

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE



**Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters –
Part 2: Faults and switching**

**Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) munis
de convertisseurs commutés par le réseau –
Partie 2: Défauts et manoeuvres**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.200; 29.240.99

ISBN 978-2-8322-2762-6

**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



**Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters –
Part 2: Faults and switching**

**Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) munis
de convertisseurs commutés par le réseau –
Partie 2: Défautes et manoeuvres**

CONTENTS

FOREWORD.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	9
3 Outline of HVDC transient performance specifications	9
3.1 Transient performance specifications	9
3.2 General comment.....	10
4 Switching transients without faults	10
4.1 General.....	10
4.2 Energization and de-energization of a.c. side equipment	10
4.3 Load rejection	12
4.4 Start-up and shut-down of converter units	13
4.5 Operation of d.c. breakers and d.c. switches	13
5 AC system faults	15
5.1 General.....	15
5.2 Fault categories	16
5.3 Specification matters affecting transient performance.....	16
5.3.1 Effective a.c. system impedance.....	16
5.3.2 Power transfer during faults.....	16
5.3.3 Recovery following fault clearing	17
5.3.4 Reactive power consumption during fault and post-fault recovery periods	18
5.3.5 Load rejection due to a.c. faults.....	18
5.3.6 Switching of reactive power equipment.....	19
5.3.7 Effects of harmonic voltages and current during faults.....	19
5.3.8 Shift in control modes of operation	19
5.3.9 Power modulation on the HVDC system.....	20
5.3.10 Emergency power reductions.....	20
5.4 Specification impact on control strategy	20
6 AC filters, reactive power equipment and a.c. bus faults	22
6.1 General.....	22
6.2 Transient overvoltages in filter banks	22
6.3 Transient overcurrents in filter and capacitor banks.....	23
6.4 Capacitor unbalance protection	23
6.5 Examples of protection of filters and capacitor banks	24
6.6 Shunt reactor protection	25
6.7 AC bus protection.....	25
7 Converter unit faults	27
7.1 General.....	27
7.2 Short circuits	27
7.3 Failure of converter unit to perform its intended function	29
7.3.1 General	29
7.3.2 Rectifier operation	29
7.3.3 Inverter operation	29
7.4 Converter unit protection	30
7.4.1 Converter differential protection.....	30
7.4.2 Overcurrent protection.....	30

7.4.3	AC overvoltage protection	30
7.4.4	Protection against large delay angle operation	30
7.4.5	Commutation failure protection	30
7.4.6	Thyristor valve protections.....	30
7.4.7	Transformer protection	30
7.4.8	Transformer tap-changer unbalance protection.....	31
7.4.9	AC connection earth fault protection	31
7.5	Additional protection aspects of series connected converter units	31
7.6	Additional protection aspects of parallel connected converter units	31
8	DC reactor, d.c. filter and other d.c. equipment faults	34
8.1	General	34
8.2	Fault types	34
8.3	Protection zones	34
8.4	Neutral protection.....	35
8.4.1	General	35
8.4.2	Neutral fault detection	35
8.4.3	Neutral bus fault isolation	35
8.4.4	Bipolar neutral bus faults	35
8.5	DC reactor protection	35
8.6	DC harmonic filter protection	36
8.6.1	General	36
8.6.2	Filter bank fault protection	36
8.6.3	DC filter capacitor unit protection.....	37
8.7	DC harmonic protection	37
8.8	DC overvoltage protection	37
8.9	DC side switching protection	37
9	DC line faults.....	39
9.1	Overhead line faults	39
9.2	Cable faults	40
9.3	DC fault characteristics	40
9.4	Functional d.c. fault detection requirements	41
9.5	Protective sequence	41
9.5.1	Overhead line faults	41
9.5.2	Faults in cable systems	41
9.5.3	Faults in an overhead line/cable system	41
9.5.4	Faults in one of a system of parallel-connected cables	41
9.5.5	Fault in a system of parallel overhead lines	42
9.6	Fault protection schemes	42
9.7	Open circuit on the d.c. side	43
9.8	Power line cross protection	43
10	Earth electrode line faults.....	43
10.1	General	43
10.2	Specific requirements – Earth electrode line.....	43
10.3	Electrode line supervision	44
11	Metallic return conductor faults.....	44
11.1	Conductor for the return circuit.....	44
11.2	Metallic return faults.....	44
11.3	Fault detection – Metallic return	45

11.4	Metallic return fault protection systems.....	45
12	Insulation co-ordination – HVDC systems	48
12.1	General	48
12.2	Protection schemes using surge arresters	48
12.3	Switching overvoltages and temporary overvoltages on the a.c. side	49
12.4	Switching overvoltages and temporary overvoltages on the d.c. side	49
12.5	Lightning and steep fronted surges.....	49
12.6	Protective margins	50
12.7	Arrester duties.....	51
12.7.1	AC bus arresters (A_1 , A_2 and A_3).....	51
12.7.2	Arrester across filter reactors (FA).....	51
12.7.3	Valve arresters (V)	52
12.7.4	Mid-point d.c. bus arrester (M).....	52
12.7.5	Converter unit d.c. bus arresters (CB) and converter unit arresters.....	52
12.7.6	DC bus and d.c. line arresters (DB and DL)	52
12.7.7	Neutral bus arresters (E_1 and E_2)	53
12.7.8	DC reactor arrester (R).....	53
12.7.9	DC filter arresters (FD).....	53
12.8	Prevention of protective relay action due to arrester currents	53
12.9	Insulation clearances.....	53
12.10	Creepage distances for the insulation.....	53
12.10.1	Outdoor insulation	53
12.10.2	Indoor insulation	54
13	Telecommunication requirements	57
13.1	General	57
13.2	Specific requirements - Telecommunication systems	57
13.3	Consequence of telecommunication system outages	58
13.4	Special considerations for power line carrier (PLC) systems.....	58
14	Auxiliary systems.....	59
14.1	General	59
14.2	Electrical auxiliary systems	59
14.2.1	General requirements	59
14.2.2	Specific requirements	60
14.3	Mechanical auxiliary systems	60
	Bibliography.....	62

Figure 1 – DC-side switches for an HVDC substation with series-connected converter unit 15

Figure 2 – Example of voltage dependent control characteristics 21

Figure 3 – Example of arrangement of a.c. filters and capacitor and reactor banks for large bipolar HVDC 25

Figure 4 – Example of current transformer arrangements for a.c. filters and a.c. bus differential protections 26

Figure 5 – Example of restricted ground fault protection of filter..... 26

Figure 6 – Example of current transformers arrangement for capacitor bank unbalance protection and overload protection of double tuned filter arm 27

Figure 7 – Examples of a.c. phase short circuits, pole short circuits and faults in a twelve-pulse converter unit 33

