

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
146-1-2**

Troisième édition
Third edition
1991-03

Convertisseurs à semiconducteurs

**Spécifications communes et
convertisseurs commutés par le réseau**

**Partie 1-2:
Guide d'application**

Semiconductor convertors

**General requirements and
line commutated convertors**

**Part 1-2:
Application guide**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 146-1-2: 1991

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
146-1-2**

Troisième édition
Third edition
1991-03

**Convertisseurs à semiconducteurs
Spécifications communes et
convertisseurs commutés par le réseau**

**Partie 1-2:
Guide d'application**

**Semiconductor convertors
General requirements and
line commutated convertors**

**Part 1-2:
Application guide**

© CEI 1991 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembé Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE XD

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

AVA Documents
Document Sharing Hub

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	10

Section 1 - Généralités

Articles	
1.1 Domaine d'application	12
1.2 Application des convertisseurs de puissance à semiconducteurs	12
1.2.1 Equipement de conversion	12
1.2.2 Réglage des puissances active et réactive dans les réseaux	14
1.3 Données de spécification de l'équipement	14
1.3.1 Données principales de la spécification	14
1.3.2 Données complémentaires	14
1.3.3 Conditions anormales de service	16
1.4 Transformateurs et inductances pour convertisseurs	18
1.5 Facteurs de calcul	18
1.5.1 Rapports de tension	18
1.5.2 Facteur de courant côté réseau du transformateur	20
1.5.3 Facteur de courant côté valves du transformateur	20
1.5.4 Variation de tension	20
1.5.5 Circuit magnétique	22
1.5.6 Facteur de pertes	22
1.6 Montages parallèle et série	22
1.6.1 Montage de valves en parallèle et en série	22
1.6.2 Montages en parallèle ou en série de blocs et d'équipements	28
1.7 Facteur de puissance	28
1.7.1 Généralités	28
1.7.2 Symboles utilisés dans la détermination du facteur de déphasage	30
1.7.3 Diagramme du cercle pour l'approximation du facteur de déphasage $\cos \varphi_{IN}$ et de la puissance réactive Q_{1LN} pour convertisseur en modes redresseur et onduleur	34
1.7.4 Calcul du facteur de déphasage $\cos \varphi_1$	34
1.7.5 Facteur de conversion	40
1.8 Variation de tension continue	40
1.8.1 Variation inhérente de tension	42
1.8.2 Variation de tension continue due à l'impédance du réseau c.a.	46
1.8.3 Informations à échanger entre le fournisseur et l'acheteur à propos de la variation de tension du convertisseur	52
1.9 Limites de tension pour une commutation fiable en mode onduleur	52
1.10 Forme d'onde de la tension alternative	54

Section 2 - Définitions

2.1 Définitions relatives aux défauts de convertisseur	58
2.1.1 Décrochage (VEI 551-05-58, modifié)	58
2.1.2 Raté d'allumage (VEI 551-05-57, modifié)	58
2.1.3 Raté de blocage (VEI 551-05-53, modifié)	58
2.1.4 Perforation (VEI 551-05-59, modifié)	58
2.1.5 Amorçage intempestif (VEI 551-05-56, modifié)	58
2.1.6 Défaut de commutation (VEI 551-05-52, modifié)	58
2.2 Définitions relatives aux transitoires produits par les convertisseurs	60
2.2.1 Transitoires côté continu	60
2.2.2 Transitoires de commutation côté ligne (transitoires répétitifs)	60

CONTENTS

	Page
FOREWORD	11
Section 1 - General	
Clause	
1.1 Scope	13
1.2 Application of semiconductor power convertors	13
1.2.1 Conversion equipment	13
1.2.2 Supply source conditioning (active and reactive power)	15
1.3 Equipment specification data	15
1.3.1 Main items of the specification	15
1.3.2 Additional information	15
1.3.3 Unusual service conditions	17
1.4 Converter transformers and reactors	19
1.5 Calculation factors	19
1.5.1 Voltage ratios	19
1.5.2 Line side transformer current factor	21
1.5.3 Valve-side transformer current factor	21
1.5.4 Voltage regulation	21
1.5.5 Magnetic circuit	23
1.5.6 Power loss factor	23
1.6 Parallel and series connections	23
1.6.1 Parallel or series connection of valve devices	23
1.6.2 Parallel or series connection of assemblies and equipment units	29
1.7 Power factor	29
1.7.1 General	29
1.7.2 Symbols used in the determination of displacement factor	31
1.7.3 Circle diagram for the approximation of the displacement factor $\cos \varphi_{1N}$ and of the reactive power Q_{1LN} for rectifier and inverter operation	35
1.7.4 Calculation of the displacement factor $\cos \varphi_1$	35
1.7.5 Conversion factor	41
1.8 Direct voltage regulation	41
1.8.1 Inherent direct voltage regulation	43
1.8.2 Direct voltage regulation due to a.c. system impedance	47
1.8.3 Information to be exchanged between supplier and purchaser about direct voltage regulation of the converter	53
1.9 Voltage limits for reliable commutation in inverter mode	53
1.10 A.C. voltage waveform	55
Section 2 - Definitions	
2.1 Definitions related to converter faults	59
2.1.1 Conduction through (shoot through) (IEV 551-05-58, modified)	59
2.1.2 Firing failure (IEV 551-05-57, modified)	59
2.1.3 Breakthrough (IEV 551-05-53, modified)	59
2.1.4 Breakdown (IEV 551-05-59, modified)	59
2.1.5 False firing (IEV 551-05-56, modified)	59
2.1.6 Commutation failure (IEV 551-05-52, modified)	59
2.2 Definitions related to converter generated transients	61
2.2.1 D.C. side transients	61
2.2.2 Commutation transients on the line (repetitive transients)	61

Articles

Pages

Section 3 - Données d'application

3.1	Calcul pratique des paramètres de fonctionnement	62
3.1.1	Hypothèses	62
3.1.2	Calculs préliminaires	62
3.1.3	Calcul d'un point de fonctionnement	64
3.2	Variation de tension due aux convertisseurs	70
3.2.1	Variation de tension fondamentale	70
3.2.2	Valeur minimale de R_{SC} pour la variation de tension	70
3.2.3	Rapport du transformateur de convertisseur	72
3.2.4	Puissance du transformateur	74
3.3	Compensation de puissance réactive des convertisseurs	74
3.3.1	Consommation moyenne de puissance réactive	74
3.3.2	Compensation de la puissance réactive moyenne	76
3.3.3	Fluctuations de tension avec compensation fixe	76
3.4	Contenu harmonique de la tension continue	78
3.5	Distorsion de la tension d'alimentation	80
3.5.1	Encoches de commutation	80
3.5.2	Fonctionnement de plusieurs convertisseurs sur la même source	84
3.6	Grandeurs du côté réseau	86
3.6.1	Valeur efficace du courant de ligne	86
3.6.2	Harmoniques côté ligne - méthode approximative avec $p = 6$	88
3.6.3	Valeur minimale de R_{SC} pour la distorsion harmonique	90
3.6.4	Calcul du spectre des courants harmoniques	94
3.6.5	Estimation du déphasage des courants harmoniques	94
3.6.6	Addition des courants harmoniques	98
3.6.7	Spectres maximal et moyen	98
3.6.8	Déphasage du transformateur	98
3.6.9	Commande séquentielle, convertisseurs à deux ponts hexaphasés	100
3.7	Compensation du facteur de puissance et distorsion harmonique	100
3.7.1	Fréquence de résonance	102
3.7.2	Batterie à couplage direct	102
3.7.3	Estimation de la fréquence de résonance	102
3.7.4	Réactance de décalage de fréquence	106
3.7.5	Fréquences de télécommande (ondes porteuses)	108
3.8	Autres considérations	108
3.8.1	Angle de commande aléatoire	108
3.8.2	Instabilité sous-harmonique	110
3.8.3	Filtres d'harmoniques	110
3.8.4	Capacité approximative des câbles	110
3.9	Calcul des courants de court-circuit côté continu des convertisseurs	110
3.10	Indications pour le choix de la classe d'immunité	112
3.10.1	Classe d'immunité des convertisseurs	112
3.10.2	Choix de la classe d'immunité	112

Section 4 - Prescriptions d'essai

4.1	Mesure des pertes par essai en court-circuit	120
4.1.1	Montages monophasés	120
4.1.2	Montages polyphasés à double voie	120
4.1.3	Montages polyphasés à simple voie	120
4.2	Mise en oeuvre de la méthode de court-circuit	120

Clause	Page
Section 3 - Application information	
3.1 Practical calculation of the operating parameters	63
3.1.1 Assumptions	63
3.1.2 Preliminary calculations	63
3.1.3 Calculation of the operating conditions	65
3.2 Supply system voltage change due to convertor loads	71
3.2.1 Fundamental voltage change	71
3.2.2 Minimum RSC requirements for voltage change	71
3.2.3 Convertor transformer ratio	73
3.2.4 Transformer rating	75
3.3 Compensation of convertor reactive power consumption	75
3.3.1 Average reactive power consumption	75
3.3.2 Required compensation of the average reactive power	77
3.3.3 Voltage fluctuations with fixed reactive power compensation	77
3.4 Direct voltage harmonic content	79
3.5 Supply voltage distortion	81
3.5.1 Commutation notches	81
3.5.2 Operation of several convertors on the same supply line	85
3.6 Quantities on the line side	87
3.6.1 R.M.S. value of the line current	87
3.6.2 Harmonics on the line side, approximate method for 6-pulse convertors	89
3.6.3 Minimum RSC requirements for harmonic distortion	91
3.6.4 Calculation of the harmonic current spectrum	95
3.6.5 Estimated phase shift of the harmonic currents	95
3.6.6 Addition of harmonic currents	99
3.6.7 Peak and average harmonic spectrum	99
3.6.8 Transformer phase shift	99
3.6.9 Sequential gating, two 6-pulse convertors	101
3.7 Power factor compensation and harmonic distortion	101
3.7.1 Resonant frequency	103
3.7.2 Directly connected capacitor bank	103
3.7.3 Estimation of the resonant frequency	103
3.7.4 Detuning reactor	107
3.7.5 Ripple control frequencies (Carrier frequencies)	109
3.8 Other considerations	109
3.8.1 Random control angle	109
3.8.2 Sub-harmonic instability	111
3.8.3 Harmonic filters	111
3.8.4 Approximate capacitance of cables	111
3.9 Calculation of d.c. short-circuit current of convertors	111
3.10 Guide-lines for the selection of the immunity class	113
3.10.1 Convertor immunity class	113
3.10.2 Selection of the immunity class	113
Section 4 - Test requirements	
4.1 Guidance on power loss evaluation by short-circuit test	121
4.1.1 Single-phase connections	121
4.1.2 Polyphase double-way connections	121
4.1.3 Polyphase single-way connections	121
4.2 Procedure for evaluation of power losses by short-circuit method	121

