



IEC 62751-2

Edition 1.2 2023-08
CONSOLIDATED VERSION

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, 29.240.99

ISBN 978-2-8322-7472-9

**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	15
4.5.4 Converter station data	15
4.5.5 Operating conditions.....	16
4.6 Contents and structure of valve loss determination report	16
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	21
7 Losses in d.c. capacitors of the valve	21
8 Switching losses	22
8.1 General.....	22
8.2 IGBT switching losses.....	22
8.3 Diode switching losses.....	23
9 Other losses	23
9.1 Snubber circuit losses.....	23
9.2 Valve electronics power consumption.....	24
9.2.1 General	24
9.2.2 Power supply from off-state voltage across each IGBT	25
9.2.3 Power supply from the d.c. capacitor	25
10 Total valve losses per HVDC substation	26
Annex A (informative) Description of power loss mechanisms in MMC valves	28
A.1 Introduction to MMC Converter topology	28
A.2 Valve voltage and current stresses	31
A.2.1 Simplified analysis with voltage and current in phase.....	31
A.2.2 Generalised analysis with voltage and current out of phase	32

A.2.3	Effects of third harmonic injection	33
A.3	Conduction losses in MMC building blocks	34
A.3.1	Description of conduction paths	34
A.3.2	Conduction losses in semiconductors	40
A.3.3	MMC building block d.c. capacitor losses.....	44
A.3.4	Other conduction losses	45
A.4	Switching losses	45
A.4.1	Description of state changes.....	45
A.4.2	Analysis of state changes during cycle	46
A.4.3	Worked example of switching losses.....	47
A.5	Other losses	50
A.5.1	Snubber losses.....	50
A.5.2	DC voltage-dependent losses	50
A.5.3	Valve electronics power consumption	53
A.6	Application to other variants of valve.....	55
A.6.1	General	55
A.6.2	Two-level full-bridge MMC building block.....	55
A.6.3	Multi-level MMC building blocks.....	56
Annex B (informative) Recommended data to be supplied with the loss calculation report.....		58
Annex C (informative) Loss measurement.....		60
Bibliography.....		61
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		29
Figure A.2 – Phase unit of the cascaded two-level converter (CTL) in half-bridge form		30
Figure A.3 – Basic operation of the MMC converters.....		31
Figure A.4 – MMC converters showing composition of valve current		32
Figure A.5 – Phasor diagram showing a.c. system voltage, converter a.c. voltage and converter a.c. current.....		33
Figure A.6 – Effect of 3 rd harmonic injection on converter voltage and current		34
Figure A.7 – Two functionally equivalent variants of a “half-bridge”, two-level MMC building block.....		35
Figure A.8 – Conducting states in “half-bridge”, two-level MMC building block		36
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).....		37
Figure A.10 – Example of converter with only one MMC building block per valve to illustrate switching behaviour		38
Figure A.11 – Inverter operation example of switching events		38
Figure A.12 – Rectifier operation example of switching events		39
Figure A.13 – Valve current and mean rectified valve current.....		41
Figure A.14 – IGBT and diode switching energy as a function of collector current.....		46
Figure A.15 – Valve voltage, current and switching behaviour for a hypothetical MMC valve consisting of 5 submodules.....		48
Figure A.16 – Power supply from IGBT terminals		53

Figure A.17 – Power supply from IGBT terminals in cell	54
Figure A.18 – Power supply from d.c. capacitor in submodule	55
Figure A.19 – One “full-bridge”, two-level MMC building block	56
Figure A.20 – Four possible variants of three-level MMC building block	57
Table 1 – Contributions to valve losses in different operating modes	27
Table A.1 – Hard switching events	45
Table A.2 – Soft switching events	46
Table A.3 – Summary of switching events from Figure A.15	49
Table B.1 – Valve loss data	58
Table B.2 – Other data	59

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 amendments has been prepared for user convenience.

IEC 62751-2 edition 1.2 contains the first edition (2014-08) [documents 22F/303/CDV and 22F/322A/RVC], its amendment 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV and 22F/488B/RVC] and its amendment 2 (2023-08) [documents 22F/712/CDV and 22F/726/RVC].