Figure 8 – Protection zones in series-connected converter units	33
Figure 9 – Protection zones in parallel-connected converter units	34
Figure 10 – Example of d.c. protection zones for series-connected converter units	38
Figure 11 – Example of d.c. protection zones for parallel-connected converter pole	39
Figure 12 – Monopolar metallic return system showing metallic return transfer breaker (MRTB)	46
Figure 13 – Monopolar operation of a bipolar system during converter pole outages	46
Figure 14 – DC current flowing into an a.c. system during a fault on a metallic return conductor when the HVDC substation mat is used for grounding of the d.c. circuit	46
Figure 15 – Earth current flowing during line faults	47
Figure 16 – Example of metallic return fault detection system by means of auxiliary a.c. signal	47
Figure 17 – Example of use of MRTB to quench fault to earth on metallic return conductor	48
Figure 20 – Example of an arrester protection arrangement for a capacitor commutated converter HVDC substation	55
Figure 21 – Example of an a.c. arrester protection arrangement for an HVDC substation	56
Figure 22 – Example of an arrester protection scheme in a HVDC substation with series-connected converters	56

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**PERFORMANCE OF HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT
(HVDC) SYSTEMS WITH LINE-COMMUTATED CONVERTERS –**

Part 2: Faults and switching

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 TR 60919-2 edition 2.1 contains the second edition (2008-11) [documents 22F/160/DTR and 22F/165/RVC] and its amendment 1 (2015-06) [documents 22F/344/DTR and 22F/345A/RVC].

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

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 60919-2, which is a technical report, 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 edition includes the following main changes with respect to the previous edition:

- a) this report concerns only line-commutated converters;
- b) significant changes have been made to the control system technology;
- c) some environmental constraints, for example audible noise limits, have been added;
- d) the capacitor coupled converters (CCC) and controlled series capacitor converters (CSCC) have been included.

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

A list of all parts of the IEC 60919 series, under the general title: *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters*, 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.

PERFORMANCE OF HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS WITH LINE-COMMUTATED CONVERTERS –

Part 2: Faults and switching

1 Scope

This part of IEC 60919 which is a technical report provides guidance on the transient performance and fault protection requirements of high voltage direct current (HVDC) systems. It concerns the transient performance related to faults and switching for two-terminal HVDC systems utilizing 12-pulse converter units comprised of three-phase bridge (double way) connections but it does not cover multi-terminal HVDC transmission systems. However, certain aspects of parallel converters and parallel lines, if part of a two-terminal system, are discussed. The converters are assumed to use thyristor valves as the bridge arms, with gapless metal oxide arresters for insulation co-ordination and to have power flow capability in both directions. Diode valves are not considered in this report.

Only line-commutated converters are covered in this report, which includes capacitor commutated converter circuit configurations. General requirements for semiconductor line-commutated converters are given in IEC 60146-1-1, IEC 60146-1-2 and IEC 60146-1-3. Voltage-sourced converters are not considered.

The report is comprised of three parts. IEC 60919-2, which covers transient performance, will be accompanied by companion documents, IEC 60919-1 for steady-state performance and IEC 60919-3 for dynamic performance. An effort has been made to avoid duplication in the three parts. Consequently users of this report are urged to consider all three parts when preparing a specification for purchase of a two-terminal HVDC system.

Readers are cautioned to be aware of the difference between system performance specifications and equipment design specifications for individual components of a system. While equipment specifications and testing requirements are not defined herein, attention is drawn to those which could affect performance specifications for a system. Note that detailed seismic performance requirements are excluded from this technical report. In addition, because of the many possible variations between different HVDC systems, these are not considered in detail. Consequently this report should not be used directly as a specification for a specific project, but rather to provide the basis for an appropriate specification tailored to fit actual system requirements for a particular electric power transmission scheme. This report does not intend to discriminate the responsibility of users and manufacturers for the work specified.

Terms and definitions for high-voltage direct current (HVDC) transmission used in this report are given in IEC 60633.

Since the equipment items are usually separately specified and purchased, the HVDC transmission line, earth electrode line and earth electrode are included only because of their influence on the HVDC system performance.

For the purpose of this report, an HVDC substation is assumed to consist of one or more converter units installed in a single location together with buildings, reactors, filters, reactive power supply, control, monitoring, protective, measuring and auxiliary equipment. While there is no discussion of a.c. switching substations in this report, a.c. filters and reactive power sources are included, although they may be connected to an a.c. bus separate from the HVDC substation.

2 Normative references

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

IEC 60146-1-1, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specifications of basic requirements*
Amendment 1 (1996)

IEC 60146-1-2, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-2: Application guide*

IEC 60146-1-3, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-3: Transformers and reactors*

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

IEC 60071-1, *Insulation co-ordination – Part 1: Terms, definitions, principles and rules*

IEC 60700-1, *Thyristor valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission – Part 1: Electrical testing*

IEC TR 60919-1:~~2005~~ 2010, *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 1: Steady-state conditions*
Amendment 1:2013

IEC TR 60919-3:2009, *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 3: Dynamic conditions*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	68
1 Domaine d'application	70
2 Références normatives	71
3 Généralités sur les spécifications du fonctionnement transitoire des systèmes CCHT	71
3.1 Spécifications du fonctionnement transitoire	71
3.2 Commentaire général	72
4 Transitoires de manœuvres sans défaut	72
4.1 Généralités	72
4.2 Mise sous tension et hors tension des équipements côté c.a.	72
4.3 Réjection de charge	75
4.4 Démarrage et arrêt des unités de conversion	76
4.5 Fonctionnement des disjoncteurs et des interrupteurs c.c.	76
5 Défauts du réseau alternatif	78
5.1 Généralités	78
5.2 Catégories de défauts	79
5.3 Objet des spécifications affectant le fonctionnement transitoire	79
5.3.1 Impédance effective du réseau c.a.	79
5.3.2 Transfert de puissance pendant les défauts	80
5.3.3 Recouvrement après élimination du défaut	81
5.3.4 Consommation de puissance réactive pendant les défauts et la période de recouvrement	81
5.3.5 Réjection de charge à la suite de défauts côté alternatif	82
5.3.6 Manœuvre des équipements de puissance réactive	82
5.3.7 Effets des courants et tensions harmoniques pendant les défauts	83
5.3.8 Changement de modes de régulation en fonctionnement sur défauts	83
5.3.9 Modulation de puissance CCHT	83
5.3.10 Réduction d'urgence de la puissance	84
5.4 Impact de la spécification sur la stratégie de contrôle	84
6 Défauts des filtres à c.a., des équipements de compensation de puissance réactive et du jeu de barres du poste c.a.	86
6.1 Généralités	86
6.2 Surtensions transitoires dans les bancs de filtres	86
6.3 Surintensités transitoires dans le filtre et les bancs de condensateurs	87
6.4 Protection contre le déséquilibre dans le banc de condensateurs	87
6.5 Exemples de protection des filtres et bancs de condensateurs	88
6.6 Protection de l'inductance shunt	89
6.7 Protection de la barre omnibus alternative	89
7 Défauts de l'unité de conversion	92
7.1 Généralités	92
7.2 Courts-circuits	92
7.3 Défaillance d'une unité de conversion dans l'exécution des fonctions assignées	93
7.3.1 Généralités	93
7.3.2 Fonctionnement en redresseur	94
7.3.3 Fonctionnement en onduleur	94

