

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –
Part 2: Modular multilevel converters**

**Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –
Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.200; 29.240

ISBN 978-2-8322-7354-8

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.
--

REDLINE VERSION

VERSION REDLINE



Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –

Part 2: Modular multilevel converters

Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –

Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires

CONTENTS

FOREWORD	5
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms	7
3.1 Terms and definitions	8
3.2 Symbols and abbreviated terms	9
3.2.1 Valve and simulation data	9
3.2.2 Semiconductor device characteristics	10
3.2.3 Other component characteristics	10
3.2.4 Operating parameters	10
3.2.5 Loss parameters	11
4 General conditions	11
4.1 General	11
4.2 Principles for loss determination	12
4.3 Categories of valve losses	12
4.4 Loss calculation method	13
4.5 Input parameters	13
4.5.1 General	13
4.5.2 Input data for numerical simulations	13
4.5.3 Input data coming from numerical simulations	14
4.5.4 Converter station data	14
4.5.5 Operating conditions	15
4.6 Contents and structure of valve loss determination report	15
5 Conduction losses	16
5.1 General	16
5.2 IGBT conduction losses	18
5.3 Diode conduction losses	19
5.4 Other conduction losses	20
6 DC voltage-dependent losses	20
7 Losses in d.c. capacitors of the valve	21
8 Switching losses	21
8.1 General	21
8.2 IGBT switching losses	22
8.3 Diode switching losses	22
9 Other losses	23
9.1 Snubber circuit losses	23
9.2 Valve electronics power consumption	23
9.2.1 General	23
9.2.2 Power supply from off-state voltage across each IGBT	24
9.2.3 Power supply from the d.c. capacitor	25
10 Total valve losses per HVDC substation	25
Annex A (informative) Description of power loss mechanisms in MMC valves	27
A.1 Introduction to MMC Converter topology	27
A.2 Valve voltage and current stresses	30
A.2.1 Simplified analysis with voltage and current in phase	30

A.2.2	Generalised analysis with voltage and current out of phase	31
A.2.3	Effects of third harmonic injection	32
A.3	Conduction losses in MMC building blocks	33
A.3.1	Description of conduction paths	33
A.3.2	Conduction losses in semiconductors	39
A.3.3	MMC building block d.c. capacitor losses	43
A.3.4	Other conduction losses	44
A.4	Switching losses	44
A.4.1	Description of state changes	44
A.4.2	Analysis of state changes during cycle	45
A.4.3	Worked example of switching losses	46
A.5	Other losses	49
A.5.1	Snubber losses	49
A.5.2	DC voltage-dependent losses	49
A.5.3	Valve electronics power consumption	52
A.6	Application to other variants of valve	54
A.6.1	General	54
A.6.2	Two-level full-bridge MMC building block	54
A.6.3	Multi-level MMC building blocks	55
Annex B (informative) Recommended data to be supplied with the loss calculation report		57
Bibliography		59
Figure 1	– Two basic versions of MMC building block designs	16
Figure 2	– Conduction paths in MMC building blocks	17
Figure A.1	– Phase unit of the modular multi-level converter (MMC) in basic half-bridge, two-level arrangement, with submodules	28
Figure A.2	– Phase unit of the cascaded two-level converter (CTL) in half-bridge form	29
Figure A.3	– Basic operation of the MMC converters	30
Figure A.4	– MMC converters showing composition of valve current	31
Figure A.5	– Phasor diagram showing a.c. system voltage, converter a.c. voltage and converter a.c. current	32
Figure A.6	– Effect of 3 rd harmonic injection on converter voltage and current	33
Figure A.7	– Two functionally equivalent variants of a “half-bridge”, two-level MMC building block	34
Figure A.8	– Conducting states in “half-bridge”, two-level MMC building block	35
Figure A.9	– Typical patterns of conduction for inverter operation (left) and rectifier operation (right), based on the submodule configuration of Figure A.7 a)	36
Figure A.10	– Example of converter with only one MMC building block per valve to illustrate switching behaviour	37
Figure A.11	– Inverter operation example of switching events	37
Figure A.12	– Rectifier operation example of switching events	38
Figure A.13	– Valve current and mean rectified valve current	40
Figure A.14	– IGBT and diode switching energy as a function of collector current	45
Figure A.15	– Valve voltage, current and switching behaviour for a hypothetical MMC valve consisting of 5 submodules	47
Figure A.16	– Power supply from IGBT terminals	52
Figure A.17	– Power supply from IGBT terminals in cell	53