Articles	Pages
4.3 Méthodes d'essai	122
4.3.1 Méthode A1	122
4.3.2 Méthode B	124
4.3.3 Méthode C	124
4.3.4 Méthode D	126
4.3.5 Méthode E	130
4.3.6 Méthode A2	130
Section 5 - Performances requises	
5.1 Représentation des valeurs assignées des courants de surcharge	132
5.2 Définitions relatives à la température virtuelle de jonction	134
5.2.1 Symboles littéraux	134
5.2.2 Résistance thermique R_{th}	136
5.2.3 Impédance thermique transitoire Z_{th}	136
5.2.4 Température virtuelle de jonction Θ_j	136
5.3 Détermination de l'aptitude aux surcharges par le calcul de la température virtuelle de jonction	138
5.3.1 Approximation de la forme des impulsions de puissance dissipée appliquée aux semiconducteurs	138
5.3.2 La méthode de superposition pour calculer la température	142
5.3.3 Calcul de la température virtuelle de jonction pour une charge continue	142
5.3.4 Calcul de la température virtuelle de jonction pour charges cycliques	146
5.3.5 Calcul de la température virtuelle de jonction pour quelques applications	148
5.4 Conditions de fonctionnement des circuits affectant la tension appliquée aux éléments de convertisseur	148
Section 6 - Fonctionnement des convertisseurs	
6.1 Régulation	152
6.2 Propriétés statiques	152
6.3 Propriétés dynamiques du système de régulation	152
6.4 Fonctionnement des convertisseurs simples et des convertisseurs doubles	154
6.4.1 Montage en convertisseur simple	154
6.4.2 Montage convertisseur double et limites de fonctionnement en mode redresseur et onduleur	156
6.5 Courant de transition	158
6.6 Suppression du courant continu de circulation dans les montages en convertisseur double	160
6.6.1 Limitation de l'angle de retard (de commande)	162
6.6.2 Réglage du courant de circulation	162
6.6.3 Réglage par blocage des impulsions	162
6.7 Principe de fonctionnement des convertisseurs réversibles pour la commande de moteurs c.c.	162
6.7.1 Inversion de la polarité du champ	162
6.7.2 Inversion de la polarité de l'induit par inverseur	162
6.7.3 Montage convertisseur double pour l'induit	164
Section 7 - Défauts des convertisseurs	
7.1 Généralités	166
7.2 Localisation de défaut	166
Annexe A (informative) Bibliographie	168
Annexe B (informative) Index	170

Clause	Page
4.3 Test methods	123
4.3.1 Method A1	123
4.3.2 Method B	125
4.3.3 Method C	125
4.3.4 Method D	127
4.3.5 Method E	131
4.3.6 Method A2	131
Section 5 - Performance requirements	
5.1 Presentation of rated peak load current values	133
5.2 Definitions and letter symbols related to virtual junction temperature	135
5.2.1 Letter symbols	135
5.2.2 Thermal resistance R_{th}	137
5.2.3 Transient thermal impedance Z_{th}	137
5.2.4 Virtual junction temperature θ_j	137
5.3 Determination of peak load capability through calculation of the virtual junction temperature	139
5.3.1 Approximation of the shape of power pulses applied to the semiconductor device	139
5.3.2 The superposition method for calculation of temperature	143
5.3.3 Calculation of the virtual junction temperature for continuous load	143
5.3.4 Calculation of the virtual junction temperature for cyclic loads	147
5.3.5 Calculation of virtual junction temperature for a few typical applications	149
5.4 Circuit operating conditions affecting the voltage applied across convertor elements	149
Section 6 - Convertor operation	
6.1 Stabilization	153
6.2 Static properties	153
6.3 Dynamic properties of the control system	153
6.4 Mode of operation of single and double convertors	155
6.4.1 Single convertor connection	155
6.4.2 Double convertor connections and limits for rectifier and inverter operation	157
6.5 Transition current	159
6.6 Suppression of direct current circulation in double convertor connections	161
6.6.1 Limitation of delay angles	163
6.6.2 Controlled circulating current	163
6.6.3 Blocking of trigger pulses	163
6.7 Principle of operation for reversible convertors for control of d.c. motors	163
6.7.1 Motor field reversal	163
6.7.2 Motor armature reversal by reversing switch	163
6.7.3 Double convertor connection to motor armature	165
Section 7 - Convertor faults	
7.1 General	167
7.2 Fault finding	167
Annex A (informative) Bibliography	169
Annex B (informative) Index	169

Figures

1 - Diagramme de cercle pour l'approximation du facteur de déphasage	34
2 - Facteur de déphasage en fonction de d_{xN} pour $p = 6$	38
3 - Facteur de déphasage en fonction de d_{xN} pour $p = 12$	38
4 - d_{LN} en fonction de d_{xN} pour $p = 6$ et $p = 12$	50
5 - Forme d'onde de la tension alternative	56
6 - Tensions en cas de défauts de convertisseur	60
7 - Spectre harmonique du côté c.a. pour $p = 6$	96
8 - Fréquence de résonance et facteur d'amplification	104
9 - Exemple de réseau de distribution	116
10 - Méthode d'essai A1	122
11 - Méthode d'essai D	126
12 - Représentation des valeurs assignées des courants	132
13 - Surcharges répétitives	134
14 - Approximation de la forme des impulsions de puissance	140
15 - Calcul de la température virtuelle de jonction	142
16 - Calcul de la température virtuelle de jonction pour charges cycliques	146
17 - Conditions de fonctionnement des circuits affectant la tension appliquée aux éléments de convertisseur	150
18 - Tension continue pour diverses valeurs d'angle de retard (de commande)	154
19 - Tension continue pour diverses valeurs de charge et d'angle de retard (de commande) ...	156
20 - Limite de tension continue pour mode onduleur	158
21 - Tension continue pour valeurs inférieures au courant de transition	160
22 - Séquences de fonctionnement de convertisseurs pour entraînement par moteur réversible c.c.	164

Tableaux

1 - Facteurs de calcul	24
2 - Valeur efficace du courant de ligne	88
3 - R_{SC} minimal, réseaux basse tension	92
4 - Déphasage du transformateur et rangs d'harmonique	98
5 - Valeur approchée des câbles (kvar/km)	110
6 - Valeurs en court-circuit des courants de convertisseur	110
7 - Valeurs calculées par l'exemple de la figure 9	118
8 - Température virtuelle de jonction	148

Figures

1 - Circle diagram for approximation of the displacement factor	35
2 - Displacement factor as a function of d_{xN} for $p = 6$	39
3 - Displacement factor as a function of d_{xN} for $p = 12$	39
4 - d_{LN} as a function of d_{xN} for $p = 6$ and $p = 12$	51
5 - AC voltage waveform	57
6 - Voltages at convertor faults	61
7 - Harmonic current spectrum on the a.c. side for $p = 6$	97
8 - Resonant frequency and amplification factor	105
9 - Example of power distribution	117
10 - Test method A1	123
11 - Test method D	127
12 - Single peak load	133
13 - Repetitive peak loads	135
14 - Approximation of the shape of power pulses	141
15 - Calculation of the virtual junction temperature	143
16 - Calculation of the virtual junction temperature for cyclic loads	147
17 - Circuit operating conditions affecting the voltage applied across convertor elements ..	151
18 - Direct voltage waveform for various delay angles	155
19 - Direct voltage for various loads and delay angles	157
20 - Direct voltage limits in inverter operation	159
21 - Direct voltage at values below the transition current	161
22 - Operating sequences of convertors serving a reversible d.c. motor	165

Tables

1 - Connections and calculation factors	25
2 - R.M.S. values of line current	89
3 - Minimum R_{SC} requirement for low voltage systems	93
4 - Transformer phase shift and harmonic orders	99
5 - Approximate kvar/km of cables	111
6 - Short-circuit values of convertor currents	111
7 - Calculated values for the example in figure 9	119
8 - Virtual junction temperature	149

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CONVERTISSEURS À SEMICONDUCTEURS

Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau
Partie 1-2: Guide d'application

AVANT-PROPOS

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

Le présent rapport a été établi par le Sous-Comité 22B: Convertisseurs à semiconducteurs, du Comité d'Etude n° 22 de la CEI: Electronique de puissance. Ce rapport constitue la partie 1-2 de la nouvelle édition de la CEI 146 qui remplace partiellement la CEI 146 (1973) ainsi que sa Modification n° 1 (1975).

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
22B(BC)56	22B(BC)59

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

Les annexes A: Bibliographie et B: Index sont informatives.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SEMICONDUCTOR CONVERTORS

General requirements and line commutated convertors
Part 1-2: Application guide

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subject dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

This report has been prepared by Sub-Committee 22B: Semiconductor Convertors, of IEC Technical Committee No. 22: Power electronics. It constitutes Part 1-2 of IEC 146 (3rd edition) and supplements IEC 146-1-1 and IEC 146-1-3. It partially replaces IEC 146 (1973) and its Amendment No. 1 (1975).

The text of this report is based upon the following documents:

Six Months' Rule	Report on the Voting
22B(CO)56	22B(CO)59

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

Annexes A: Bibliography and B: Index are informative

CONVERTISSEURS À SEMICONDUCTEURS

Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau Partie 1-2: Guide d'application

Section 1 - Généralités

1.1 Domaine d'application

Le présent rapport donne des indications sur des variantes aux spécifications de la CEI 146-1-1, afin de permettre leur extension de manière coordonnée pour les cas spéciaux. Il donne aussi des informations techniques complémentaires destinées à faciliter la compréhension de la CEI 146-1-1.