7.4	Protection de l'unité de conversion	94
7.4.1	Protection différentielle du convertisseur	94
7.4.2	Protection contre les surintensités	95
7.4.3	Protection contre les surtensions alternatives	95
7.4.4	Protection contre le fonctionnement à angle d'amorçage élevé	95
7.4.5	Protection contre les ratés de commutation	95
7.4.6	Protection des valves à thyristors	95
7.4.7	Protection du transformateur	95
7.4.8	Protection contre les discordances du changeur de prises du transformateur	96
7.4.9	Protection contre les défauts à la terre sur la connexion c.a.	96
7.5	Aspects de protection supplémentaires pour les unités de conversion connectées en série	96
7.6	Aspects de protection supplémentaires pour les unités de conversion connectées en parallèle.....	97
8	Défauts d'inductances, filtre et autres équipements à courant continu	99
8.1	Généralités.....	99
8.2	Types de défauts.....	100
8.3	Zones de protection.....	100
8.4	Protection de neutre	100
8.4.1	Généralités.....	100
8.4.2	Détection de défaut de neutre.....	100
8.4.3	Isolement des défauts de barre de neutre	101
8.4.4	Défauts de barre de neutre bipolaire.....	101
8.5	Protection de l'inductance de lissage.....	101
8.6	Protection des filtres d'harmoniques à courant continu	102
8.6.1	Généralités.....	102
8.6.2	Protection contre les défauts des bancs de filtre.....	102
8.6.3	Protection des condensateurs de filtres c.c.....	102
8.7	Protection contre les harmoniques c.c.	103
8.8	Protection contre les surtensions sur la ligne CCHT	103
8.9	Protection de l'appareillage côté continu	103
9	Défauts de la ligne à courant continu.....	106
9.1	Défauts de ligne aérienne.....	106
9.2	Défauts de câble	106
9.3	Caractéristiques des défauts du réseau continu	107
9.4	Spécifications fonctionnelles de détection des défauts c.c.....	107
9.5	Séquences de protection	107
9.5.1	Défauts de ligne aérienne.....	107
9.5.2	Défauts dans les réseaux à câbles	108
9.5.3	Défauts sur réseaux mixtes: ligne aérienne/câble	108
9.5.4	Défauts de l'un des câbles d'une liaison par câbles connectés en parallèle	108
9.5.5	Défauts dans un réseau à lignes aériennes parallèles	108
9.6	Schémas de protection contre les défauts	108
9.7	Circuit ouvert sur le côté c.c.	109
9.8	Protection de croisement de lignes de puissance	109
10	Défauts de la ligne d'électrode de terre	110
10.1	Généralités.....	110

10.2	Besoins particuliers – Ligne de terre	110
10.3	Contrôle de la ligne d'électrode	110
11	Défauts du conducteur de retour métallique.....	111
11.1	Conducteur pour le circuit de retour	111
11.2	Défauts du circuit de retour métallique	111
11.3	Détection des défauts – Retour métallique	112
11.4	Système de protection contre les défauts de retour métallique	112
12	Coordination de l'isolement – Systèmes CCHT	115
12.1	Généralités.....	115
12.2	Schéma de protection utilisant des parafoudres	116
12.3	Surtensions de manoeuvre et surtensions temporaires sur la partie alternative	116
12.4	Surtensions de manoeuvre et surtensions temporaires sur la partie continue	116
12.5	Surtensions de foudre à front raide	117
12.6	Marges de protection.....	117
12.7	Fonctions des parafoudres	119
12.7.1	Parafoudres de barres alternatifs (A_1 , A_2 et A_3).....	119
12.7.2	Parafoudres aux bornes des inductances de filtres (FA)	119
12.7.3	Parafoudres de valve (V)	119
12.7.4	Parafoudres de point milieu (M).....	120
12.7.5	Parafoudres de barre à courant continu de la conversion (CB) et parafoudres d'unité de conversion	120
12.7.6	Parafoudres de barre à courant continu et parafoudres de la ligne à courant continu (DB et DL)	120
12.7.7	Parafoudres de neutre à courant continu (E1 et E2)	120
12.7.8	Parafoudres d'inductance à courant continu (R).....	121
12.7.9	Parafoudres de filtre à courant continu (FD)	121
12.8	Prévention contre l'action des relais de protection provoquée par les courants de parafoudres.....	121
12.9	Distances d'isolement	121
12.10	Lignes de fuite pour l'isolation	121
12.10.1	Isolation extérieure	121
12.10.2	Isolation intérieure.....	122
13	Besoins en télécommunications.....	126
13.1	Généralités.....	126
13.2	Besoins particuliers – Réseaux de télécommunication.....	126
13.3	Conséquences de l'indisponibilité du réseau de télécommunication.....	127
13.4	Considérations particulières relatives aux systèmes à courant porteur de ligne (CPL).....	127
14	Systèmes d'alimentation auxiliaire de puissance	128
14.1	Généralités.....	128
14.2	Systèmes auxiliaires électriques.....	128
14.2.1	Généralités.....	128
14.2.2	Exigences particulières.....	129
14.3	Systèmes auxiliaires mécaniques	130
	Bibliographie.....	132

Figure 1 – Interrupteurs côtés c.c. pour sous-station CCHT avec unités de conversion connectées en série.....	78
Figure 2 – Exemple de caractéristiques de commande dépendant de la tension.....	85
Figure 3 – Exemple de disposition de bancs de filtres et de condensateurs et d'inductances c.a. pour un grand système CCHT bipolaire.....	90
Figure 4 – Exemple de disposition des transformateurs de courant pour protection différentielle des barres et filtres alternatifs	90
Figure 5 – Exemple de protection du filtre contre les défauts à la terre restreints.....	91
Figure 6 – Exemple d'emplacement des transformateurs de courant pour la protection contre le déséquilibre des bancs de condensateur et la protection d'un bras de filtre double réglé contre la surcharge.....	91
Figure 7 – Exemples de court-circuits de phase alternative, court-circuits côté pôle et défauts d'une unité de conversion à 12 impulsions	98
Figure 8 – Zones de protection pour unités de conversion connectées en série	99
Figure 9 – Zones de protection pour unités de conversion connectées en parallèle.....	99
Figure 10 – Exemple de zones de protection c.c. pour des unités de conversion connectées en série.....	104
Figure 11 – Exemple de zones de protection c.c. pour des pôles de conversion connectés en parallèle	105
Figure 12 – Système monopolaire avec retour métallique montrant un disjoncteur de transfert de retour métallique (TCRM).....	113
Figure 13 – Fonctionnement monopolaire d'un système bipolaire pendant une défaillance du pôle de conversion	113
Figure 14 – Circulation du courant continu dans le réseau alternatif pendant un défaut du conducteur de retour métallique alors que la terre de la sous-station CCHT est utilisée pour la mise à la terre du circuit continu	114
Figure 15 – Flux du courant à la terre pendant des défauts sur la ligne.....	114
Figure 16 – Exemple de détection des défauts du retour métallique au moyen d'un signal alternatif auxiliaire	115
Figure 17 – Exemple d'utilisation du TCRM pour éteindre les défauts à la terre du conducteur de retour métallique.....	115
Figure 18 – Exemple d'un schéma de protection par parafoudre pour une sous-station CCHT	123
Figure 19 – Exemple de schéma de protection c.c. par parafoudres pour une sous-station CCHT connectée en dos à dos	124
Figure 20 – Exemple de disposition de protection par parafoudre pour une sous-station CCHT de convertisseurs commutés par condensateurs	124
Figure 21 – Exemple de disposition de protection par parafoudre côté c.a. pour une sous-station CCHT.....	125
Figure 22 – Exemple d'un schéma de protection par parafoudre dans une sous-station CCHT avec des convertisseurs connectés en série.....	125