Figure A.18 – Power supply from d.c. capacitor in submodule.....	54
Figure A.19 – One “full-bridge”, two-level MMC building block	55
Figure A.20 – Four possible variants of three-level MMC building block	56
Table 1 – Contributions to valve losses in different operating modes	26
Table A.1 – Hard switching events	44
Table A.2 – Soft switching events	45
Table A.3 – Summary of switching events from Figure A.15	48
Table B.1 – Valve loss data	57
Table B.2 – Other data.....	58

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC) VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –

Part 2: Modular multilevel converters

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.

This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.

IEC 62751-2 edition 1.1 contains the first edition (2014-08) [documents 22F/303/CDV and 22F/322A/RVC] and its amendment 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV and 22F/488B/RVC].

In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.

International Standard IEC 62751-2 has been prepared by subcommittee 22F: Power electronics for electrical transmission and distribution systems, of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment.

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

A list of all parts in the IEC 62751 series, published under the general title *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems*, can be found on the IEC website.

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

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

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

POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC) VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –

Part 2: Modular multilevel converters

1 Scope

This part of IEC 62751 gives the detailed method to be adopted for calculating the power losses in the valves for an HVDC system based on the “modular multi-level converter”, where each valve in the converter consists of a number of self-contained, two-terminal controllable voltage sources connected in series. It is applicable both for the cases where each modular cell uses only a single turn-off semiconductor device in each switch position, and the case where each switch position consists of a number of turn-off semiconductor devices in series (topology also referred to as “cascaded two-level converter”). The main formulae are given for the two-level “half-bridge” configuration but guidance is also given in Annex A as to how to extend the results to certain other types of MMC building block configuration.

The standard is written mainly for insulated gate bipolar transistors (IGBTs) but may also be used for guidance in the event that other types of turn-off semiconductor devices are used.

Power losses in other items of equipment in the HVDC station, apart from the converter valves, are excluded from the scope of this standard.

This standard does not apply to converter valves for line-commutated converter HVDC systems.

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 60633, *Terminology for high-voltage direct-current (HVDC) transmission*

IEC 61803, *Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations*

IEC 62747, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

IEC 62751-1:2014, *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems – Part 1: General requirements*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	63
1 Domaine d'application	65
2 Références normatives	65
3 Termes, définitions, symboles et abréviations	66
3.1 Termes et définitions	66
3.2 Symboles et abréviations	68
3.2.1 Valve et données de simulation	68
3.2.2 Caractéristiques du dispositif à semi-conducteur	68
3.2.3 Autres caractéristiques de composant	69
3.2.4 Paramètres de fonctionnement	69
3.2.5 Paramètres de perte	70
4 Conditions générales	70
4.1 Généralités	70
4.2 Principe de détermination des pertes	70
4.3 Catégories de pertes de la valve	71
4.4 Méthode de calcul des pertes	71
4.5 Paramètres d'entrée	72
4.5.1 Généralités	72
4.5.2 Données d'entrée pour les simulations numériques	72
4.5.3 Données d'entrée provenant des simulations numériques	73
4.5.4 Données du poste de conversion	73
4.5.5 Conditions de fonctionnement	74
4.6 Contenu et structure du rapport de détermination des pertes de la valve	74
5 Pertes de conduction	74
5.1 Généralités	74
5.2 Pertes de conduction de l'IGBT	77
5.3 Pertes de conduction de la diode	78
5.4 Autres pertes de conduction	79
6 Pertes dépendant de la tension c.c.	79
7 Pertes dans les condensateurs c.c. de la valve	80
8 Pertes de commutation	80
8.1 Généralités	80
8.2 Pertes de commutation de l'IGBT	81
8.3 Pertes de commutation de la diode	81
9 Autres pertes	82
9.1 Pertes du circuit d'amortissement	82
9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve	83
9.2.1 Généralités	83
9.2.2 Alimentation électrique à partir de la tension à l'état bloqué de chaque IGBT	84
9.2.3 Alimentation électrique à partir du condensateur c.c.	84
10 Pertes totales de la valve par poste CCHT	85
Annexe A (informative) Description des mécanismes de perte de puissance dans les valves à MMC	87
A.1 Introduction à la topologie du convertisseur MMC	87

