



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

PRICE CODE **XA**
CODE PRIX

ICS 29.200; 29.240

ISBN 978-2-8322-1836-5

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
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
5 Conduction losses	15
5.1 General.....	15
5.2 IGBT conduction losses	16
5.3 Diode conduction losses	17
5.4 Other conduction losses.....	18
6 DC voltage-dependent losses	19
7 Losses in d.c. capacitors of the valve	19
8 Switching losses.....	20
8.1 General.....	20
8.2 IGBT switching losses.....	20
8.3 Diode switching losses.....	21
9 Other losses	21
9.1 Snubber circuit losses.....	21
9.2 Valve electronics power consumption.....	22
9.2.1 General	22
9.2.2 Power supply from off-state voltage across each IGBT	23
9.2.3 Power supply from the d.c. capacitor	23
10 Total valve losses per HVDC substation	24
Annex A (informative) Description of power loss mechanisms in MMC valves	26
A.1 Introduction to MMC Converter topology	26
A.2 Valve voltage and current stresses	29
A.2.1 Simplified analysis with voltage and current in phase.....	29
A.2.2 Generalised analysis with voltage and current out of phase	30

A.2.3	Effects of third harmonic injection	31
A.3	Conduction losses in MMC building blocks	32
A.3.1	Description of conduction paths	32
A.3.2	Conduction losses in semiconductors	38
A.3.3	MMC building block d.c. capacitor losses	42
A.3.4	Other conduction losses	42
A.4	Switching losses	42
A.4.1	Description of state changes	42
A.4.2	Analysis of state changes during cycle	44
A.4.3	Worked example of switching losses	44
A.5	Other losses	47
A.5.1	Snubber losses	47
A.5.2	DC voltage-dependent losses	47
A.5.3	Valve electronics power consumption	50
A.6	Application to other variants of valve	52
A.6.1	General	52
A.6.2	Two-level full-bridge MMC building block	52
A.6.3	Multi-level MMC building blocks	53
	Bibliography	55
	Figure 1 – Two basic versions of MMC building block designs	15
	Figure 2 – Conduction paths in MMC building blocks	16
	Figure A.1 – Phase unit of the modular multi-level converter (MMC) in basic half- bridge, two-level arrangement, with submodules	27
	Figure A.2 – Phase unit of the cascaded two-level converter (CTL) in half-bridge form	28
	Figure A.3 – Basic operation of the MMC converters	29
	Figure A.4 – MMC converters showing composition of valve current	30
	Figure A.5 – Phasor diagram showing a.c. system voltage, converter a.c. voltage and converter a.c. current	31
	Figure A.6 – Effect of 3 rd harmonic injection on converter voltage and current	32
	Figure A.7 – Two functionally equivalent variants of a “half-bridge”, two-level MMC building block	33
	Figure A.8 – Conducting states in “half-bridge”, two-level MMC building block	34
	Figure A.9 – Typical patterns of conduction for inverter operation (left) and rectifier operation (right)	35
	Figure A.10 – Example of converter with only one MMC building block per valve to illustrate switching behaviour	36
	Figure A.11 – Inverter operation example of switching events	36
	Figure A.12 – Rectifier operation example of switching events	37
	Figure A.13 – Valve current and mean rectified valve current	39
	Figure A.14 – IGBT and diode switching energy as a function of collector current	43
	Figure A.15 – Valve voltage, current and switching behaviour for a hypothetical MMC valve consisting of 5 submodules	45
	Figure A.16 – Power supply from IGBT terminals	50
	Figure A.17 – Power supply from IGBT terminals in cell	51
	Figure A.18 – Power supply from d.c. capacitor in submodule	52
	Figure A.19 – One “full-bridge”, two-level MMC building block	52

Figure A.20 – Four possible variants of three-level MMC building block	54
Table 1 – Contributions to valve losses in different operating modes	25
Table A.1 – Hard switching events	42
Table A.2 – Soft switching events	44
Table A.3 – Summary of switching events from Figure A.15	46

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.

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.

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

CDV	Report on voting
22F/303/CDV	22F/322A/RVC

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

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

A list of all parts in the IEC 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 publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