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES À COURANT CONTINU
HAUTE TENSION (CCHT) MUNIS DE CONVERTISSEURS
COMMUTÉS PAR LE RÉSEAU –**

Partie 2: Défauts et manœuvres

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 TR 60919-2 édition 2.1 contient la deuxième édition (2008-11) [documents 22F/160/DTR et 22F/165/RVC] et son amendement 1 (2015-06) [documents 22F/344/DTR et 22F/345A/RVC].

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

La tâche principale des comités d'études de l'IEC est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

L'IEC 60919-2, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 22F: Electronique 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.

La présente édition contient les changements fondamentaux suivants par rapport à l'édition précédente:

- a) ce rapport ne concerne que les convertisseurs commutés par le réseau;
- b) des changements significatifs ont été effectués pour la technologie du système de contrôle;
- c) certaines limites environnementales ont été introduites, par exemple les niveaux de bruit audible maximaux;
- d) les convertisseurs connectés au travers de condensateurs (CCC) et les convertisseurs à condensateurs en série contrôlés (CCSC) ont été ajoutés.

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

Une liste de toutes les parties de l'IEC 60919, sous le titre général: *Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) munis de convertisseurs commutés par le réseau*, est disponible 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.

FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES À COURANT CONTINU HAUTE TENSION (CCHT) MUNIS DE CONVERTISSEURS COMMUTÉS PAR LE RÉSEAU –

Partie 2: Défauts et manœuvres

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60919, qui est un rapport technique, fournit des indications générales sur les performances de fonctionnement transitoire et sur les exigences de protection contre les défauts pour les systèmes à courant continu haute tension (CCHT). Il se rapporte au fonctionnement transitoire lié aux défauts et manoeuvres dans le cas des systèmes CCHT à deux extrémités, utilisant des convertisseurs à 12 impulsions comprenant des ponts de Graetz hexaphasés mais ne couvre pas les systèmes de transmission CCHT multiterminaux. Cependant, certains aspects liés à la mise en parallèle de convertisseurs et de lignes, s'ils relèvent d'un système à deux extrémités, seront également abordés. Les convertisseurs sont supposés utiliser des valves à thyristors dans les bras de pont, avec des parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour la coordination de l'isolement, et permettre le transport d'énergie dans les deux sens. Les valves à diode ne sont pas prises en considération dans le présent rapport.

Seuls les convertisseurs commutés par le réseau sont traités dans le présent rapport, qui comprend les configurations du circuit du convertisseur commuté par condensateur. Les spécifications générales pour les convertisseurs commutés par le réseau à semiconducteur sont données dans l'IEC 60146-1-1, l'IEC 60146-1-2 et l'IEC 60146-1-3. Les convertisseurs alimentés en tension ne sont pas pris en compte.

Le rapport entier se compose de trois parties dont la présente norme constitue la deuxième, l'IEC 60919-1 traitant du régime établi, l'IEC 60919-3 concernant le fonctionnement dynamique. Un effort a été fait pour éviter les répétitions entre les trois parties. En conséquence, les utilisateurs sont invités à considérer les trois parties du rapport avant de préparer une spécification pour l'achat d'un système CCHT à deux extrémités.

Les lecteurs sont avertis de bien faire la différence entre les spécifications de fonctionnement du système et les spécifications de réalisation des équipements pour les composants individuels de ce système. Alors que les spécifications des équipements et des essais ne sont pas définies dans ce rapport, l'accent est mis sur celles qui pourraient avoir une influence directe sur le fonctionnement du système. Les performances détaillées de fonctionnement en régime sismique sont exclues de ce rapport. Par ailleurs, en raison des multiples variantes qui peuvent exister entre les différents systèmes CCHT, celles-ci ne seront pas étudiées en détail. Par conséquent, il convient de ne pas utiliser ce rapport en tant que spécification pour un projet particulier, mais plutôt en tant que base d'une spécification appropriée, étudiée pour répondre aux besoins réels d'un système pour un schéma particulier de transmission d'énergie électrique. Ce rapport n'a pas pour objet de distinguer la responsabilité de l'utilisateur de celle du constructeur en ce qui concerne le projet spécifié.

Les termes et définitions pour le transport du courant continu haute tension (CCHT) utilisés dans le présent rapport sont donnés dans l'IEC 60633.

Puisque les matériels sont habituellement spécifiés et achetés séparément, la ligne de transport CCHT, la ligne de terre et l'électrode de terre sont uniquement incluses à cause de leur influence sur la performance du système CCHT.

Pour les besoins du présent rapport, un poste CCHT est considéré pour représenter une ou plusieurs unités de conversions installées dans un emplacement unique avec des bâtiments, des inductances, des filtres, une alimentation réactive et un équipement de commande, de surveillance, de protection, de mesure et auxiliaire. Bien qu'il n'y ait aucun propos sur les postes de sectionnement courant alternatif dans le présent rapport, les filtres à courant alternatif et les sources de puissance réactive sont traités, bien qu'ils puissent être connectés à un bus à courant alternatif séparé du poste CCHT.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. 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 60146-1-1, *Convertisseurs à semiconducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-1: Spécifications des clauses techniques de base*
Amendement 1 (1996)

IEC 60146-1-2, *Convertisseurs à semiconducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-2: Guide d'application*

IEC 60146-1-3, *Convertisseurs à semi-conducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-3: Transformateurs et bobines d'inductance*

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

IEC 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

IEC 60700-1, *Essais des Valves à thyristors pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT)*

~~IEC TR 60919-1:2005 2010, *Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) à convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1: Spécification des conditions de fonctionnement en régime établi*~~ *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 1: Steady-state conditions*
Amendement 1:2013 (disponible en anglais seulement)