A.2	Tension de valve et contraintes de courant	90
A.2.1	Analyse simplifiée avec tension et courant en phase	90
A.2.2	Analyse généralisée avec déphasage de tension et de courant	92
A.2.3	Effets de l'injection du troisième harmonique	94
A.3	Pertes de conduction dans les blocs modules MMC	95
A.3.1	Description des chemins de conduction	95
A.3.2	Pertes de conduction dans les semi-conducteurs.....	101
A.3.3	Pertes du condensateur c.c. du bloc module MMC.....	107
A.3.4	Autres pertes de conduction	107
A.4	Pertes de commutation	107
A.4.1	Description des changements d'état	107
A.4.2	Analyse des changements d'état pendant le cycle	109
A.4.3	Exemple pratique de pertes de commutation	110
A.5	Autres pertes	113
A.5.1	Pertes du circuit d'amortissement.....	113
A.5.2	Pertes dépendant de la tension c.c.	113
A.5.3	Consommation de puissance de l'électronique de valve.....	116
A.6	Application à d'autres variantes de valve	119
A.6.1	Généralités.....	119
A.6.2	Bloc module MMC en pont intégral à deux niveaux	119
A.6.3	Blocs modules MMC multiniveaux.....	120
Annexe B (informative) Données recommandées à fournir dans le rapport de calcul des pertes.....		123
Bibliographie.....		125
Figure 1 – Deux versions de base des conceptions de bloc module MMC		75
Figure 2 – Chemins de conduction dans les blocs module MMC		76
Figure A.1 – Unité de phase du convertisseur multiniveaux modulaire (MMC) en disposition à deux niveaux en demi-pont, avec sous-modules		88
Figure A.2 – Unité de phase du convertisseur à deux niveaux monté en cascade (CTL) en demi-pont.....		89
Figure A.3 – Fonctionnement de base des convertisseurs MMC.....		90
Figure A.4 – Convertisseurs MMC montrant la composition du courant de valve		92
Figure A.5 – Schéma de phase illustrant la tension d'un système c.a., la tension c.a. d'un convertisseur et le courant c.a. d'un convertisseur		94
Figure A.6 – Effet de l'injection du 3 ^{ème} harmonique sur la tension et le courant du convertisseur		95
Figure A.7 – Deux variantes équivalentes d'un point de vue fonctionnel d'un bloc module MMC à deux niveaux "en demi-pont"		96
Figure A.8 – États de conduction dans un bloc module MMC à deux niveaux "en demi-pont"		97
Figure A.9 – Modèles de conduction classiques pour le mode de fonctionnement en onduleur (à gauche) et le mode de fonctionnement en redresseur (à droite) , basés sur la configuration du sous-module de la Figure A.7 a).....		98
Figure A.10 – Exemple de convertisseur doté d'un seul bloc module MMC par valve afin d'illustrer le comportement de commutation		99
Figure A.11 – Exemple de fonctionnement en mode onduleur des événements de commutation		100

Figure A.12 – Exemple de fonctionnement en mode redresseur des événements de commutation	100
Figure A.13 – Courant de valve et courant de valve redressé moyen	103
Figure A.14 – Énergie de commutation de l'IGBT et de la diode en fonction du courant du collecteur	108
Figure A.15 – Tension, courant et comportement de commutation d'une valve MMC hypothétique composée de 5 sous-modules	111
Figure A.16 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT	117
Figure A.17 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT de la cellule	118
Figure A.18 – Alimentation à partir du condensateur c.c. du sous-module	119
Figure A.19 – Bloc module MMC à deux niveaux «en pont intégral»	120
Figure A.20 – Quatre variantes possibles de bloc module MMC à trois niveaux	121
Tableau 1 – Contributions aux pertes de valve dans les différents modes de fonctionnement	86
Tableau A.1 – Événements de commutation durs	108
Tableau A.2 – Événements de commutation doux	109
Tableau A.3 – Récapitulatif des événements de commutation issus de la Figure A.15	112
Tableau B.1 – Données des pertes de la valve	123
Tableau B.2 – Autres données	124

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT) –

Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. 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.

Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de son amendement a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.

L'IEC 62751-2 édition 1.1 contient la première édition (2014-08) [documents 22F/303/CDV et 22F/322A/RVC] et son amendement 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV et 22F/488B/RVC].

Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts sont en vert, les suppressions sont en rouge, barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.

La Norme internationale IEC 62751-2 a été établie par le sous-comité 22F: Électronique de puissance pour les réseaux électriques de transport et de distribution, du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance.

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

Une liste de toutes les parties de l'IEC 62751, publiées sous le titre général *Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)* peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

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

PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT) –

Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62571 donne la méthode détaillée à adopter pour calculer les pertes de puissance dans les valves d'un système CCHT doté d'un «convertisseur multiniveaux modulaire» dont chaque valve est composée d'un certain nombre de sources de tension indépendantes commandables à deux bornes connectées en série. Elle s'applique lorsque chaque cellule modulaire n'utilise qu'un seul dispositif à semi-conducteur blocable dans chaque position de commutation, et lorsque chaque position de commutation est composée d'un certain nombre de dispositifs à semi-conducteur blocables en série (cette topologie étant également appelée «convertisseur à deux niveaux monté en cascade»). Les principales formules sont données pour la configuration "en demi-pont" à deux niveaux. Des lignes directrices sont également données à l'Annexe A pour indiquer l'étendue des résultats de certains autres types de configurations de bloc module MMC.

La norme a été essentiellement élaborée pour les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), mais elle peut également être utilisée comme guide en cas d'utilisation d'autres dispositifs à semi-conducteur blocables.

Les pertes de puissance dans d'autres parties de l'équipement du poste CCHT, outre les valves à convertisseur, sont exclues du domaine d'application de la présente norme.

Les valves à convertisseur des systèmes CCHT munis de convertisseurs commutés par le réseau sont exclues de la présente norme.

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 60633, *Terminologie pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 61803, *Détermination des pertes en puissance dans les postes de conversion en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 62747, *Terminologie relative aux convertisseurs de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 62751-1:2014, *Pertes de puissance dans les valves à convertisseur à source de tension (VSC) des systèmes de transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) – Partie 1: Exigences générales*

ISO/IEC Guide 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

FINAL VERSION

VERSION FINALE



**Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –
Part 2: Modular multilevel converters**

**Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –
Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires**

CONTENTS

FOREWORD	5
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms	7
3.1 Terms and definitions	8
3.2 Symbols and abbreviated terms	9
3.2.1 Valve and simulation data	9
3.2.2 Semiconductor device characteristics	10
3.2.3 Other component characteristics	10
3.2.4 Operating parameters	10
3.2.5 Loss parameters	11
4 General conditions	11
4.1 General	11
4.2 Principles for loss determination	12
4.3 Categories of valve losses	12
4.4 Loss calculation method	13
4.5 Input parameters	13
4.5.1 General	13
4.5.2 Input data for numerical simulations	13
4.5.3 Input data coming from numerical simulations	14
4.5.4 Converter station data	14
4.5.5 Operating conditions	15
4.6 Contents and structure of valve loss determination report	15
5 Conduction losses	15
5.1 General	15
5.2 IGBT conduction losses	18
5.3 Diode conduction losses	19
5.4 Other conduction losses	20
6 DC voltage-dependent losses	20
7 Losses in d.c. capacitors of the valve	21
8 Switching losses	21
8.1 General	21
8.2 IGBT switching losses	21
8.3 Diode switching losses	22
9 Other losses	23
9.1 Snubber circuit losses	23
9.2 Valve electronics power consumption	23
9.2.1 General	23
9.2.2 Power supply from off-state voltage across each IGBT	24
9.2.3 Power supply from the d.c. capacitor	25
10 Total valve losses per HVDC substation	25
Annex A (informative) Description of power loss mechanisms in MMC valves	27
A.1 Introduction to MMC Converter topology	27
A.2 Valve voltage and current stresses	30
A.2.1 Simplified analysis with voltage and current in phase	30

