge avec les courants harmoniques.....	137
Tableau 3 – Types de surveillance .....	181



## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –

#### Partie 3: Guide d'application

#### AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61378-3 a été établie par le comité d'études 14 de l'IEC: Transformateurs de puissance.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2006. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) révision de l'article sur les pertes pour prendre en compte les modifications induites par la deuxième édition de l'IEC 61378-1;
- b) ajout d'un nouvel article concernant la revue de conception des transformateurs de conversion pour les applications industrielles et les applications CCHT;

- c) ajout de contenu pour transformateur couplé à des convertisseurs de source de tension;
- d) référence aux travaux du GTM A2/B4.28 du CIGRE sur les transformateurs CCHT.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/803/FDIS	14/808/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.

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61378, publiées sous le titre général *Transformateurs de conversion*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

## INTRODUCTION

### 0.1 Généralités

La série IEC 61378 est constituée de trois parties:

- La partie 1 s'applique aux transformateurs associés à des convertisseurs pour applications «industrielles» générales. (Fabrication du cuivre, élaboration de l'aluminium et électrolyse de certains gaz).
- La partie 2 s'applique aux transformateurs utilisés pour des applications CCHT.
- La partie 3 est constituée du présent guide d'application qui comporte les rubriques décrites de 0.2 à 0.13.

Le domaine d'application de l'IEC 61378-1 est limité à l'application de convertisseurs de puissance d'une puissance assignée donnée. Les applications classiques sont les suivantes: redresseurs à thyristor pour électrolyse, redresseurs à diode pour électrolyse, redresseurs à thyristor pour les grands entraînements, redresseurs à thyristor pour les fours de fusion et les redresseurs à diode alimentant des onduleurs de variateurs de vitesse. La norme couvre également les appareils de régulation utilisés dans ces applications (les transformateurs de régulation abaisseurs ou les autotransformateurs, par exemple). La tension la plus élevée de l'enroulement de valve de l'équipement est limitée à 36 kV.

L'IEC 61378-2 couvre les transformateurs de conversion utilisés dans des «applications CCHT». Il existe deux types de systèmes de transmission de puissance CCHT, connus sous l'appellation générique de procédés «en opposition» et «de transmission». Le fonctionnement et l'évaluation des transformateurs fonctionnant au sein de ces deux systèmes sont couverts par la partie 2 ainsi que par la présente partie de l'IEC 61378.

Ni l'IEC 61378-1:2011 ni l'IEC 61378-2:2001 ne contiennent, dans leur domaine d'application, des transformateurs couplés à des convertisseurs de source de tension (CST). Étant donné que les applications CST deviennent de plus en plus communes, certaines lignes directrices sont fournies dans la présente norme.

### 0.2 Caractéristiques assignées (Article 5)

Dans l'IEC 61378-1 et l'IEC 61378-2, la méthode d'établissement des caractéristiques assignées des transformateurs de conversion est différente de la méthode conventionnelle habituellement utilisée. La méthode conventionnelle utilise la valeur efficace du courant pour définir le régime assigné de plaque du transformateur. L'IEC 61378 a introduit une modification fondamentale de la méthode de définition des caractéristiques assignées des transformateurs. Elle explique le concept d'utilisation des composantes fondamentales de tension et de courant comme base du régime assigné de plaque du transformateur. Le régime assigné de plaque déduit de ces composantes fondamentales devient la base de calcul des impédances et des pertes garanties.

### 0.3 Configurations d'enroulement (Article 6)

Il existe un grand nombre de couplages et de configurations d'enroulement spécifiques aux transformateurs de conversion tant pour des applications industrielles que pour des applications CCHT. Ceux-ci ont été développés sur de nombreuses années. Les caractéristiques fonctionnelles des divers couplages de redresseurs sont pour la plupart traitées dans la série IEC 60146. La présente partie de l'IEC 61378 traite des couplages dans la mesure où ils influencent la construction et certains aspects fonctionnels du transformateur.

Il est courant d'utiliser des mécanismes de régulation dans les applications industrielles. La présente partie de l'IEC 61378 couvre les principes applicables à certains de ces mécanismes.

#### **0.4 Prises de réglage et impédances (Article 7)**

L'impédance des transformateurs utilisés pour des applications CCHT nécessite une attention et des solutions de conception particulières. Les exigences sont principalement liées à la limitation de la variabilité de l'impédance sur l'ensemble de l'étendue de prises, la limitation de la différence d'impédance entre transformateurs et, dans certaines applications, la différence d'impédance entre enroulements à couplage étoile et à couplage delta. La présente norme traite de ces exigences et de leurs aspects pratiques.

En général, l'étendue de prises des transformateurs de conversion est plus large que celle des transformateurs conventionnels. La présente norme traite des impacts de cette étendue de prises plus large sur le transformateur proprement dit et sur le changeur de prise.

#### **0.5 Aspects liés à l'isolation et essais diélectriques (Article 8)**

L'Article 8 traite de deux aspects. En premier lieu, l'utilisation croissante des systèmes d'isolation «hybrides» dans les transformateurs pour applications industrielles. En second lieu, la capacité des structures d'isolation des transformateurs CCHT lorsqu'elles sont soumises à des essais en tension continue et en service.

Les principes fondamentaux, les méthodes d'essai et les niveaux de tension d'essai utilisés sont traités, à la fois pour les essais en courant alternatif et pour ceux en courant continu. Les marges de sécurité liées au régime d'essai proposé sont également examinées.