Le présent rapport concerne principalement les convertisseurs commutés par le réseau et n'est pas une norme, sauf en ce qui concerne certains composants auxiliaires dans le cas où les normes existantes ne donneraient pas les indications nécessaires.

1.2 Application des convertisseurs de puissance à semiconducteurs

Les convertisseurs de puissance à semiconducteurs sont utilisés dans la plupart des industries pour convertir l'énergie électrique et faciliter la conversion d'énergie thermique ou mécanique en énergie électrique ou vice versa.

Exemples:

1.2.1 Equipement de conversion

- a) charges c.c., stabilisation ou réglage de tension/courant;
- b) gradateurs pour courant alternatif à sortie redressée ou non;
- c) fréquence variable:
 - convertisseurs commutés par la source c.a.;
 - récupération de l'énergie de glissement;
 - convertisseurs commutés par une machine;
 - convertisseurs autocommutés: source de courant;
source de tension;
- d) entraînements à vitesse variable (objet de normes spécifiques de la CEI);
- e) processus électrochimiques (électrolyse, galvanoplastie, électrophorèse);
- f) alimentations pour ordinateurs;
- g) sous-stations de traction, chemins de fer, tramways, mines, véhicules électriques;
- h) alimentations pour la téléphonie;
- i) électro-aimants, alimentation d'inducteurs;
- j) alimentations c.c. pour émetteurs de radiocommunication;

SEMICONDUCTOR CONVERTORS

General requirements and line commutated convertors Part 1-2: Application guide

Section 1 - General

1.1 Scope

This report gives guidance on variations to the specifications in IEC 146-1-1 to enable the specification to be extended in a controlled form for special cases. Background information is also given on technical points which should facilitate the use of IEC 146-1-1.

This report primarily covers line commutated convertors and is not in itself a specification, except as regards certain auxiliary components, in so far as existing standards may not provide the necessary data.

1.2 Application of semiconductor power convertors

Semiconductor power convertors are used in most industries for the conversion of electrical power and also to facilitate the conversion of thermal or mechanical energy into electrical power and vice versa.

Examples:

1.2.1 Conversion equipment

- a) d.c. load, stabilized/adjustable voltage/current control;
- b) a.c. power controllers (a.c. or d.c. output);
- c) a.c. variable frequency:

line-commutated convertors;	
slip energy recovery;	
machine-commutated convertors;	
self-commutated convertors:	voltage source;
	current source;
- d) adjustable speed drives (covered by specific IEC standards);
- e) chemical processes (electrolysis, electroplating, electrophoresis);
- f) computer power supplies;
- g) traction substations, railways, tramways, mines, electric vehicles;
- h) telephone power supplies;
- i) electromagnets, field supplies;
- j) radio transmitter d.c. supplies;

- k) torches à plasma;
- l) alimentations c.c. pour fours à arcs;
- m) conversion de l'énergie solaire;
- etc.

1.2.2 Réglage des puissances active et réactive dans les réseaux

- a) Réseaux HT ou MT (transport et distribution, correction du facteur de puissance de réseaux internes);
- b) Réseaux BT (économie d'énergie);
- c) Centrales autonomes ou de secours;
- d) Alimentation c.c. ou c.a., en particulier à partir de l'énergie solaire, éolienne ou chimique.

NOTE - Certaines des applications énumérées ci-dessus sont l'objet de normes spécifiques de la CEI, existantes ou à paraître.

1.3 Données de spécification de l'équipement

1.3.1 Données principales de la spécification

Voir 3.11.4 de la CEI 146-1-1: Plaque signalétique.

1.3.2 Données complémentaires

En complément des caractéristiques essentielles devant figurer sur la plaque signalétique, comme spécifié dans la CEI 146-1-1, la liste ci-après est destinée à éviter que d'autres données importantes manquent dans la spécification, concernant les besoins de l'utilisateur ou l'équipement lui-même.

1.3.2.1 Source d'alimentation

- a) Tension et fréquence (s'il y a lieu). Gamme de variation des valeurs assignées, déséquilibre, coupures brèves;
- b) Puissance de court-circuit (ou description des câbles, lignes et transformateurs): valeurs minimale, moyenne statistique, maximale;
- c) Présence d'autres charges (moteurs, condensateurs, fours, etc.);
- d) Limites de perturbations (observées ou admissibles);
- e) Mode de mise à la terre.

- k) plasma torches;
- l) arc furnace d.c. power supplies;
- m) solar energy conversion;
- etc.

1.2.2 *Supply source conditioning (active and reactive power)*

- a) HV or MV systems (transport and distribution, in-plant P.F. correction);
- b) LV systems (energy saving);
- c) Isolated or standby generating plant;
- d) D.C. or a.c. supply particularly from solar, wind or chemical energy.

NOTE - Some of the applications listed above are the subject of particular IEC Publications now existing or in preparation.

1.3 **Equipment specification data**

1.3.1 *Main items of the specification*

See 3.11.4 of IEC 146-1-1: Rating plate.

1.3.2 *Additional information*

In addition to the essential data such as should appear on the rating plate as specified in IEC 146-1-1, the following list may prevent other important information being omitted from the specification, concerning the purchaser's requirements or the supplier's product.

1.3.2.1 *Supply source*

- a) Voltage and frequency (if applicable); Range of rated values, unbalance, short time outage;
- b) Short-circuit power (or description of cables, lines and transformers): minimum, statistical average, maximum values;
- c) Other existing loads (motors, capacitors, furnaces, etc.);
- d) Limits of disturbances (prevailing or permitted);
- e) Type of earthing.

1.3.2.2 *Spécification de la sortie*

- a) Tension et fréquence de sortie (s'il y a lieu);
- b) Gamme de variation requise (réglage continu ou par échelons);
- c) Aptitude à l'inversion de tension et/ou de courant (quadrant(s) de fonctionnement);
- d) Limites permises de variation de tension/courant/fréquence;
- e) Caractère de la charge;
- f) Mode de mise à la terre.

1.3.2.3 *Spécification de l'environnement*

- a) Climats tempéré, tropical, arctique;
- b) Température, humidité, teneur en poussières (à moins que la CEI 664, degré 1, ne soit applicable);
- c) Conditions anormales de service;
- d) Installation intérieure ou extérieure;
- e) Classe de protection (suivant normes de la CEI);
- f) Conformité à des normes spécifiques (CEI ou autres, normes de sécurité comprises).

1.3.2.4 *Conditions électriques de service*

- a) Catégorie de jeu de barres d'alimentation:
 - Réseau spécialement (uniquement) affecté aux convertisseurs;
 - Réseau pour applications diverses (incluant des moteurs c.a.);
 - Réseau de haute qualité (alimentation de charges à faible immunité, comme ordinateurs, instrumentation médicale, etc.);
- b) Classe d'immunité de l'équipement. Une classe différente d'immunité peut être retenue pour un ou plusieurs des paramètres.

1.3.3 *Conditions anormales de service*

1.3.3.1 *Conditions anormales de température*

Les valeurs préférentielles de conditions spécifiques de température sont données de 2.2.2 à 2.2.2.1 de la CEI 146-1-1.

1.3.2.2 *Output specification*

- a) Output voltage and frequency (if applicable);
- b) Required range of variation (continuous or stepwise);
- c) Voltage and/or current reversing capability (quadrant(s) of operation);
- d) Limits of permitted voltage/current/frequency variation;
- e) Character of load;
- f) Type of earthing.

1.3.2.3 *Environment specification*

- a) Temperate, tropical, arctic climates;
- b) Temperature, humidity, dust content (unless IEC 664, degree 1, is applicable);
- c) Unusual service conditions;
- d) Outdoor/indoor installation;
- e) Protection class (according to IEC standards);
- f) Compliance with specific standards (IEC or others, including safety standards).

1.3.2.4 *Electrical service conditions*

- a) Supply bus category:
 - converter dedicated system (convertors only);
 - general purpose system (includes a.c. motor loads);
 - high quality system (supplying loads with low immunity level such as computers, medical instrumentation etc.);
- b) Immunity class of the equipment: a different immunity class may be selected for one or more parameters.

1.3.3 *Unusual service conditions*

1.3.3.1 *Abnormal temperature conditions*

The preferred values of specified ambient temperature conditions are given in IEC 146-1-1, 2.2.2 to 2.2.2.1.

Pour les cas où des conditions spéciales sont à considérer, on tiendra compte de ce qui suit:

a) des températures différentes du milieu réfrigérant peuvent être spécifiées pour les blocs convertisseurs et pour le transformateur. Les valeurs relatives aux transformateurs sont données dans la CEI 146-1-3 et celles relatives aux blocs dans la CEI 146-1-1;

b) les températures ambiantes, minimales et maximales ou la température du milieu réfrigérant, peuvent être spécifiées par l'acquéreur ou par le fournisseur.

1.3.3.2 Teneur en poussières et en particules solides

Pour des applications particulières, le degré de pollution peut être spécifié séparément, suivant la CEI 664 ou d'autres normes applicables, pour indiquer par exemple le degré de pollution à considérer autre que le degré 1, tel que spécifié dans la CEI 664.

1.4 Transformateurs et inductances pour convertisseurs

Voir la CEI 146-1-3.

1.5 Facteurs de calcul

Voir tableau 1. Pour les symboles littéraux et les définitions, voir 1.4, 1.5 de la CEI 146-1-1 et 1.7.2, 1.8.1.4 du présent rapport.

1.5.1 Rapports de tension

Le tableau 1 donne les rapports:

colonne 10

colonne 11

$$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$$

$$\frac{U_{iM}}{U_{di}}$$

avec:

U_{di} tension continue fictive à vide;
 U_{v0} tension côté valves du transformateur;
 U_{iM} tension fictive de crête à vide apparaissant entre les bornes d'extrémité d'un bras, en négligeant les surtensions transitoires interne ou externe et la chute de tension directe dans les valves, à vide. Le rapport est le même à faible charge, au voisinage du courant critique.