A.2.2	Generalised analysis with voltage and current out of phase	31
A.2.3	Effects of third harmonic injection	32
A.3	Conduction losses in MMC building blocks	33
A.3.1	Description of conduction paths	33
A.3.2	Conduction losses in semiconductors	39
A.3.3	MMC building block d.c. capacitor losses	43
A.3.4	Other conduction losses	43
A.4	Switching losses	43
A.4.1	Description of state changes	43
A.4.2	Analysis of state changes during cycle	45
A.4.3	Worked example of switching losses	45
A.5	Other losses	48
A.5.1	Snubber losses	48
A.5.2	DC voltage-dependent losses	48
A.5.3	Valve electronics power consumption	51
A.6	Application to other variants of valve	53
A.6.1	General	53
A.6.2	Two-level full-bridge MMC building block	53
A.6.3	Multi-level MMC building blocks	54
Annex B (informative)	Recommended data to be supplied with the loss calculation report	56
Bibliography		58
Figure 1	– Two basic versions of MMC building block designs	16
Figure 2	– Conduction paths in MMC building blocks	17
Figure A.1	– Phase unit of the modular multi-level converter (MMC) in basic half-bridge, two-level arrangement, with submodules	28
Figure A.2	– Phase unit of the cascaded two-level converter (CTL) in half-bridge form	29
Figure A.3	– Basic operation of the MMC converters	30
Figure A.4	– MMC converters showing composition of valve current	31
Figure A.5	– Phasor diagram showing a.c. system voltage, converter a.c. voltage and converter a.c. current	32
Figure A.6	– Effect of 3 rd harmonic injection on converter voltage and current	33
Figure A.7	– Two functionally equivalent variants of a “half-bridge”, two-level MMC building block	34
Figure A.8	– Conducting states in “half-bridge”, two-level MMC building block	35
Figure A.9	– Typical patterns of conduction for inverter operation (left) and rectifier operation (right), based on the submodule configuration of Figure A.7 a)	36
Figure A.10	– Example of converter with only one MMC building block per valve to illustrate switching behaviour	37
Figure A.11	– Inverter operation example of switching events	37
Figure A.12	– Rectifier operation example of switching events	38
Figure A.13	– Valve current and mean rectified valve current	40
Figure A.14	– IGBT and diode switching energy as a function of collector current	44
Figure A.15	– Valve voltage, current and switching behaviour for a hypothetical MMC valve consisting of 5 submodules	46
Figure A.16	– Power supply from IGBT terminals	51
Figure A.17	– Power supply from IGBT terminals in cell	52

Figure A.18 – Power supply from d.c. capacitor in submodule.....	53
Figure A.19 – One “full-bridge”, two-level MMC building block	54
Figure A.20 – Four possible variants of three-level MMC building block	55
Table 1 – Contributions to valve losses in different operating modes	26
Table A.1 – Hard switching events	44
Table A.2 – Soft switching events	45
Table A.3 – Summary of switching events from Figure A.15	47
Table B.1 – Valve loss data	56
Table B.2 – Other data.....	57

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC) VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –

Part 2: Modular multilevel converters

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.

This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.

IEC 62751-2 edition 1.1 contains the first edition (2014-08) [documents 22F/303/CDV and 22F/322A/RVC] and its amendment 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV and 22F/488B/RVC].

This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.

International Standard IEC 62751-2 has been prepared by subcommittee 22F: Power electronics for electrical transmission and distribution systems, of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment.

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

A list of all parts in the IEC 62751 series, published under the general title *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems*, can be found on the IEC website.

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

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

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

POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC) VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –

Part 2: Modular multilevel converters

1 Scope

This part of IEC 62751 gives the detailed method to be adopted for calculating the power losses in the valves for an HVDC system based on the “modular multi-level converter”, where each valve in the converter consists of a number of self-contained, two-terminal controllable voltage sources connected in series. It is applicable both for the cases where each modular cell uses only a single turn-off semiconductor device in each switch position, and the case where each switch position consists of a number of turn-off semiconductor devices in series (topology also referred to as “cascaded two-level converter”). The main formulae are given for the two-level “half-bridge” configuration but guidance is also given in Annex A as to how to extend the results to certain other types of MMC building block configuration.

The standard is written mainly for insulated gate bipolar transistors (IGBTs) but may also be used for guidance in the event that other types of turn-off semiconductor devices are used.

Power losses in other items of equipment in the HVDC station, apart from the converter valves, are excluded from the scope of this standard.

This standard does not apply to converter valves for line-commutated converter HVDC systems.