IEC TR 60919-3:2009, *Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) avec des convertisseurs commutés par le réseau – Partie 3: Conditions dynamiques*

FINAL VERSION

VERSION FINALE

**Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters –
Part 2: Faults and switching**

**Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) munis
de convertisseurs commutés par le réseau –
Partie 2: Défaits et manoeuvres**

CONTENTS

FOREWORD.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	9
3 Outline of HVDC transient performance specifications	9
3.1 Transient performance specifications	9
3.2 General comment.....	10
4 Switching transients without faults	10
4.1 General.....	10
4.2 Energization and de-energization of a.c. side equipment	10
4.3 Load rejection	12
4.4 Start-up and shut-down of converter units	13
4.5 Operation of d.c. breakers and d.c. switches	13
5 AC system faults	15
5.1 General.....	15
5.2 Fault categories	16
5.3 Specification matters affecting transient performance.....	16
5.3.1 Effective a.c. system impedance.....	16
5.3.2 Power transfer during faults.....	16
5.3.3 Recovery following fault clearing	17
5.3.4 Reactive power consumption during fault and post-fault recovery periods	18
5.3.5 Load rejection due to a.c. faults.....	18
5.3.6 Switching of reactive power equipment.....	19
5.3.7 Effects of harmonic voltages and current during faults.....	19
5.3.8 Shift in control modes of operation	19
5.3.9 Power modulation on the HVDC system.....	20
5.3.10 Emergency power reductions.....	20
5.4 Specification impact on control strategy	20
6 AC filters, reactive power equipment and a.c. bus faults	21
6.1 General.....	21
6.2 Transient overvoltages in filter banks	21
6.3 Transient overcurrents in filter and capacitor banks.....	22
6.4 Capacitor unbalance protection	22
6.5 Examples of protection of filters and capacitor banks	23
6.6 Shunt reactor protection	24
6.7 AC bus protection.....	24
7 Converter unit faults	26
7.1 General.....	26
7.2 Short circuits	27
7.3 Failure of converter unit to perform its intended function	28
7.3.1 General	28
7.3.2 Rectifier operation	28
7.3.3 Inverter operation	29
7.4 Converter unit protection	29
7.4.1 Converter differential protection.....	29
7.4.2 Overcurrent protection.....	29

7.4.3	AC overvoltage protection	29
7.4.4	Protection against large delay angle operation	29
7.4.5	Commutation failure protection	29
7.4.6	Thyristor valve protections.....	30
7.4.7	Transformer protection	30
7.4.8	Transformer tap-changer unbalance protection.....	30
7.4.9	AC connection earth fault protection	30
7.5	Additional protection aspects of series connected converter units	30
7.6	Additional protection aspects of parallel connected converter units	31
8	DC reactor, d.c. filter and other d.c. equipment faults	33
8.1	General	33
8.2	Fault types	34
8.3	Protection zones	34
8.4	Neutral protection.....	34
8.4.1	General	34
8.4.2	Neutral fault detection	34
8.4.3	Neutral bus fault isolation	35
8.4.4	Bipolar neutral bus faults	35
8.5	DC reactor protection	35
8.6	DC harmonic filter protection	35
8.6.1	General	35
8.6.2	Filter bank fault protection	36
8.6.3	DC filter capacitor unit protection.....	36
8.7	DC harmonic protection	36
8.8	DC overvoltage protection	36
8.9	DC side switching protection	37
9	DC line faults.....	38
9.1	Overhead line faults	38
9.2	Cable faults	39
9.3	DC fault characteristics	39
9.4	Functional d.c. fault detection requirements	40
9.5	Protective sequence	40
9.5.1	Overhead line faults	40
9.5.2	Faults in cable systems	40
9.5.3	Faults in an overhead line/cable system	40
9.5.4	Faults in one of a system of parallel-connected cables	40
9.5.5	Fault in a system of parallel overhead lines	41
9.6	Fault protection schemes	41
9.7	Open circuit on the d.c. side	42
9.8	Power line cross protection	42
10	Earth electrode line faults.....	42
10.1	General	42
10.2	Specific requirements – Earth electrode line.....	42
10.3	Electrode line supervision	43
11	Metallic return conductor faults.....	43
11.1	Conductor for the return circuit.....	43
11.2	Metallic return faults.....	43
11.3	Fault detection – Metallic return	44

11.4	Metallic return fault protection systems.....	44
12	Insulation co-ordination – HVDC systems	47
12.1	General	47
12.2	Protection schemes using surge arresters	47
12.3	Switching overvoltages and temporary overvoltages on the a.c. side	48
12.4	Switching overvoltages and temporary overvoltages on the d.c. side	48
12.5	Lightning and steep fronted surges.....	48
12.6	Protective margins	49
12.7	Arrester duties.....	50
12.7.1	AC bus arresters (A_1 , A_2 and A_3).....	50
12.7.2	Arrester across filter reactors (FA).....	50
12.7.3	Valve arresters (V)	51
12.7.4	Mid-point d.c. bus arrester (M).....	51
12.7.5	Converter unit d.c. bus arresters (CB) and converter unit arresters.....	51
12.7.6	DC bus and d.c. line arresters (DB and DL)	51
12.7.7	Neutral bus arresters (E_1 and E_2)	52
12.7.8	DC reactor arrester (R).....	52
12.7.9	DC filter arresters (FD).....	52
12.8	Prevention of protective relay action due to arrester currents	52
12.9	Insulation clearances.....	52
12.10	Creepage distances for the insulation.....	52
12.10.1	Outdoor insulation	52
12.10.2	Indoor insulation	53
13	Telecommunication requirements	56
13.1	General	56
13.2	Specific requirements - Telecommunication systems	56
13.3	Consequence of telecommunication system outages	57
13.4	Special considerations for power line carrier (PLC) systems.....	57
14	Auxiliary systems.....	58
14.1	General	58
14.2	Electrical auxiliary systems	58
14.2.1	General requirements	58
14.2.2	Specific requirements	59
14.3	Mechanical auxiliary systems	59
	Bibliography.....	61

Figure 1 – DC-side switches for an HVDC substation with series-connected converter unit 15

Figure 2 – Example of voltage dependent control characteristics 21

Figure 3 – Example of arrangement of a.c. filters and capacitor and reactor banks for large bipolar HVDC 25

Figure 4 – Example of current transformer arrangements for a.c. filters and a.c. bus differential protections 25

Figure 5 – Example of restricted ground fault protection of filter..... 26

Figure 6 – Example of current transformers arrangement for capacitor bank unbalance protection and overload protection of double tuned filter arm 26

Figure 7 – Examples of a.c. phase short circuits, pole short circuits and faults in a twelve-pulse converter unit 32