In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendments 1 and 2. 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 62751series, 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 this document and its amendments will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document 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	65
1 Domaine d'application	67
2 Références normatives	67
3 Termes, définitions, symboles et abréviations	68
3.1 Termes et définitions	68
3.2 Symboles et abréviations	70
3.2.1 Valve et données de simulation	70
3.2.2 Caractéristiques du dispositif à semi-conducteur	70
3.2.3 Autres caractéristiques de composant	71
3.2.4 Paramètres de fonctionnement	71
3.2.5 Paramètres de perte	72
4 Conditions générales	72
4.1 Généralités	72
4.2 Principe de détermination des pertes	72
4.3 Catégories de pertes de la valve	73
4.4 Méthode de calcul des pertes	73
4.5 Paramètres d'entrée	74
4.5.1 Généralités	74
4.5.2 Données d'entrée pour les simulations numériques	74
4.5.3 Données d'entrée provenant des simulations numériques	75
4.5.4 Données du poste de conversion	76
4.5.5 Conditions de fonctionnement	76
4.6 Contenu et structure du rapport de détermination des pertes de la valve	77
5 Pertes de conduction	77
5.1 Généralités	77
5.2 Pertes de conduction de l'IGBT	79
5.3 Pertes de conduction de la diode	80
5.4 Autres pertes de conduction	81
6 Pertes dépendant de la tension c.c.	82
7 Pertes dans les condensateurs c.c. de la valve	82
8 Pertes de commutation	83
8.1 Généralités	83
8.2 Pertes de commutation de l'IGBT	83
8.3 Pertes de commutation de la diode	84
9 Autres pertes	84
9.1 Pertes du circuit d'amortissement	84
9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve	85
9.2.1 Généralités	85
9.2.2 Alimentation électrique à partir de la tension à l'état bloqué de chaque IGBT	86
9.2.3 Alimentation électrique à partir du condensateur c.c.	87
10 Pertes totales de la valve par poste CCHT	88
Annexe A (informative) Description des mécanismes de perte de puissance dans les valves à MMC	89
A.1 Introduction à la topologie du convertisseur MMC	89
A.2 Tension de valve et contraintes de courant	92

A.2.1	Analyse simplifiée avec tension et courant en phase	92
A.2.2	Analyse généralisée avec déphasage de tension et de courant	94
A.2.3	Effets de l'injection du troisième harmonique	96
A.3	Pertes de conduction dans les blocs modules MMC	97
A.3.1	Description des chemins de conduction	97
A.3.2	Pertes de conduction dans les semi-conducteurs.....	103
A.3.3	Pertes du condensateur c.c. du bloc module MMC.....	109
A.3.4	Autres pertes de conduction	109
A.4	Pertes de commutation	109
A.4.1	Description des changements d'état	109
A.4.2	Analyse des changements d'état pendant le cycle	111
A.4.3	Exemple pratique de pertes de commutation	112
A.5	Autres pertes	115
A.5.1	Pertes du circuit d'amortissement	115
A.5.2	Pertes dépendant de la tension c.c.	115
A.5.3	Consommation de puissance de l'électronique de valve.....	118
A.6	Application à d'autres variantes de valve	121
A.6.1	Généralités	121
A.6.2	Bloc module MMC en pont intégral à deux niveaux	121
A.6.3	Blocs modules MMC multiniveaux.....	122
	Annexe B (informative) Données recommandées à fournir dans le rapport de calcul des pertes.....	125
	Annexe C (informative) Mesurage des pertes.....	127
	Bibliographie.....	128
	Figure 1 – Deux versions de base des conceptions de bloc module MMC	77
	Figure 2 – Chemins de conduction dans les blocs module MMC	78
	Figure A.1 – Unité de phase du convertisseur multiniveaux modulaire (MMC) en disposition à deux niveaux en demi-pont, avec sous-modules	90
	Figure A.2 – Unité de phase du convertisseur à deux niveaux monté en cascade (CTL) en demi-pont.....	91
	Figure A.3 – Fonctionnement de base des convertisseurs MMC.....	92
	Figure A.4 – Convertisseurs MMC montrant la composition du courant de valve	94
	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	96
	Figure A.6 – Effet de l'injection du 3 ^{ème} harmonique sur la tension et le courant du convertisseur	97
	Figure A.7 – Deux variantes équivalentes d'un point de vue fonctionnel d'un bloc module MMC à deux niveaux "en demi-pont"	98
	Figure A.8 – États de conduction dans un bloc module MMC à deux niveaux "en demi- pont".....	99
	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).....	100
	Figure A.10 – Exemple de convertisseur doté d'un seul bloc module MMC par valve afin d'illustrer le comportement de commutation	101
	Figure A.11 – Exemple de fonctionnement en mode onduleur des événements de commutation	102