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 60633, *Terminology for high-voltage direct-current (HVDC) transmission*

IEC 61803, *Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations*

IEC 62747, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

IEC 62751-1:2014, *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems – Part 1: General requirements*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	63
1 Domaine d'application	65
2 Références normatives	65
3 Termes, définitions, symboles et abréviations	66
3.1 Termes et définitions	66
3.2 Symboles et abréviations	68
3.2.1 Valve et données de simulation	68
3.2.2 Caractéristiques du dispositif à semi-conducteur	68
3.2.3 Autres caractéristiques de composant	69
3.2.4 Paramètres de fonctionnement	69
3.2.5 Paramètres de perte	70
4 Conditions générales	70
4.1 Généralités	70
4.2 Principe de détermination des pertes	70
4.3 Catégories de pertes de la valve	71
4.4 Méthode de calcul des pertes	71
4.5 Paramètres d'entrée	72
4.5.1 Généralités	72
4.5.2 Données d'entrée pour les simulations numériques	72
4.5.3 Données d'entrée provenant des simulations numériques	72
4.5.4 Données du poste de conversion	73
4.5.5 Conditions de fonctionnement	74
4.6 Contenu et structure du rapport de détermination des pertes de la valve	74
5 Pertes de conduction	74
5.1 Généralités	74
5.2 Pertes de conduction de l'IGBT	76
5.3 Pertes de conduction de la diode	77
5.4 Autres pertes de conduction	78
6 Pertes dépendant de la tension c.c.	78
7 Pertes dans les condensateurs c.c. de la valve	79
8 Pertes de commutation	80
8.1 Généralités	80
8.2 Pertes de commutation de l'IGBT	80
8.3 Pertes de commutation de la diode	81
9 Autres pertes	81
9.1 Pertes du circuit d'amortissement	81
9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve	82
9.2.1 Généralités	82
9.2.2 Alimentation électrique à partir de la tension à l'état bloqué de chaque IGBT	83
9.2.3 Alimentation électrique à partir du condensateur c.c.	84
10 Pertes totales de la valve par poste CCHT	84
Annexe A (informative) Description des mécanismes de perte de puissance dans les valves à MMC	86
A.1 Introduction à la topologie du convertisseur MMC	86

A.2	Tension de valve et contraintes de courant	89
A.2.1	Analyse simplifiée avec tension et courant en phase	89
A.2.2	Analyse généralisée avec déphasage de tension et de courant	91
A.2.3	Effets de l'injection du troisième harmonique	93
A.3	Pertes de conduction dans les blocs modules MMC	94
A.3.1	Description des chemins de conduction	94
A.3.2	Pertes de conduction dans les semi-conducteurs.....	100
A.3.3	Pertes du condensateur c.c. du bloc module MMC.....	104
A.3.4	Autres pertes de conduction	104
A.4	Pertes de commutation	104
A.4.1	Description des changements d'état	104
A.4.2	Analyse des changements d'état pendant le cycle	106
A.4.3	Exemple pratique de pertes de commutation	107
A.5	Autres pertes	110
A.5.1	Pertes du circuit d'amortissement.....	110
A.5.2	Pertes dépendant de la tension c.c.	110
A.5.3	Consommation de puissance de l'électronique de valve.....	113
A.6	Application à d'autres variantes de valve	116
A.6.1	Généralités.....	116
A.6.2	Bloc module MMC en pont intégral à deux niveaux	116
A.6.3	Blocs modules MMC multiniveaux.....	117
Annexe B (informative) Données recommandées à fournir dans le rapport de calcul des pertes.....		120
Bibliographie.....		122
Figure 1 – Deux versions de base des conceptions de bloc module MMC		74
Figure 2 – Chemins de conduction dans les blocs module MMC		75
Figure A.1 – Unité de phase du convertisseur multiniveaux modulaire (MMC) en disposition à deux niveaux en demi-pont, avec sous-modules		87
Figure A.2 – Unité de phase du convertisseur à deux niveaux monté en cascade (CTL) en demi-pont.....		88
Figure A.3 – Fonctionnement de base des convertisseurs MMC.....		89
Figure A.4 – Convertisseurs MMC montrant la composition du courant de valve		91
Figure A.5 – Schéma de phase illustrant la tension d'un système c.a., la tension c.a. d'un convertisseur et le courant c.a. d'un convertisseur		93
Figure A.6 – Effet de l'injection du 3 ^{ème} harmonique sur la tension et le courant du convertisseur		94
Figure A.7 – Deux variantes équivalentes d'un point de vue fonctionnel d'un bloc module MMC à deux niveaux "en demi-pont"		95
Figure A.8 – États de conduction dans un bloc module MMC à deux niveaux "en demi-pont"		96
Figure A.9 – Modèles de conduction classiques pour le mode de fonctionnement en onduleur (à gauche) et le mode de fonctionnement en redresseur (à droite) , basés sur la configuration du sous-module de la Figure A.7 a).....		97
Figure A.10 – Exemple de convertisseur doté d'un seul bloc module MMC par valve afin d'illustrer le comportement de commutation		98
Figure A.11 – Exemple de fonctionnement en mode onduleur des événements de commutation		99