Figure 8 – Protection zones in series-connected converter units	33
Figure 9 – Protection zones in parallel-connected converter units	33
Figure 10 – Example of d.c. protection zones for series-connected converter units	37
Figure 11 – Example of d.c. protection zones for parallel-connected converter pole	38
Figure 12 – Monopolar metallic return system showing metallic return transfer breaker (MRTB)	45
Figure 13 – Monopolar operation of a bipolar system during converter pole outages	45
Figure 14 – DC current flowing into an a.c. system during a fault on a metallic return conductor when the HVDC substation mat is used for grounding of the d.c. circuit	45
Figure 15 – Earth current flowing during line faults	46
Figure 16 – Example of metallic return fault detection system by means of auxiliary a.c. signal	46
Figure 17 – Example of use of MRTB to quench fault to earth on metallic return conductor	47
Figure 20 – Example of an arrester protection arrangement for a capacitor commutated converter HVDC substation	54
Figure 21 – Example of an a.c. arrester protection arrangement for an HVDC substation	55
Figure 22 – Example of an arrester protection scheme in a HVDC substation with series-connected converters	55

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**PERFORMANCE OF HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT
(HVDC) SYSTEMS WITH LINE-COMMUTATED CONVERTERS –**

Part 2: Faults and switching

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 TR 60919-2 edition 2.1 contains the second edition (2008-11) [documents 22F/160/DTR and 22F/165/RVC] and its amendment 1 (2015-06) [documents 22F/344/DTR and 22F/345A/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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 60919-2, which is a technical report, 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 edition includes the following main changes with respect to the previous edition:

- a) this report concerns only line-commutated converters;
- b) significant changes have been made to the control system technology;
- c) some environmental constraints, for example audible noise limits, have been added;
- d) the capacitor coupled converters (CCC) and controlled series capacitor converters (CSCC) have been included.

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

A list of all parts of the IEC 60919 series, under the general title: *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters*, 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.

PERFORMANCE OF HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS WITH LINE-COMMUTATED CONVERTERS –

Part 2: Faults and switching

1 Scope

This part of IEC 60919 which is a technical report provides guidance on the transient performance and fault protection requirements of high voltage direct current (HVDC) systems. It concerns the transient performance related to faults and switching for two-terminal HVDC systems utilizing 12-pulse converter units comprised of three-phase bridge (double way) connections but it does not cover multi-terminal HVDC transmission systems. However, certain aspects of parallel converters and parallel lines, if part of a two-terminal system, are discussed. The converters are assumed to use thyristor valves as the bridge arms, with gapless metal oxide arresters for insulation co-ordination and to have power flow capability in both directions. Diode valves are not considered in this report.

Only line-commutated converters are covered in this report, which includes capacitor commutated converter circuit configurations. General requirements for semiconductor line-commutated converters are given in IEC 60146-1-1, IEC 60146-1-2 and IEC 60146-1-3. Voltage-sourced converters are not considered.

The report is comprised of three parts. IEC 60919-2, which covers transient performance, will be accompanied by companion documents, IEC 60919-1 for steady-state performance and IEC 60919-3 for dynamic performance. An effort has been made to avoid duplication in the three parts. Consequently users of this report are urged to consider all three parts when preparing a specification for purchase of a two-terminal HVDC system.

Readers are cautioned to be aware of the difference between system performance specifications and equipment design specifications for individual components of a system. While equipment specifications and testing requirements are not defined herein, attention is drawn to those which could affect performance specifications for a system. Note that detailed seismic performance requirements are excluded from this technical report. In addition, because of the many possible variations between different HVDC systems, these are not considered in detail. Consequently this report should not be used directly as a specification for a specific project, but rather to provide the basis for an appropriate specification tailored to fit actual system requirements for a particular electric power transmission scheme. This report does not intend to discriminate the responsibility of users and manufacturers for the work specified.

Terms and definitions for high-voltage direct current (HVDC) transmission used in this report are given in IEC 60633.

Since the equipment items are usually separately specified and purchased, the HVDC transmission line, earth electrode line and earth electrode are included only because of their influence on the HVDC system performance.

For the purpose of this report, an HVDC substation is assumed to consist of one or more converter units installed in a single location together with buildings, reactors, filters, reactive power supply, control, monitoring, protective, measuring and auxiliary equipment. While there is no discussion of a.c. switching substations in this report, a.c. filters and reactive power sources are included, although they may be connected to an a.c. bus separate from the HVDC substation.

2 Normative references

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

IEC 60146-1-1, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specifications of basic requirements*
Amendment 1 (1996)

IEC 60146-1-2, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-2: Application guide*

IEC 60146-1-3, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-3: Transformers and reactors*

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

IEC 60071-1, *Insulation co-ordination – Part 1: Terms, definitions, principles and rules*

IEC 60700-1, *Thyristor valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission – Part 1: Electrical testing*

IEC TR 60919-1:2010, *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 1: Steady-state conditions*
Amendment 1:2013

IEC TR 60919-3:2009, *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 3: Dynamic conditions*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	68
1 Domaine d'application	70
2 Références normatives	71
3 Généralités sur les spécifications du fonctionnement transitoire des systèmes CCHT	71
3.1 Spécifications du fonctionnement transitoire	71
3.2 Commentaire général	72
4 Transitoires de manœuvres sans défaut	72
4.1 Généralités	72
4.2 Mise sous tension et hors tension des équipements côté c.a.	72
4.3 Réjection de charge	75
4.4 Démarrage et arrêt des unités de conversion	76
4.5 Fonctionnement des disjoncteurs et des interrupteurs c.c.	76
5 Défauts du réseau alternatif	78
5.1 Généralités	78
5.2 Catégories de défauts	79
5.3 Objet des spécifications affectant le fonctionnement transitoire	79
5.3.1 Impédance effective du réseau c.a.	79
5.3.2 Transfert de puissance pendant les défauts	80
5.3.3 Recouvrement après élimination du défaut	81
5.3.4 Consommation de puissance réactive pendant les défauts et la période de recouvrement	81
5.3.5 Réjection de charge à la suite de défauts côté alternatif	82
5.3.6 Manœuvre des équipements de puissance réactive	82
5.3.7 Effets des courants et tensions harmoniques pendant les défauts	83
5.3.8 Changement de modes de régulation en fonctionnement sur défauts	83
5.3.9 Modulation de puissance CCHT	83
5.3.10 Réduction d'urgence de la puissance	83
5.4 Impact de la spécification sur la stratégie de contrôle	84
6 Défauts des filtres à c.a., des équipements de compensation de puissance réactive et du jeu de barres du poste c.a.	85
6.1 Généralités	85
6.2 Surtensions transitoires dans les bancs de filtres	85
6.3 Surintensités transitoires dans le filtre et les bancs de condensateurs	86
6.4 Protection contre le déséquilibre dans le banc de condensateurs	86
6.5 Exemples de protection des filtres et bancs de condensateurs	87
6.6 Protection de l'inductance shunt	88
6.7 Protection de la barre omnibus alternative	88
7 Défauts de l'unité de conversion	91
7.1 Généralités	91
7.2 Courts-circuits	91
7.3 Défaillance d'une unité de conversion dans l'exécution des fonctions assignées	92
7.3.1 Généralités	92
7.3.2 Fonctionnement en redresseur	93
7.3.3 Fonctionnement en onduleur	93