NOTE - Pour les montages nos 5, 11 et d'autres utilisant un transformateur interphase, le rapport U_{iM}/U_{di} augmente à vide.

For cases where special conditions have to be considered the following is applicable:

- a) different cooling medium temperatures may be specified for the assemblies and for the convertor transformer. The values of cooling medium temperatures relating to the transformers are given in IEC 146-1-3 and those relating to assemblies are given in IEC 146-1-1;
- b) the maximum and the minimum ambient temperatures or the cooling medium temperature may be specified by the purchaser or by the supplier.

1.3.3.2 Dust and solid particle content

For particular applications the degree of pollution may be specified separately, according to IEC 664 or other relevant IEC Publications, for example specifying pollution classes other than degree 1 as specified in IEC 664.

1.4 Convertor transformers and reactors

See IEC 146-1-3.

1.5 Calculation factors

See table 1. For letter symbols and definitions refer to 1.4, 1.5 of IEC 146-1-1 and 1.7.2, 1.8.1.4 of this report.

1.5.1 Voltage ratios

Table 1 gives the ratios:

column 10

$$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$$

column 11

$$\frac{U_{iM}}{U_{di}}$$

where:

- U_{di} ideal no-load direct voltage;
- U_{v0} transformer valve winding voltage;
- U_{iM} ideal crest no-load voltage, appearing between the end terminals of an arm neglecting internal and external voltage drops in valves, at no load. The ratio remains the same at light load current close to the transition current.

NOTE - For connections Nos. 5, 11 and other connections employing interphase transformers, the ratio U_{iM}/U_{di} increases at no-load.

1.5.2 Facteur de courant côté réseau du transformateur

Le quotient de la valeur efficace I'_L du courant côté réseau, au courant continu I_d est donné au tableau 1, colonne 8, dans l'hypothèse d'un courant parfaitement lissé, d'une forme d'onde rectangulaire du courant alternatif et avec les rapports de tension ci-après pour les montages à simple ou à double voie:

$$\frac{\text{tension entre phases côté réseau}}{\text{tension entre phases commutantes côté valves}} = \frac{U_L}{U_{v0}} = 1$$

Pour différentes valeurs de ce rapport de tensions, le courant côté ligne est approximativement:

$$I_L = I'_L \times \frac{U_{v0}}{U_L}$$

NOTE - Pour les montages 14 et 15, le facteur de courant côté ligne dépend de l'angle de retard (de commande) α de la manière suivante:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{3};$$

$$\frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,816$$

$$\frac{\pi}{3} < \alpha < \pi;$$

$$\frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

1.5.3 Facteur de courant côté valves du transformateur

Le quotient de la valeur efficace I'_v du courant côté valves dans une borne de transformateur, au courant continu I_d est donné dans le tableau 1, colonne 9.

NOTE - Pour les montages 14 et 15, le facteur de courant côté ligne dépend de l'angle de retard de la manière suivante:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{3};$$

$$\frac{I'_v}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,816$$

$$\frac{\pi}{3} < \alpha < \pi;$$

$$\frac{I'_v}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

1.5.4 Variation de tension

Le tableau 1, colonne 12, donne le rapport:

$$\frac{d_{xtN}}{e_{xN}}$$

de la variation de tension d_{xtN} à la charge assignée, due à la réactance de commutation, exprimée en fonction de U_{di} , à la composante inductive e_{xN} de la tension de court-circuit du transformateur au courant assigné I_{1LN} pour l'équipement complet, exprimée en fonction de la tension c.a. assignée U_{LN} , les secondaires étant court-circuités comme indiqué colonne 17.

1.5.2 Line side transformer current factor

The quotient of the r.m.s. value I'_L of the current on the line side and the direct current I_d is indicated in table 1, column 8, on the assumption of smooth direct current, rectangular waveshape of the alternating currents and on the following voltage ratio for single or double-way connections:

$$\frac{\text{phase-to-phase voltage on line side}}{\text{voltage between two commutating phases on valve side}} = \frac{U_L}{U_{v0}} = 1$$

For different values of the voltage ratio, the line side current is approximately:

$$I_L = I'_L \times \frac{U_{v0}}{U_L}$$

NOTE - For connections 14 and 15, the line side current factor depends on the delay angle α as follows:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{3};$$

$$\frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,816$$

$$\frac{\pi}{3} < \alpha < \pi;$$

$$\frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

1.5.3 Valve-side transformer current factor

The quotient of the r.m.s. value I'_v of the valve-side current in each terminal of the transformer and the direct current I_d is indicated in table 1, column 9.

NOTE - For connections 14 and 15, the valve-side current factor depends on the delay angle α as follows:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{3};$$

$$\frac{I'_v}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,816$$

$$\frac{\pi}{3} < \alpha < \pi;$$

$$\frac{I'_v}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

1.5.4 Voltage regulation

Table 1, column 12, gives the ratio:

$$\frac{d_{xtN}}{e_{xN}}$$

between the direct voltage regulation d_{xtN} at rated load due to the transformer commutating reactance, expressed as per unit of U_{di} and the inductive component e_{xN} of the transformer impedance voltage at rated line current I_{1LN} for the whole equipment, expressed as per unit of the rated alternating voltage U_{LN} , the secondaries being short-circuited according to column 17.

La variation inductive de tension continue d_{xtN} ne peut être calculée en connaissant e_{xN} d'un transformateur triphasé que pour les montages dont l'indice de commutation est $q = 3$.

Pour tous les autres montages avec transformateur triphasé, le rapport entre d_{xtN} et e_{xN} dépend du rapport des réactances primaires et secondaires du transformateur.

NOTES

1 On admet que l'angle d'empiétement (de commutation) u est inférieur à $2\pi/p$, p étant l'indice de pulsation. Voir 3.1.3.

2 Pour les montages 9, 12 et 13, les valeurs indiquées en colonne 12 supposent que e_{xN} est défini pour le courant de ligne de l'équipement complet. Si chaque transformateur est essayé séparément avec son courant assigné, (0,816 I_{dN} et 1,632 I_{dN} respectivement) les valeurs de la colonne 12 deviennent 0,5.

1.5.5 Circuit magnétique

Les circuits magnétiques correspondant aux montages alimentés en courant triphasé du tableau 1 sont supposés avoir trois colonnes.

1.5.6 Facteur de pertes

Le tableau 1, colonne 16, donne la relation entre les pertes dans le fonctionnement en convertisseur et dans l'essai en court-circuit, au courant assigné I_{LN} pour l'équipement complet et suivant les colonnes 13, 14 et 15.

La validité de ce facteur est limitée suivant le 4.1 de la CEI 146-1-3.

1.6 Montages parallèle et série

1.6.1 Montage de valves en parallèle et en série

Lorsque les valves sont montées en série ou en parallèle, des précautions sont à prendre pour assurer le fonctionnement des éléments dans les limites assignées de courant et de tension.

1.6.1.1 Equilibrage de courant entre valves montées en parallèle

Une répartition inégale du courant peut être causée par des différences entre tensions directes ou chutes de tensions à l'état passant et par des différences de temps de passage à l'état conducteur et d'angles de retard (de commande). La différence d'impédance entre voies parallèles peut avoir une influence considérable.

Si pour l'équilibrage des courants, un appairage est effectué en usine des tensions directes ou chutes de tension à l'état passant, et des temps de passage à l'état conducteur des valves, il y a lieu que ce fait soit déclaré par le fournisseur de l'équipement.

The inductive direct voltage regulation d_{x1N} can be calculated from the knowledge of e_{xN} of a three-phase transformer only for connections with a commutating number $q = 3$.

For all other connections with a three-phase transformer, the ratio between d_{x1N} and e_{xN} depends on the proportions of primary and secondary reactances in the transformer.

NOTES

1 It is assumed that the angle of overlap u is less than $2\pi/p$, p being the pulse number. See 3.1.3.

2 For connection numbers 9, 12 and 13 the figures in column 12 assume that e_{xN} is defined for the line current of the whole equipment. If each transformer is tested separately with its rated line current ($0,816 I_{dN}$ and $1,632 I_{dN}$ respectively), the value of column 12 should read 0,5.

1.5.5 Magnetic circuit

The magnetic circuits corresponding to the connections supplied with three-phase currents in table 1 are assumed to have three legs.

1.5.6 Power loss factor

Table 1, column 16, gives the relationship between power losses in convertor operation and in the short-circuit test at rated line current I_{1LN} for the whole equipment and according to columns 13, 14 and 15.

The validity of this factor is restricted according to 4.1 of IEC 146-1-3.

1.6 Parallel and series connections

1.6.1 Parallel or series connection of valve devices

When diodes or thyristors are connected in series or parallel, precautions should be taken to ensure that all devices operate within rated values for voltage and current.

1.6.1.1 Current balancing of parallel connected valve devices

Unequal current distribution may be caused by differences in forward voltage or on-state voltage drop and by differences in thyristor turn-on time and delay angles. Differences in the impedances of the parallel arms are also of considerable influence.

If factory matching of forward or on-state characteristics and turn-on time properties of the valve devices is used for current balancing, this should be stated by the equipment supplier.

Tableau 1 - Montages et facteurs de calcul

N° de montage	Couplage de transformateur		Couplage des valves	p	q	r	Facteur de courant côté réseau	Facteur de courant côté réseau	$\frac{U_{a1}}{U_{a0}}$	$\frac{U_M}{U_n}$	$\frac{d_{XIN}}{e_{XN}}$	Bornes à court-circuiter pour l'essai de mesure des pertes du transformateur			Perles totales dans les enroulements en fonctionnement en convertisseur	Bornes à court-circuiter pour l'essai de mesure des pertes du transformateur
	Côté réseau	Côté valves										A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Convertisseur simple, montage à une voie																
1				2	2	2	0,5	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0,45	3,14	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0-1	0-2		0,5(PA+PB)	1-2
2				3	3	3	0,471	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	0,675	2,09	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1-2-3			PA+1/3PB	1-2-3
3				6	6	6	0,816	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1,35	2,09	1,5	1-3-5	2-4-6		0,75(PA+PB)	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6
4				6	6	6	0,816	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1,35	2,09	1,5	1-2	2-3	4-5	(PA+2PB+3PC)/6	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6
5				6	3	3/2	0,408	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	0,575	2,42	0,5	1-3-5	2-4-6		0,5(PA+PB)	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6
6				6	2	2/3	0,272	$\frac{1}{3\sqrt{3}}$	0,45	3,14	0,75	1-3-5	2-4-6		1,125(PA+PB)/2	1-4 2-5 3-6
Convertisseur simple, montage homogène à deux voies																
7				2	2	8	1	1	0,9	1,57	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1-2			PA	1-2
8				6	3	6	0,816	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1,35	1,05	0,5	1-2-3			PA	1-2-3
9				12	3	3	0,769	$\frac{1}{2\sqrt{3}}$	1,35	1,05	0,26	1-3-5	2-4-6		0,035(PA+PB) + 0,93 PC	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6

NOTES
1 Voir 146-1-2, 1.7.2 et 1.8.1.4.
2 Concerne le primaire du transformateur.
3 Concerne le secondaire du transformateur.

r2 = résistance de l'un des trois enroulements de cellule.