Figure A.12 – Exemple de fonctionnement en mode redresseur des événements de commutation	102
Figure A.13 – Courant de valve et courant de valve redressé moyen	105
Figure A.14 – Énergie de commutation de l'IGBT et de la diode en fonction du courant du collecteur	110
Figure A.15 – Tension, courant et comportement de commutation d'une valve MMC hypothétique composée de 5 sous-modules	113
Figure A.16 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT	119
Figure A.17 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT de la cellule	120
Figure A.18 – Alimentation à partir du condensateur c.c. du sous-module	121
Figure A.19 – Bloc module MMC à deux niveaux «en pont intégral»	122
Figure A.20 – Quatre variantes possibles de bloc module MMC à trois niveaux	123
Tableau 1 – Contributions aux pertes de valve dans les différents modes de fonctionnement	88
Tableau A.1 – Événements de commutation durs	110
Tableau A.2 – Événements de commutation doux	111
Tableau A.3 – Récapitulatif des événements de commutation issus de la Figure A.15	114
Tableau B.1 – Données des pertes de la valve	125
Tableau B.2 – Autres données	126

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 ses amendements a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.

L'IEC 62751-2 édition 1.2 contient la première édition (2014-08) [documents 22F/303/CDV et 22F/322A/RVC], son amendement 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV et 22F/488B/RVC] et son amendement 2 (2023-08) [documents 22F/712/CDV and 22F/726/RVC].

Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par les amendements 1 et 2. 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 ce document et de ses amendements ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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	15
4.5.5 Operating conditions.....	15
4.6 Contents and structure of valve loss determination report	16
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.....	24
9.2.1 General	24
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	26
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
Annex C (informative)	Loss measurement	58
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	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 amendments has been prepared for user convenience.

IEC 62751-2 edition 1.2 contains the first edition (2014-08) [documents 22F/303/CDV and 22F/322A/RVC], its amendment 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV and 22F/488B/RVC] and its amendment 2 (2023-08) [documents 22F/712/CDV and 22F/726/RVC].

This Final version does not show where the technical content is modified by amendments 1 and 2. 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 62751series, 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 this document and its amendments will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document 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	75
5.1 Généralités	75
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.	80
7 Pertes dans les condensateurs c.c. de la valve	80
8 Pertes de commutation	81
8.1 Généralités	81
8.2 Pertes de commutation de l'IGBT	81
8.3 Pertes de commutation de la diode	82
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.	85
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.....	105
A.3.4	Autres pertes de conduction	105
A.4	Pertes de commutation	105
A.4.1	Description des changements d'état	105
A.4.2	Analyse des changements d'état pendant le cycle	107
A.4.3	Exemple pratique de pertes de commutation	108
A.5	Autres pertes	111
A.5.1	Pertes du circuit d'amortissement	111
A.5.2	Pertes dépendant de la tension c.c.	111
A.5.3	Consommation de puissance de l'électronique de valve.....	114
A.6	Application à d'autres variantes de valve	117
A.6.1	Généralités	117
A.6.2	Bloc module MMC en pont intégral à deux niveaux	117
A.6.3	Blocs modules MMC multiniveaux.....	118
Annexe B (informative) Données recommandées à fournir dans le rapport de calcul des pertes.....		121
Annexe C (informative) Mesurage des pertes.....		123
Bibliographie.....		124
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	102
Figure A.14 – Énergie de commutation de l'IGBT et de la diode en fonction du courant du collecteur	107
Figure A.15 – Tension, courant et comportement de commutation d'une valve MMC hypothétique composée de 5 sous-modules	109
Figure A.16 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT	115
Figure A.17 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT de la cellule	116
Figure A.18 – Alimentation à partir du condensateur c.c. du sous-module	117
Figure A.19 – Bloc module MMC à deux niveaux «en pont intégral»	118
Figure A.20 – Quatre variantes possibles de bloc module MMC à trois niveaux	119
Tableau 1 – Contributions aux pertes de valve dans les différents modes de fonctionnement	86
Tableau A.1 – Événements de commutation durs	106
Tableau A.2 – Événements de commutation doux	107
Tableau A.3 – Récapitulatif des événements de commutation issus de la Figure A.15	110
Tableau B.1 – Données des pertes de la valve	121
Tableau B.2 – Autres données	122

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 ses amendements a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.

L'IEC 62751-2 édition 1.2 contient la première édition (2014-08) [documents 22F/303/CDV et 22F/322A/RVC], son amendement 1 (2019-08) [documents 22F/479/CDV et 22F/488B/RVC] et son amendement 2 (2023-08) [documents 22F/712/CDV and 22F/726/RVC].

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par les amendements 1 et 2. 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 ce document et de ses amendements ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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)*