7.4	Protection de l'unité de conversion	93
7.4.1	Protection différentielle du convertisseur	93
7.4.2	Protection contre les surintensités	94
7.4.3	Protection contre les surtensions alternatives	94
7.4.4	Protection contre le fonctionnement à angle d'amorçage élevé	94
7.4.5	Protection contre les ratés de commutation	94
7.4.6	Protection des valves à thyristors	94
7.4.7	Protection du transformateur	94
7.4.8	Protection contre les discordances du changeur de prises du transformateur	95
7.4.9	Protection contre les défauts à la terre sur la connexion c.a.	95
7.5	Aspects de protection supplémentaires pour les unités de conversion connectées en série	95
7.6	Aspects de protection supplémentaires pour les unités de conversion connectées en parallèle.....	96
8	Défauts d'inductances, filtre et autres équipements à courant continu	97
8.1	Généralités.....	97
8.2	Types de défauts.....	98
8.3	Zones de protection.....	98
8.4	Protection de neutre	98
8.4.1	Généralités.....	98
8.4.2	Détection de défaut de neutre.....	98
8.4.3	Isolement des défauts de barre de neutre	99
8.4.4	Défauts de barre de neutre bipolaire.....	99
8.5	Protection de l'inductance de lissage.....	99
8.6	Protection des filtres d'harmoniques à courant continu	100
8.6.1	Généralités.....	100
8.6.2	Protection contre les défauts des bancs de filtre.....	100
8.6.3	Protection des condensateurs de filtres c.c.....	100
8.7	Protection contre les harmoniques c.c.	101
8.8	Protection contre les surtensions sur la ligne CCHT	101
8.9	Protection de l'appareillage côté continu	101
9	Défauts de la ligne à courant continu.....	104
9.1	Défauts de ligne aérienne.....	104
9.2	Défauts de câble	104
9.3	Caractéristiques des défauts du réseau continu	105
9.4	Spécifications fonctionnelles de détection des défauts c.c.....	105
9.5	Séquences de protection	105
9.5.1	Défauts de ligne aérienne.....	105
9.5.2	Défauts dans les réseaux à câbles	106
9.5.3	Défauts sur réseaux mixtes: ligne aérienne/câble	106
9.5.4	Défauts de l'un des câbles d'une liaison par câbles connectés en parallèle	106
9.5.5	Défauts dans un réseau à lignes aériennes parallèles	106
9.6	Schémas de protection contre les défauts	106
9.7	Circuit ouvert sur le côté c.c.	107
9.8	Protection de croisement de lignes de puissance	107
10	Défauts de la ligne d'électrode de terre	108
10.1	Généralités.....	108

10.2	Besoins particuliers – Ligne de terre	108
10.3	Contrôle de la ligne d'électrode	108
11	Défauts du conducteur de retour métallique.....	109
11.1	Conducteur pour le circuit de retour	109
11.2	Défauts du circuit de retour métallique	109
11.3	Détection des défauts – Retour métallique	110
11.4	Système de protection contre les défauts de retour métallique	110
12	Coordination de l'isolement – Systèmes CCHT	113
12.1	Généralités.....	113
12.2	Schéma de protection utilisant des parafoudres	114
12.3	Surtensions de manoeuvre et surtensions temporaires sur la partie alternative	114
12.4	Surtensions de manoeuvre et surtensions temporaires sur la partie continue	114
12.5	Surtensions de foudre à front raide	115
12.6	Marges de protection.....	115
12.7	Fonctions des parafoudres	117
12.7.1	Parafoudres de barres alternatifs (A_1 , A_2 et A_3).....	117
12.7.2	Parafoudres aux bornes des inductances de filtres (FA)	117
12.7.3	Parafoudres de valve (V)	117
12.7.4	Parafoudres de point milieu (M).....	118
12.7.5	Parafoudres de barre à courant continu de la conversion (CB) et parafoudres d'unité de conversion	118
12.7.6	Parafoudres de barre à courant continu et parafoudres de la ligne à courant continu (DB et DL)	118
12.7.7	Parafoudres de neutre à courant continu (E1 et E2)	118
12.7.8	Parafoudres d'inductance à courant continu (R).....	119
12.7.9	Parafoudres de filtre à courant continu (FD)	119
12.8	Prévention contre l'action des relais de protection provoquée par les courants de parafoudres.....	119
12.9	Distances d'isolement	119
12.10	Lignes de fuite pour l'isolation	119
12.10.1	Isolation extérieure	119
12.10.2	Isolation intérieure.....	120
13	Besoins en télécommunications.....	124
13.1	Généralités.....	124
13.2	Besoins particuliers – Réseaux de télécommunication.....	124
13.3	Conséquences de l'indisponibilité du réseau de télécommunication.....	125
13.4	Considérations particulières relatives aux systèmes à courant porteur de ligne (CPL).....	125
14	Systèmes d'alimentation auxiliaire de puissance	126
14.1	Généralités.....	126
14.2	Systèmes auxiliaires électriques.....	126
14.2.1	Généralités.....	126
14.2.2	Exigences particulières.....	127
14.3	Systèmes auxiliaires mécaniques	128
	Bibliographie.....	130

Figure 1 – Interrupteurs côtés c.c. pour sous-station CCHT avec unités de conversion connectées en série.....	78
Figure 2 – Exemple de caractéristiques de commande dépendant de la tension.....	84
Figure 3 – Exemple de disposition de bancs de filtres et de condensateurs et d'inductances c.a. pour un grand système CCHT bipolaire.....	89
Figure 4 – Exemple de disposition des transformateurs de courant pour protection différentielle des barres et filtres alternatifs	89
Figure 5 – Exemple de protection du filtre contre les défauts à la terre restreints.....	90
Figure 6 – Exemple d'emplacement des transformateurs de courant pour la protection contre le déséquilibre des bancs de condensateur et la protection d'un bras de filtre double réglé contre la surcharge.....	90
Figure 7 – Exemples de court-circuits de phase alternative, court-circuits côté pôle et défauts d'une unité de conversion à 12 impulsions	96
Figure 8 – Zones de protection pour unités de conversion connectées en série	97
Figure 9 – Zones de protection pour unités de conversion connectées en parallèle.....	97
Figure 10 – Exemple de zones de protection c.c. pour des unités de conversion connectées en série.....	102
Figure 11 – Exemple de zones de protection c.c. pour des pôles de conversion connectés en parallèle	103
Figure 12 – Système monopolaire avec retour métallique montrant un disjoncteur de transfert de retour métallique (TCRM).....	111
Figure 13 – Fonctionnement monopolaire d'un système bipolaire pendant une défaillance du pôle de conversion	111
Figure 14 – Circulation du courant continu dans le réseau alternatif pendant un défaut du conducteur de retour métallique alors que la terre de la sous-station CCHT est utilisée pour la mise à la terre du circuit continu	112
Figure 15 – Flux du courant à la terre pendant des défauts sur la ligne.....	112
Figure 16 – Exemple de détection des défauts du retour métallique au moyen d'un signal alternatif auxiliaire	113
Figure 17 – Exemple d'utilisation du TCRM pour éteindre les défauts à la terre du conducteur de retour métallique.....	113
Figure 18 – Exemple d'un schéma de protection par parafoudre pour une sous-station CCHT	121
Figure 19 – Exemple de schéma de protection c.c. par parafoudres pour une sous-station CCHT connectée en dos à dos	122
Figure 20 – Exemple de disposition de protection par parafoudre pour une sous-station CCHT de convertisseurs commutés par condensateurs	122
Figure 21 – Exemple de disposition de protection par parafoudre côté c.a. pour une sous-station CCHT.....	123
Figure 22 – Exemple d'un schéma de protection par parafoudre dans une sous-station CCHT avec des convertisseurs connectés en série.....	123