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 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	59
1 Domaine d'application	61
2 Références normatives	61
3 Termes, définitions, symboles et abréviations	62
3.1 Termes et définitions	62
3.2 Symboles et abréviations	64
3.2.1 Valve et données de simulation	64
3.2.2 Caractéristiques du dispositif à semi-conducteur	64
3.2.3 Autres caractéristiques de composant	64
3.2.4 Paramètres de fonctionnement	65
3.2.5 Paramètres de perte	65
4 Conditions générales	66
4.1 Généralités	66
4.2 Principe de détermination des pertes	66
4.3 Catégories de pertes de la valve	67
4.4 Méthode de calcul des pertes	67
4.5 Paramètres d'entrée	68
4.5.1 Généralités	68
4.5.2 Données d'entrée pour les simulations numériques	68
4.5.3 Données d'entrée provenant des simulations numériques	68
4.5.4 Données du poste de conversion	69
4.5.5 Conditions de fonctionnement	69
5 Pertes de conduction	70
5.1 Généralités	70
5.2 Pertes de conduction de l'IGBT	71
5.3 Pertes de conduction de la diode	72
5.4 Autres pertes de conduction	73
6 Pertes dépendant de la tension c.c.	74
7 Pertes dans les condensateurs c.c. de la valve	74
8 Pertes de commutation	75
8.1 Généralités	75
8.2 Pertes de commutation de l'IGBT	75
8.3 Pertes de commutation de la diode	76
9 Autres pertes	76
9.1 Pertes du circuit d'amortissement	76
9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve	77
9.2.1 Généralités	77
9.2.2 Alimentation électrique à partir de la tension à l'état bloqué de chaque IGBT	78
9.2.3 Alimentation électrique à partir du condensateur c.c.	79
10 Pertes totales de la valve par poste CCHT	80
Annexe A (informative) Description des mécanismes de perte de puissance dans les valves à MMC	81
A.1 Introduction à la topologie du convertisseur MMC	81
A.2 Tension de valve et contraintes de courant	84

A.2.1	Analyse simplifiée avec tension et courant en phase	84
A.2.2	Analyse généralisée avec déphasage de tension et de courant	86
A.2.3	Effets de l'injection du troisième harmonique	88
A.3	Pertes de conduction dans les blocs modules MMC	89
A.3.1	Description des chemins de conduction	89
A.3.2	Pertes de conduction dans les semi-conducteurs.....	95
A.3.3	Pertes du condensateur c.c. du bloc module MMC.....	99
A.3.4	Autres pertes de conduction	99
A.4	Pertes de commutation	99
A.4.1	Description des changements d'état	99
A.4.2	Analyse des changements d'état pendant le cycle	101
A.4.3	Exemple pratique de pertes de commutation	102
A.5	Autres pertes	105
A.5.1	Pertes du circuit d'amortissement	105
A.5.2	Pertes dépendant de la tension c.c.	105
A.5.3	Consommation de puissance de l'électronique de valve.....	108
A.6	Application à d'autres variantes de valve	111
A.6.1	Généralités	111
A.6.2	Bloc module MMC en pont intégral à deux niveaux	111
A.6.3	Blocs modules MMC multiniveaux.....	112
	Bibliographie.....	115
	Figure 1 – Deux versions de base des conceptions de bloc module MMC	70
	Figure 2 – Chemins de conduction dans les blocs module MMC	71
	Figure A.1 – Unité de phase du convertisseur multiniveaux modulaire (MMC) en disposition à deux niveaux en demi-pont, avec sous-modules	82
	Figure A.2 – Unité de phase du convertisseur à deux niveaux monté en cascade (CTL) en demi-pont.....	83
	Figure A.3 – Fonctionnement de base des convertisseurs MMC.....	84
	Figure A.4 – Convertisseurs MMC montrant la composition du courant de valve	86
	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	88
	Figure A.6 – Effet de l'injection du 3 ^{ème} harmonique sur la tension et le courant du convertisseur	89
	Figure A.7 – Deux variantes équivalentes d'un point de vue fonctionnel d'un bloc module MMC à deux niveaux "en demi-pont"	90
	Figure A.8 – États de conduction dans un bloc module MMC à deux niveaux "en demi-pont"	91
	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)	92
	Figure A.10 – Exemple de convertisseur doté d'un seul bloc module MMC par valve afin d'illustrer le comportement de commutation	93
	Figure A.11 – Exemple de fonctionnement en mode onduleur des événements de commutation	94
	Figure A.12 – Exemple de fonctionnement en mode redresseur des événements de commutation	94
	Figure A.13 – Courant de valve et courant de valve redressé moyen	96
	Figure A.14 – Énergie de commutation de l'IGBT et de la diode en fonction du courant du collecteur	100

Figure A.15 – Tension, courant et comportement de commutation d'une valve MMC hypothétique composée de 5 sous-modules	103
Figure A.16 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT	109
Figure A.17 – Alimentation à partir des bornes de l'IGBT de la cellule	110
Figure A.18 – Alimentation à partir du condensateur c.c. du sous-module	111
Figure A.19 – Bloc module MMC à deux niveaux «en pont intégral»	112
Figure A.20 – Quatre variantes possibles de bloc module MMC à trois niveaux	113
Tableau 1 – Contributions aux pertes de valve dans les différents modes de fonctionnement	80
Tableau A.1 – Événements de commutation durs	100
Tableau A.2 – Événements de commutation doux	101
Tableau A.3 – Récapitulatif des événements de commutation issus de la Figure A.15	104

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.

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.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
22F/303/CDV	22F/322A/RVC

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

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

Une liste de toutes les parties de 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 cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "http://webstore.iec.ch" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

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 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)*