Figure A.12 – Exemple de fonctionnement en mode redresseur des événements de commutation	99
Figure A.13 – Courant de valve et courant de valve redressé moyen	101
Figure A.14 – Énergie de commutation de l'IGBT et de la diode en fonction du courant du collecteur	106
Figure A.15 – Tension, courant et comportement de commutation d'une valve MMC hypothétique composée de 5 sous-modules	108
Figure A.16 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT	114
Figure A.17 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT de la cellule	115
Figure A.18 – Alimentation à partir du condensateur c.c. du sous-module	116
Figure A.19 – Bloc module MMC à deux niveaux «en pont intégral»	117
Figure A.20 – Quatre variantes possibles de bloc module MMC à trois niveaux	118
Tableau 1 – Contributions aux pertes de valve dans les différents modes de fonctionnement	85
Tableau A.1 – Événements de commutation durs	105
Tableau A.2 – Événements de commutation doux	106
Tableau A.3 – Récapitulatif des événements de commutation issus de la Figure A.15	109
Tableau B.1 – Données des pertes de la valve	120
Tableau B.2 – Autres données	121

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT) –

Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. 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.

Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de son amendement a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.

L'IEC 62751-2 édition 1.1 contient la première édition (2014-08) [documents 22F/303/CDV et 22F/322A/RVC] et son amendement 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV et 22F/488B/RVC].

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.

La Norme internationale IEC 62751-2 a été établie par le sous-comité 22F: Électronique de puissance pour les réseaux électriques de transport et de distribution, du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance.

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

Une liste de toutes les parties de l'IEC 62751, publiées sous le titre général *Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)* peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

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

PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT) –

Partie 2: Convertisseurs multiniveaux modulaires

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62571 donne la méthode détaillée à adopter pour calculer les pertes de puissance dans les valves d'un système CCHT doté d'un «convertisseur multiniveaux modulaire» dont chaque valve est composée d'un certain nombre de sources de tension indépendantes commandables à deux bornes connectées en série. Elle s'applique lorsque chaque cellule modulaire n'utilise qu'un seul dispositif à semi-conducteur blocable dans chaque position de commutation, et lorsque chaque position de commutation est composée d'un certain nombre de dispositifs à semi-conducteur blocables en série (cette topologie étant également appelée «convertisseur à deux niveaux monté en cascade»). Les principales formules sont données pour la configuration "en demi-pont" à deux niveaux. Des lignes directrices sont également données à l'Annexe A pour indiquer l'étendue des résultats de certains autres types de configurations de bloc module MMC.

La norme a été essentiellement élaborée pour les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), mais elle peut également être utilisée comme guide en cas d'utilisation d'autres dispositifs à semi-conducteur blocables.

Les pertes de puissance dans d'autres parties de l'équipement du poste CCHT, outre les valves à convertisseur, sont exclues du domaine d'application de la présente norme.

Les valves à convertisseur des systèmes CCHT munis de convertisseurs commutés par le réseau sont exclues de la présente norme.

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 60633, *Terminologie pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 61803, *Détermination des pertes en puissance dans les postes de conversion en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 62747, *Terminologie relative aux convertisseurs de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 62751-1:2014, *Pertes de puissance dans les valves à convertisseur à source de tension (VSC) des systèmes de transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) – Partie 1: Exigences générales*

ISO/IEC Guide 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*