Table 1 - Connections and calculation factors

Con- nec- tion No.	Transformer connection		Valve connection	p	q	$\frac{\delta r_s}{g}$	Line side current factor 2)	Valve side current factor 3)	$\frac{U_{L1}}{U_{10}}$	$\frac{U_{L2}}{U_{10}}$	$\frac{d_{L1}}{d_{L2}}$	Terminals to be short-circuited at transformer loss test			Total losses in windings in converter operation	Terminals to be short-circuited for
	Line side	Valve side										A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Single converter, single-way connections																
1				2	2	2	0.5	$\frac{0.707}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)}$	$\frac{0.45}{\left(\frac{\sqrt{2}}{n}\right)}$	$\frac{3.14}{(n)}$	$\frac{0.707}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)}$	0-1	0-2		$0.5(P_A + P_B)$	1-2
2				3	3	3		$\frac{0.577}{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)}$	$\frac{0.675}{\left(\frac{3}{n\sqrt{2}}\right)}$	$\frac{2.09}{\left(\frac{2n}{3}\right)}$	$\frac{0.866}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)}$	1-2-3			$P_A + \frac{1}{2}P_B$	1-2-3
3				6	6	6		$\frac{0.408}{\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)}$	$\frac{1.35}{\left(\frac{3\sqrt{2}}{n}\right)}$	$\frac{2.09}{\left(\frac{2n}{3}\right)}$	$\frac{1.5}{\frac{10}{0.5}}$	1-3-5	2-4-6		$0.75(P_A + P_B)$	Average of 1-3-5 and 2-4-6
4				6	6	6		$\frac{0.408}{\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)}$	$\frac{1.35}{\left(\frac{3\sqrt{2}}{n}\right)}$	$\frac{2.09}{\left(\frac{2n}{3}\right)}$	$\frac{1.5}{\frac{10}{0.5}}$	1-2-3-4-5-6	2-3-4-5-6-1		$(P_A + 2P_B + 3P_C)/6$	Average of 1-3-5 and 2-4-6
5				6	3	3/2		$\frac{0.289}{\left(\frac{1}{2\sqrt{3}}\right)}$	$\frac{0.675}{\left(\frac{3}{n\sqrt{2}}\right)}$	$\frac{2.42}{\left(\frac{4n}{3\sqrt{3}}\right)}$	$\frac{0.5}{\frac{10}{0.5}}$	1-3-5	2-4-6		$0.5(P_A + P_B)$	Average of 1-3-5 and 2-4-6
6				6	2	2/3		$\frac{0.236}{\left(\frac{1}{3\sqrt{2}}\right)}$	$\frac{0.45}{\left(\frac{\sqrt{2}}{n}\right)}$	$\frac{3.14}{(n)}$	$\frac{0.75}{\frac{10}{0.5}}$	1-3-5-1-II-III	2-4-6-1-II-III		$1.125(P_A + P_B)/2$	1-4-2-5-3-6
Single converter, uniform double-way connection																
7				2	2	8	1	1	$\frac{0.9}{\left(\frac{2\sqrt{2}}{n}\right)}$	$\frac{1.57}{\left(\frac{n}{2}\right)}$	$\frac{0.707}{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)}$	1-2			P_A	1-2
8				6	3	6	$\frac{0.816}{\left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)}$	$\frac{0.816}{\left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)}$	$\frac{1.35}{\left(\frac{3\sqrt{2}}{n}\right)}$	$\frac{1.05}{\left(\frac{n}{3}\right)}$	0.5	1-2-3			P_A	1-2-3
9				12	3	3	$\frac{0.789}{\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)}$	$\frac{0.408}{\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)}$	$\frac{1.35}{\left(\frac{3\sqrt{2}}{n}\right)}$	$\frac{1.05}{\left(\frac{n}{3}\right)}$	0.26	1-3-5	2-4-6	1-3-5-2-4-6	$0.035(P_A + P_B) + 0.93P_C$	Average of 1-3-5 and 2-4-6

NOTES
 1 Refer to 146-1-2, 1.7.2 and 1.8.1.4.
 2 Refer to transformer primary.
 3 Refer to transformer secondary.

r_2 = resistance of one cell winding

Tableau 1 - Montages et facteurs de calcul (suite)

N° de montage	Couplage de transformateur		Couplage des valves	p	q	$\frac{5qs}{q}$ 1)	Facteur de cou- rant côté réseau 2)	I_1/I_4	Facteur de cou- rant côté réseau valves 3)	$\frac{U_{11}}{U_{10}}$	$\frac{U_{11}}{U_{10}}$	$\frac{U_{11}}{U_{10}}$	Bornes à court-circuiter pour l'essai de mesure des pertes du transformateur			Pertes totales dans les enroulements en fonc- tionnement en conver- tisseur	Bornes à court- circuitier pour essayer
	Côté réseau	Côté valves											A	B	C		
1		2	3	5	6	7	8	9		10	11	12	13	14	15	16	17
10	Identique à 9, mais avec deux transformateurs séparés		Identique à 9	12	3	3	0,789 $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	0,408 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$		1,35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1,05 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	0,52			1-3-5 2-4-6	1,07 PC	1-3-5 2-4-6
11				12	3	3	0,789 $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	0,408 $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$		1,35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1,05 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	0,26	Moyenne de 1-3-5 et 2-4-6	2-3 4-5 6-1	1-2 3-4 5-6	1,34 PA, 0,08 PB -0,27 PC	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6
12				12	3	12	1,577 $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}}\right)$	0,816 $\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)$		2,7 $\left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi}\right)$	0,524 $\left(\frac{\pi}{6}\right)$	0,26	1-3-5	2-4-6		0,035(PA+PB) + 0,036 PC	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6
13	Identique à 12, mais avec deux transformateurs séparés		Identique à 12	12	3	12	1,577 $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}}\right)$	0,816 $\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)$		2,7 $\left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi}\right)$	0,524 $\left(\frac{\pi}{6}\right)$	0,52			1-3-5 2-4-6	1,07 PC	1-3-5 2-4-6
Convertisseurs simples, montages hétérogènes à double voie																	
14				2	2		$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$		0,9 $\left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1,51 $\left(\frac{\pi}{2}\right)$	0,707 4)	1-2			PA	1-2
15				6	3		Voir 1.5.2	Voir 1.5.3		1,35 $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	1,05 $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	0,5	1-2-3			PA	1-2-3
Montages à convertisseurs doubles																	
16				Voir montage N° 5													
17				Voir montage N° 5													
18				Voir montage N° 8													
19				Voir montage N° 8													

NOTES
1 Voir 146-1-2, 1.7.2 et 1.8.1.4.
2 Concerne le primaire du transformateur.
3 Concerne le secondaire du transformateur.
4 $\alpha < 1$; $0,707(1/\sqrt{2})$; $\alpha < 0,5$; $0,354(1/\sqrt{2})$; $\cos \alpha = 1 - X_1 I_1 / \sqrt{2} U_{10}$

Table 1 - Connections and calculation factors (continued)

Con- nec- tion No.	Transformer connection		Valve connection	p	q	$\frac{\delta U_s}{U_n}$	Line side current factor 2)	Valve side current factor 3)	$\frac{U_{a1}}{U_{n0}}$	$\frac{U_{M1}}{U_n}$	$\frac{d_{M1}}{d_{n1}}$	Terminals to be short-circuited at transformer loss test			Total losses in windings in converter operation	Terminals to be short-circuited for
	Line side	Valve side										A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
10	Same as 9, but with two different transformers		Same as 9	12	3	3	$0,789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0,408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1,35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1,05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0,52			1-3-5 2-4-6	1,07 PC	1-3-5 2-4-6
11				12	3	3	$0,789 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right)$	$0,408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1,35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1,05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0,26	Average of 1-3-5 and 2-4-6	2-3 4-5 6-1	1-2 3-4 5-6	$1,34 P_A+0,08 P_B-0,27 P_C$	Average of 1-3-5 and 2-4-6
12			Same as 12	12	3	12	$1,577 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$	$0,846 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$2,7 \left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$0,524 \left(\frac{\pi}{6} \right)$	0,26	1-3-5	2-4-6		$0,035(P_A+P_B)+0,03 P_C$	Average of 1-3-5 and 2-4-6
13	Same as 12 but with two separate transformers			12	3	12	$1,577 \left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$	$0,846 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$2,7 \left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$0,524 \left(\frac{\pi}{6} \right)$	0,52			1-3-5 2-4-6	1,07 PC	1-3-5 2-4-6
Single converter, non-uniform double-way connections																
14				2	2	-	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$0,8 \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1,57 \left(\frac{\pi}{2} \right)$	$0,707 4) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	1-2			P_A	1-2
15				6	3	-	See 1.5.2	See 1.5.3	$1,35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$1,05 \left(\frac{\pi}{3} \right)$	0,5	1-2-3			P_A	1-2-3
Double converter connections																
16				See connection No. 5												
17				See connection No. 5												
18				See connection No. 8												
19				See connection No. 8												

NOTES

1. Refer to 146-1-2, 1.7.2 and 1.8.1.4.

2. Refer to transformer primary.

3. Refer to transformer secondary.

4. $\alpha = \arccos \left(\frac{0,707(1/\sqrt{2})}{1-\alpha} \right)$; $\alpha > \pi$; $0,354(1/2\sqrt{2})$; $\cos \alpha = 1-X \times 1/\sqrt{2} \times U_n$

1.6.1.2 Répartition de la tension entre valves montées en série

Une répartition inégale de la tension peut être causée par des différences de caractéristiques de conduction inverse et de fonctionnement à l'état bloqué, par des différences dans l'instant d'amorçage entre thyristors et par des différences de charge de recouvrement.