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES À COURANT CONTINU
HAUTE TENSION (CCHT) MUNIS DE CONVERTISSEURS
COMMUTÉS PAR LE RÉSEAU –**

Partie 2: Défauts et manœuvres

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 TR 60919-2 édition 2.1 contient la deuxième édition (2008-11) [documents 22F/160/DTR et 22F/165/RVC] et son amendement 1 (2015-06) [documents 22F/344/DTR et 22F/345A/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.

La tâche principale des comités d'études de l'IEC est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

L'IEC 60919-2, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 22F: Electronique 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.

La présente édition contient les changements fondamentaux suivants par rapport à l'édition précédente:

- a) ce rapport ne concerne que les convertisseurs commutés par le réseau;
- b) des changements significatifs ont été effectués pour la technologie du système de contrôle;
- c) certaines limites environnementales ont été introduites, par exemple les niveaux de bruit audible maximaux;
- d) les convertisseurs connectés au travers de condensateurs (CCC) et les convertisseurs à condensateurs en série contrôlés (CCSC) ont été ajoutés.

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

Une liste de toutes les parties de l'IEC 60919, sous le titre général: *Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) munis de convertisseurs commutés par le réseau*, est disponible 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.

FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES À COURANT CONTINU HAUTE TENSION (CCHT) MUNIS DE CONVERTISSEURS COMMUTÉS PAR LE RÉSEAU –

Partie 2: Défauts et manœuvres

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60919, qui est un rapport technique, fournit des indications générales sur les performances de fonctionnement transitoire et sur les exigences de protection contre les défauts pour les systèmes à courant continu haute tension (CCHT). Il se rapporte au fonctionnement transitoire lié aux défauts et manoeuvres dans le cas des systèmes CCHT à deux extrémités, utilisant des convertisseurs à 12 impulsions comprenant des ponts de Graetz hexaphasés mais ne couvre pas les systèmes de transmission CCHT multiterminaux. Cependant, certains aspects liés à la mise en parallèle de convertisseurs et de lignes, s'ils relèvent d'un système à deux extrémités, seront également abordés. Les convertisseurs sont supposés utiliser des valves à thyristors dans les bras de pont, avec des parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour la coordination de l'isolement, et permettre le transport d'énergie dans les deux sens. Les valves à diode ne sont pas prises en considération dans le présent rapport.

Seuls les convertisseurs commutés par le réseau sont traités dans le présent rapport, qui comprend les configurations du circuit du convertisseur commuté par condensateur. Les spécifications générales pour les convertisseurs commutés par le réseau à semiconducteur sont données dans l'IEC 60146-1-1, l'IEC 60146-1-2 et l'IEC 60146-1-3. Les convertisseurs alimentés en tension ne sont pas pris en compte.

Le rapport entier se compose de trois parties dont la présente norme constitue la deuxième, l'IEC 60919-1 traitant du régime établi, l'IEC 60919-3 concernant le fonctionnement dynamique. Un effort a été fait pour éviter les répétitions entre les trois parties. En conséquence, les utilisateurs sont invités à considérer les trois parties du rapport avant de préparer une spécification pour l'achat d'un système CCHT à deux extrémités.

Les lecteurs sont avertis de bien faire la différence entre les spécifications de fonctionnement du système et les spécifications de réalisation des équipements pour les composants individuels de ce système. Alors que les spécifications des équipements et des essais ne sont pas définies dans ce rapport, l'accent est mis sur celles qui pourraient avoir une influence directe sur le fonctionnement du système. Les performances détaillées de fonctionnement en régime sismique sont exclues de ce rapport. Par ailleurs, en raison des multiples variantes qui peuvent exister entre les différents systèmes CCHT, celles-ci ne seront pas étudiées en détail. Par conséquent, il convient de ne pas utiliser ce rapport en tant que spécification pour un projet particulier, mais plutôt en tant que base d'une spécification appropriée, étudiée pour répondre aux besoins réels d'un système pour un schéma particulier de transmission d'énergie électrique. Ce rapport n'a pas pour objet de distinguer la responsabilité de l'utilisateur de celle du constructeur en ce qui concerne le projet spécifié.

Les termes et définitions pour le transport du courant continu haute tension (CCHT) utilisés dans le présent rapport sont donnés dans l'IEC 60633.

Puisque les matériels sont habituellement spécifiés et achetés séparément, la ligne de transport CCHT, la ligne de terre et l'électrode de terre sont uniquement incluses à cause de leur influence sur la performance du système CCHT.

Pour les besoins du présent rapport, un poste CCHT est considéré pour représenter une ou plusieurs unités de conversions installées dans un emplacement unique avec des bâtiments, des inductances, des filtres, une alimentation réactive et un équipement de commande, de surveillance, de protection, de mesure et auxiliaire. Bien qu'il n'y ait aucun propos sur les postes de sectionnement courant alternatif dans le présent rapport, les filtres à courant alternatif et les sources de puissance réactive sont traités, bien qu'ils puissent être connectés à un bus à courant alternatif séparé du poste CCHT.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. 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 60146-1-1, *Convertisseurs à semiconducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-1: Spécifications des clauses techniques de base*
Amendement 1 (1996)

IEC 60146-1-2, *Convertisseurs à semiconducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-2: Guide d'application*

IEC 60146-1-3, *Convertisseurs à semi-conducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-3: Transformateurs et bobines d'inductance*

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

IEC 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

IEC 60700-1, *Essais des Valves à thyristors pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC TR 60919-1:2010, *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 1: Steady-state conditions*
Amendement 1:2013 (disponible en anglais seulement)

IEC TR 60919-3:2009, *Fonctionnement des systèmes à courant continu haute tension (CCHT) avec des convertisseurs commutés par le réseau – Partie 3: Conditions dynamiques*