#### **0.6 Pertes (Article 9)**

La présente partie de l'IEC 61378 décrit de manière détaillée les éléments qui résultent de l'application des principes, des méthodes d'essai et de calcul utilisés, en tenant compte des effets des courants de charge non sinusoïdaux sur tous les types de transformateurs de conversion.

Les principes d'essai à deux fréquences pour les applications CCHT sont également examinés en détail sur la base d'un exemple de calcul pratique. Les pertes résultant de ces essais et les calculs sont utilisés comme base de spécification des pertes et courants d'essai à utiliser pour établir les gradients de l'huile et des enroulements lors des essais thermiques.

#### **0.7 Noyau et aspects liés au niveau de bruit (Article 10)**

Les effets des harmoniques de tension et d'un courant circulant de polarisation continue sur les performances et la construction du noyau sont discutés et résumés.

Les causes de bruit et les différences qui peuvent exister entre des mesurages acoustiques conventionnels effectués en usine et celles qui sont attendues et observées sur site sont examinées.

Cet article traite des dernières méthodes d'évaluation du niveau acoustique lié aux transformateurs de conversion.

#### **0.8 Spécification du transformateur (Article 11)**

Les transformateurs pour convertisseurs présentent des différences significatives par rapport aux transformateurs de puissance en termes de spécification. Le guide comprend une présentation des éléments de détails exigés dans tous les types de spécifications techniques et fonctionnelles.

Il fournit également des lignes directrices quant aux éléments qu'il convient de spécifier par l'acheteur et de fournir par le fabricant lors des processus d'appel d'offres et des commandes.

### **0.9 Considérations relatives aux courts-circuits (Article 12)**

Pour les transformateurs de puissance conventionnels, le calcul des courants de court-circuit dans les enroulements dépend uniquement des composantes de l'impédance et de la résistance du transformateur et de l'alimentation auxquelles il est connecté.

Dans le cas de transformateurs utilisés pour alimenter des applications de conversion, il existe dans le convertisseur des conditions de défaut qu'il est nécessaire de prendre en compte lorsque la valeur de crête des courants de défaut peut être supérieure à celles qui résultent des transformateurs de puissance conventionnels. Ces conditions sont décrites en détail dans la présente partie de l'IEC 61378.

### **0.10 Composants (Article 13)**

Pour la conception des transformateurs, qu'ils soient destinés à des applications industrielles ou à des applications de conversion CCHT, le choix et le fonctionnement du changeur de prises en charge sont déterminants. La présente partie de l'IEC 61378 présente certains principes qui décident de l'utilisation des changeurs de prises dans ces applications.

Dans les applications CCHT, le choix et l'intégration des traversées du côté de la valve dans la conception globale sont d'une importance vitale.

Les exigences générales et les recommandations relatives à la construction, à l'intégration des traversées au transformateur et aux essais requis sont décrites en détail. Une norme IEC spécifique aux traversées CCHT est en cours d'élaboration et les recommandations de la présente partie de l'IEC 61378 utilisent des exigences de la nouvelle norme.

### **0.11 Maintenance (Article 14)**

Les statistiques indiquent que les transformateurs CCHT exigent un niveau élevé de maintenance. Les éléments qui nécessitent une attention particulière sont les changeurs de prises en charge et les traversées du côté valve. La présente norme prête une attention toute particulière aux exigences de maintenance.

### **0.12 Surveillance et analyses sur site (Article 15)**

Il est recommandé de surveiller les transformateurs, si les problèmes sur site sont à réduire et c'est dans ce cadre que le contrôle d'état est traité. La présente partie de l'IEC 61378 présente également des recommandations quant aux procédures et pratiques à suivre en cas de défaillance sur site. Ces recommandations sont faites pour ne pas détruire ou affecter les preuves et données vitales au cours des étapes initiales de l'analyse.

L'Article 15 traite également de l'utilisation du contrôle d'état pour cette application.

### **0.13 Autres sources d'information**

L'élaboration de la présente partie de l'IEC 61378 qui couvre particulièrement les applications de conversion CCHT de l'IEC 61378-2 a été influencée de manière significative par les travaux sur divers sujets du groupe de travail mixte 12/14.10 du CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques).

## TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –

### Partie 3: Guide d'application

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61378 fournit aux utilisateurs des informations sur des sujets spécifiques pour lesquels il existe des différences de conception, de construction, d'essais et de conditions de fonctionnement entre les transformateurs industriels et de conversion CCHT d'une part et les transformateurs conventionnels utilisés dans les systèmes de puissance d'autre part. En outre l'objectif de la présente partie de l'IEC 61378 est de fournir aux fabricants les éléments techniques de fond qui constituent la base des principes utilisés dans l'IEC 61378-1 et l'IEC 61378-2.

La présente partie de l'IEC 61378 est prévue pour compléter et non pour remplacer ou annuler le guide d'application pour les transformateurs de puissance, l'IEC 60076-8, dans la mesure où nombre des principes généraux contenus dans ladite publication s'appliquent également aux transformateurs de conversion.

#### 2 Références normatives

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

IEC 60076-1:2011, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

IEC 60076-5:2006, *Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit*

IEC 60076-14:2013, *Transformateurs de puissance – Partie 14: Transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température*

IEC 60296, *Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion*

IEC 60422, *Huiles minérales isolantes dans les matériels électriques – Lignes directrices pour la maintenance et la surveillance*

IEC 61378-1:2011, *Transformateurs de conversion – Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles*

IEC 61378-2:2001, *Transformateurs de conversion – Partie 2: Transformateurs pour applications CCHT*