1.6.2 Montages en parallèle ou en série de blocs et d'équipements

1.6.2.1 Montage en parallèle

a) Unités fonctionnelles sans moyen de réglage

Dans le cas d'équipements prévus pour fonctionner en parallèle, il convient qu'aucune des unités fonctionnant en parallèle ne dépasse ses valeurs assignées lors de la marche à pleine charge assignée.

Si l'équipement doit fonctionner en parallèle avec d'autres sources ayant des caractéristiques différentes, il convient que les exigences de répartition de charge figurent à la spécification particulière.

b) Unités fonctionnelles pourvues de moyens de réglage

Pour de tels équipements, s'ils sont prévus pour un couplage en parallèle, il convient que les limites de déséquilibre soient précisées dans la spécification particulière.

1.6.2.2 Montage en série

Lorsque les blocs ou équipements sont prévus pour fonctionner en série, il y a lieu de prendre des précautions pour assurer le fonctionnement de chaque unité dans les limites de ses tensions assignées, même dans le cas où le côté alternatif est déconnecté et que le côté continu reste raccordé à une charge active.

Dans le cas de montage en série, la tension par rapport à la terre peut être beaucoup plus élevée que la tension entre bornes. Dans ce cas, il y a lieu que l'isolation soit prévue et essayée en conséquence.

1.7 Facteur de puissance

1.7.1 Généralités

Pour les convertisseurs ayant un indice de pulsation égal ou supérieur à 6, le facteur de puissance total est d'un intérêt limité en pratique. La valeur utile pour les applications normales est le facteur de déphasage $\cos \varphi_1$ de l'onde fondamentale.

Le facteur de déphasage $\cos \varphi_1$ se rapporte au côté réseau du transformateur de convertisseur.

Pour cette raison, si une valeur doit être garantie, elle devrait être égale, sauf spécification particulière, à la valeur du facteur de déphasage calculée dans l'hypothèse de tensions à la fois sinusoïdales et équilibrées.

1.6.1.2 Voltage division for series connected valve devices

Unequal voltage distribution may be caused by differences in reverse and off-state characteristics, differences in the turn-on instant for thyristors and differences in recovery charge.

1.6.2 Parallel or series connection of assemblies and equipment units

1.6.2.1 Parallel connection

a) Units not provided with means for voltage adjustment

In the case of equipment units designed for parallel connection, none of the parallel connected units should exceed its rating when operating at total rated output.

If the equipment is required to operate in parallel with other sources having dissimilar characteristics, the requirements for load-sharing should be specified separately.

b) Units provided with means for output voltage adjustment

For such equipment, when required to operate in parallel the requirements for load sharing should be specified separately.

1.6.2.2 Series connection

When assemblies or equipment units are designed for series connection, precaution should be taken to ensure that each unit operates within its limits of rated voltages, even if the a.c. side is disconnected and the d.c. side is still connected to an active load.

In the case of series connection, the voltage to ground may be considerably higher than the voltage between the terminals. In this case, the insulation should be designed and tested accordingly.

1.7 Power factor

1.7.1 General

For convertors with a pulse number of 6 or more, the total power factor is of limited interest. The value which is useful for normal purposes is the displacement factor $\cos \varphi_1$ of the fundamental wave.

The displacement factor $\cos \varphi_1$ is referred to the line side of the convertor transformer.

For this reason, if a guarantee is required, it should, unless otherwise specified, refer to the displacement factor calculated under the assumption of both symmetrical and sinusoidal voltage.

Il convient de déterminer le facteur de déphasage des convertisseurs homogènes triphasés à thyristors par le calcul d'après les mesures de réactance des constituants de l'équipement, suivant 1.7.4.

Pour les équipements monophasés de puissance assignée supérieure à 300 kW, pour les équipements triphasés non homogènes et pour les équipements de type série décalé, la méthode de détermination du facteur de déplacement est à préciser en spécification particulière.

Lorsqu'un équipement fonctionne en redresseur, il absorbe de la puissance active et de la puissance réactive du réseau à c.a.

Lorsqu'un convertisseur fonctionne en onduleur, il fournit de la puissance active au réseau, mais absorbe toujours de la puissance réactive.

NOTE - Pour nombre d'applications, par exemple de petits équipements à modulation de largeur d'impulsion (PWM), avec inductance c.c. faible ou nulle, l'ondulation influe beaucoup sur le facteur de puissance.

1.7.2 Symboles utilisés dans la détermination du facteur de déphasage

$\cos \phi_{1N}$	facteur de déphasage au courant continu assigné, avec angle de retard (de commande) nul
$\cos \phi_{1\alpha N}$	facteur de déphasage au courant continu assigné, avec angle de retard (de commande) α
d_{rN}	$= d_{rtN} + d_{rbN}$, variation résistive totale de tension continue à la charge assignée, rapportée à U_{di}
d_{xN}	$= d_{xtN} + d_{xbN}$, variation inductive totale de tension continue à la charge assignée rapportée à U_{di}
d_{rbN}, d_{xbN}	variation résistive (resp. inductive) de tension continue due à d'autres éléments du convertisseur, par exemple réactances d'anode réactance de ligne ou de transformateur, s'il en existe, au courant continu assigné, rapportée à U_{di}
d_{rtN}, d_{xtN}	variation résistive (resp. inductive) de tension continue due au transformateur du convertisseur, au courant continu assigné, rapportée à U_{di}
d_{LN}	variation inductive de tension continue due à l'impédance du réseau, au courant assigné I_{dN} , rapportée à U_{di} , la tension d'alimentation en amont étant maintenue à la valeur efficace assignée
E_{dN}	f.c.é.m. du moteur à c.c. à vitesse d'arbre et flux assignés
f_{1N}	fréquence de ligne assignée
I_{dN}	courant continu assigné
p	indice de pulsation
P_{LN}	$= U_{dN} \times I_{dN} + P_{rN}$, puissance active à la charge assignée côté ligne

The displacement factor for three-phase uniform thyristor connections should be determined by calculation from the measured reactances in accordance with 1.7.4.

For single-phase equipment exceeding 300 kW rated output, for equipment with non-uniform three-phase connections and for convertors with sequence control, the method of determining the displacement factor is to be specified separately.

When a convertor is operating in the rectifier mode, it is consuming active and reactive power from the a.c. system.

When a convertor is operating in the inverter mode, it is delivering active power into the a.c. system but still consuming reactive power from it.

NOTE - For many applications, i.e. small PWM (Pulse width modulated) drives with small or no d.c. reactor, the ripple influences very much the total power factor.

1.7.2 Symbols used in the determination of displacement factor

$\cos \varphi_{1N}$	displacement factor at rated direct current for zero delay angle
$\cos \varphi_{1\alpha N}$	displacement factor at rated direct current, for delay angle α
d_{rN}	$= d_{rtN} + d_{rbN}$, total resistive direct voltage regulation at rated load in per unit of U_{di}
d_{xN}	$= d_{xtN} + d_{xbN}$, total inductive direct voltage regulation at rated load in per unit of U_{di}
d_{rbN}, d_{xbN}	resistive (resp. inductive), direct voltage regulation due to other parts of the convertor, for example anode reactors, line side reactors and transformers etc., if any, at rated current, in per unit of U_{di}
d_{rtN}, d_{xtN}	resistive (resp. inductive), direct voltage regulation due to the convertor transformer at rated direct current, in per unit of U_{di}
d_{LN}	additional direct voltage regulation due to a.c. system impedance, expressed in per unit of U_{di} , at rated direct current I_{dN} , when the r.m.s. voltage on line side terminals is kept constant
E_{dN}	d.c. motor counter e.m.f. at rated shaft speed and rated flux
f_{1N}	rated line frequency
I_{dN}	rated direct current
p	pulse number
P_{LN}	$= U_{dN} \times I_{dN} + P_{rN}$, active power on line side at rated load

P_{rN}	pertes Joule du circuit résistant à la charge assignée
Q_{1LN}	puissance réactive côté ligne à la charge assignée, basée sur I_{1LN}
R_a	résistance du circuit d'induit
R_C	résistance du réseau d'alimentation
R_{SC}	rapport de court-circuit
S_{1LN}	$= U_{di} \times I_{dN} = U_{LN} \times I_{1LN} \times \sqrt{3}$ = puissance apparente côté réseau à la charge assignée, correspondant à la composante fondamentale I_{1LN} du courant de ligne
S_C	puissance de court-circuit de la source d'alimentation
S_{tN}	puissance apparente assignée du transformateur
u	angle d'empiétement (angle de commutation)
U_{di}	tension continue fictive à vide
U_{dN}	tension continue assignée
U_{drN}	variation résistive de tension continue à la charge assignée
U_{dpN}	tension continue fictive interne pour la charge assignée, y compris la variation résistive totale de tension continue
X_C	réactance du réseau d'alimentation
α	angle de retard de réglage de phase en mode redresseur
β	angle d'avance de réglage de phase en mode onduleur
γ	angle d'extinction de commutation en mode onduleur
φ_{1N}	angle de déphasage (de l'onde fondamentale) du courant de ligne (en négligeant le courant magnétisant du transformateur) pour le courant continu assigné
α	suffixe pour le mode redresseur avec l'angle de retard α
β	suffixe pour le mode onduleur avec l'angle d'avance β

P_{rN}	power losses in circuit resistance at rated load
Q_{1LN}	reactive power on line side at rated load, related to I_{1LN}
R_a	motor armature circuit resistance
R_C	system resistance of the supply source
R_{SC}	short-circuit ratio
S_{1LN}	$= U_{di} \times I_{dN} = U_{LN} \times I_{1LN} \times \sqrt{3}$ = apparent power on line side at rated load, based on the fundamental wave I_{1LN} of the line current
S_C	short-circuit power of the supply source
S_{tN}	transformer rated apparent power
u	overlap angle
U_{di}	ideal no-load direct voltage
U_{dN}	rated direct voltage
U_{drN}	resistive direct voltage regulation, at rated load
U_{dpN}	ideal internal direct voltage at rated load including the total resistive direct voltage regulation
X_C	system reactance of the supply source
α	angle of delay of phase control in rectifier operation
β	angle of advance of phase control in inverter operation
γ	extinction angle of commutation for inverter operation
φ_{1N}	displacement angle (of fundamental wave) of the line current at rated direct current (neglecting the transformer magnetizing current)
α	suffix for rectifier operation with the delay angle α
β	suffix for inverter operation with the angle of advance β

1.7.3 Diagramme du cercle pour l'approximation du facteur de déphasage $\cos \varphi_{1N}$ et de la puissance réactive Q_{1LN} pour convertisseur en modes redresseur et onduleur

Le facteur de déphasage approximatif $\cos \varphi_{1N}$ et la puissance réactive approximative Q_{1LN} d'un convertisseur peuvent être estimés par l'emploi du diagramme du cercle donné à la figure 1.

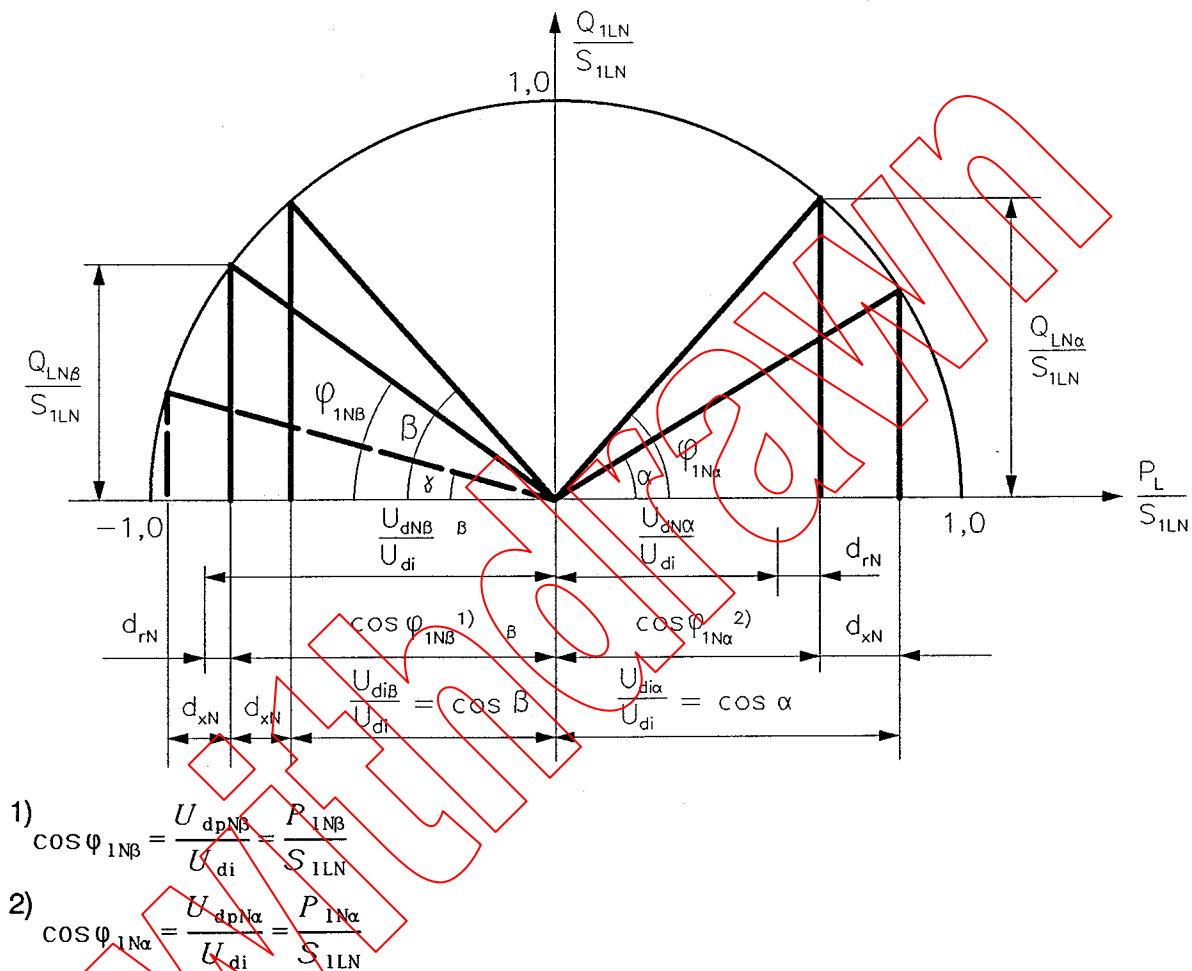


Figure 1 - Diagramme du cercle pour l'approximation du facteur de déphasage

1.7.4 Calcul du facteur de déphasage $\cos \varphi_1$

1.7.4.1 Facteur de déphasage $\cos \varphi_{1N}$, au courant continu assigné, pour un angle de retard nul

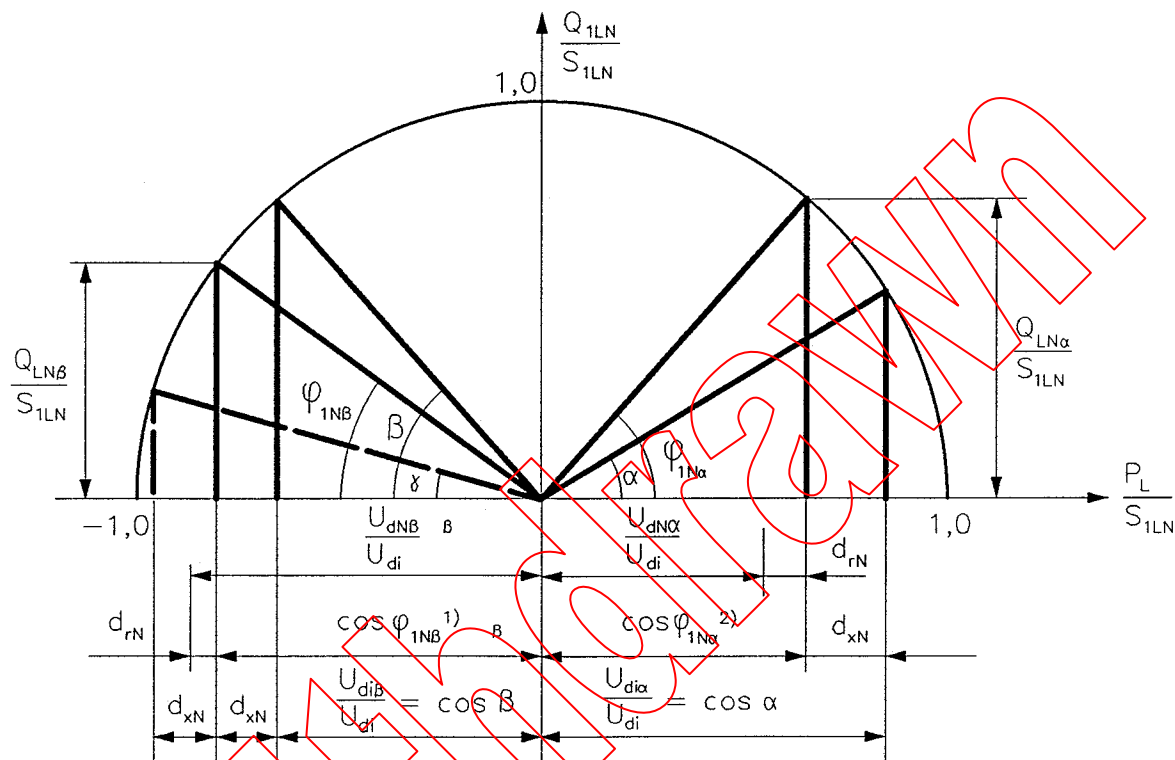
Ce facteur est obtenu pour la valeur appropriée de la réactance de source, à l'aide des figures 2 et 3. Sauf indication contraire, on admet que la valeur efficace de la tension d'alimentation aux bornes du convertisseur est maintenue constante.

La figure 2 est valable pour l'indice de pulsation 6.

La figure 3 est valable pour l'indice de pulsation 12.

1.7.3 Circle diagram for the approximation of the displacement factor $\cos \varphi_{1N}$ and of the reactive power Q_{1LN} for rectifier and inverter operation

The approximate displacement factor $\cos \varphi_{1N}$ and the approximate reactive power Q_{1LN} for a convertor may be estimated by use of the circle diagram given in figure 1.



$$1) \cos \varphi_{1N\beta} = \frac{U_{dpN\beta}}{U_{di}} = \frac{P_{1N\beta}}{S_{1LN}}$$

$$2) \cos \varphi_{1N\alpha} = \frac{U_{dpN\alpha}}{U_{di}} = \frac{P_{1N\alpha}}{S_{1LN}}$$

Figure 1 - Circle diagram for approximation of the displacement factor

1.7.4 Calculation of the displacement factor $\cos \varphi_1$

1.7.4.1 Displacement factor, at rated direct current, for zero delay angle $\cos \varphi_{1N}$

This is obtained, for the appropriate value of a.c. system reactance, from figures 2 and 3, respectively. If not otherwise stated, it is assumed that the r.m.s. value of the line side terminal voltage is kept constant.

Figure 2 is used for 6-pulse connections.

Figure 3 is used for 12-pulse connections.

Les valeurs de α_p indiquées par la figure 3 sont celles du déphasage propre qui apparaît dans un montage à indice de pulsation $p = 12$ pour certaines conditions de fonctionnement, même sans retard d'amorçage. Pour les convertisseurs avec commande de phase, c'est l'angle de retard minimal correspondant aux conditions indiquées de fonctionnement.

1.7.4.2 Facteur de déphasage $\cos \varphi_{1\alpha N}$ au courant continu assigné pour un angle de retard α

S'il y a réglage de phase avec un angle de retard α , la valeur correspondante $\cos \varphi_{1\alpha N}$ peut être calculée par la formule suivante, qui est suffisamment précise en pratique:

$$\cos \varphi_{1\alpha N} = \cos \alpha - (1 - \cos \varphi_{1N})$$

Pour le mode onduleur, le facteur de déphasage peut être obtenu par la formule suivante:

$$\cos \varphi_{1\beta N} = \cos \beta + (1 - \cos \varphi_{1N})$$

Pour le mode onduleur, les abscisses des figures 2 et 3 représentent l'augmentation de tension à la charge assignée en fonction de U_{di} .

Pour les montages hétérogènes, la formule suivante est applicable:

$$\cos \varphi_{1\alpha N} = \cos(\alpha/2) - \frac{1 - \cos \varphi_{1N}}{\cos(\alpha/2)}$$

Pour la commande asymétrique, avec les angles α_1 et α_2 , respectivement, la formule suivante est applicable:

$$\cos \varphi_{1\alpha N} = \cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) - \frac{1 - \cos \varphi_{1N}}{\cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)}$$

1.7.4.3 Facteur de déphasage à une charge différente de la charge assignée, $\cos \varphi_{1\alpha}$

Si l'on utilise les courbes des figures 2 et 3 pour d'autres valeurs de la charge que la charge assignée, les valeurs réelles de I_d , d_{xt} , d_{xb} doivent être employées pour obtenir la valeur de $\cos \varphi_1$ correspondant au courant continu réel I_d .

C'est-à-dire qu'il y a lieu d'utiliser la valeur:

$$d_{xt} + d_{xb} = (d_{xtN} + d_{xbN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}}$$

pour obtenir $\cos \varphi_1$ à partir des figures 2 et 3 respectivement. Soit:

$$\cos \varphi_{1\alpha} = \cos \alpha - (1 - \cos \varphi_1)$$

The values of α_p indicated in figure 3 are those of the inherent delay angle which occurs in a 12-pulse connection in certain operating regions, even where no phase control is applied. For phase controlled convertors, they represent the minimum delay angles that can exist under the indicated conditions.

1.7.4.2 Displacement factor $\cos \varphi_{1\alpha N}$, at rated direct current, for delay angle α

If there is phase control with delay angle α , the corresponding value $\cos \varphi_{1\alpha N}$ may be calculated from the following formula, which is sufficiently accurate for practical purposes:

$$\cos \varphi_{1\alpha N} = \cos \alpha - (1 - \cos \varphi_{1N})$$

For the inverter range, the displacement factor may be obtained from the following formula:

$$\cos \varphi_{1\beta N} = \cos \beta + (1 - \cos \varphi_{1N})$$

For an inverter, the abscissa in figures 2 and 3 represents the inductive direct voltage increase at rated load in per unit of U_{di} .

For non-uniform connections, the following formula is applicable:

$$\cos \varphi_{1\alpha N} = \cos(\alpha/2) - \frac{1 - \cos \varphi_{1N}}{\cos(\alpha/2)}$$

For asymmetrical control, with delay angles α_1 and α_2 , respectively, the following formula is applicable:

$$\cos \varphi_{1\alpha N} = \cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) - \frac{1 - \cos \varphi_{1N}}{\cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)}$$

1.7.4.3 Displacement factor at loads other than rated load, $\cos \varphi_{1\alpha}$

When using the curves of figures 2 and 3 for other loads than the rated load, the actual values of I_d , d_{xt} , d_{xb} should be used to obtain the $\cos \varphi_1$ for the actual direct current I_d .

That is, the value:

$$d_{xt} + d_{xb} = (d_{xtN} + d_{xbN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}}$$

should be used to obtain $\cos \varphi_1$ from figures 2 and 3 respectively. Then:

$$\cos \varphi_{1\alpha} = \cos \alpha - (1 - \cos \varphi_1)$$

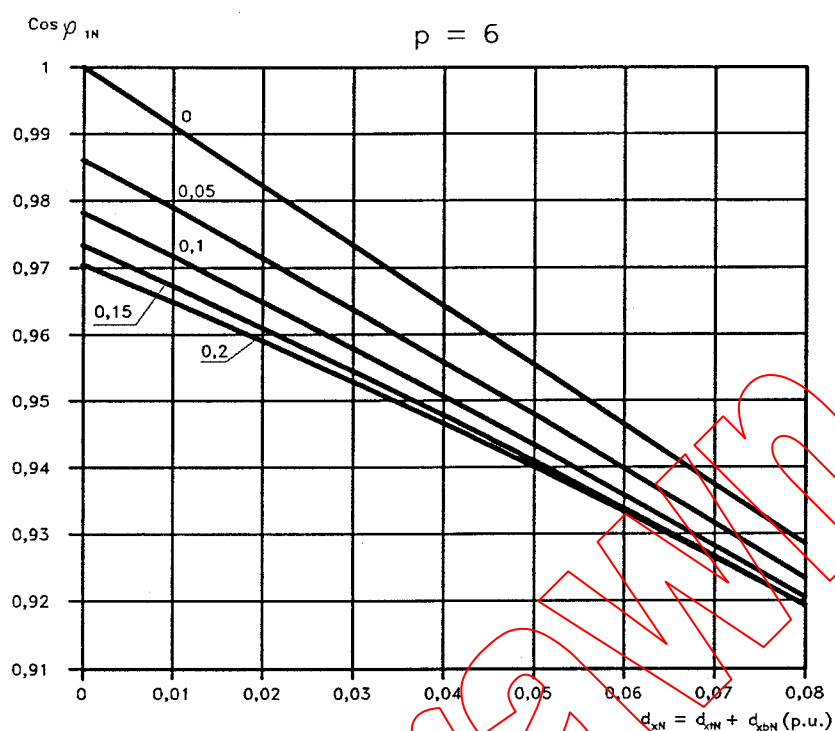


Figure 2 - Facteur de déphasage en fonction de d_{xN} pour $p = 6$

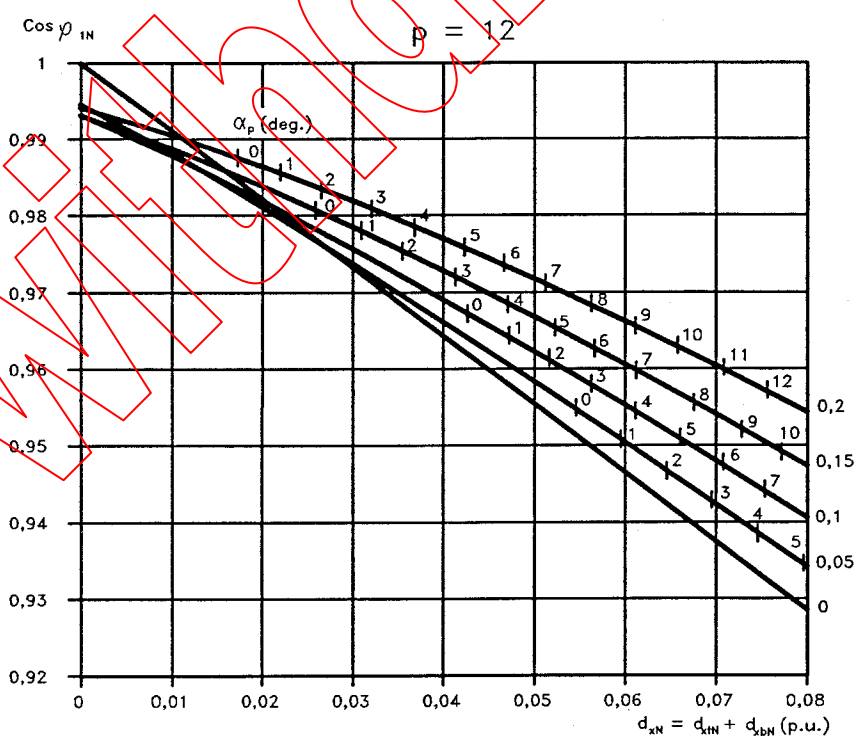
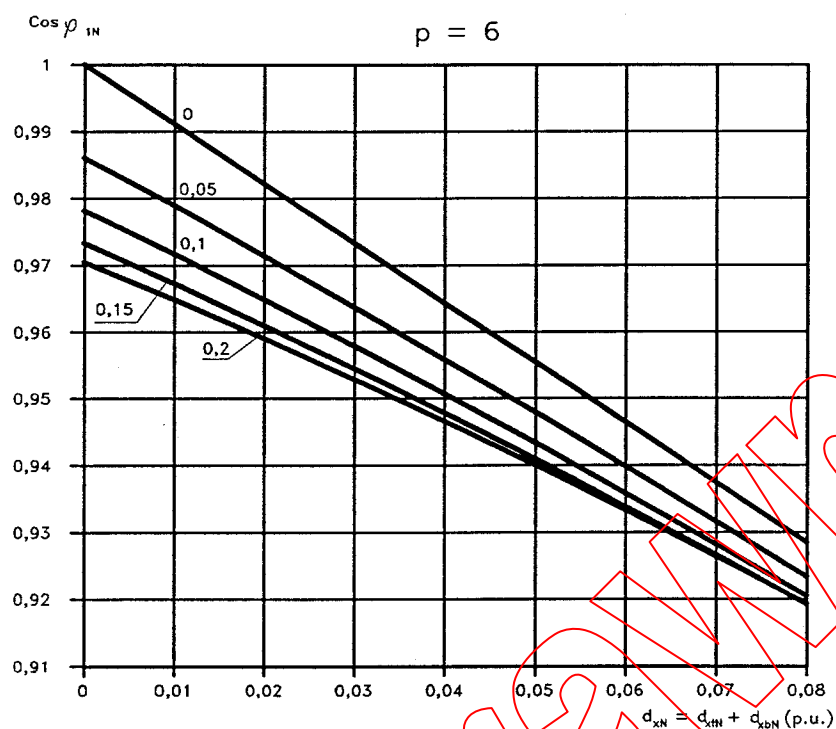
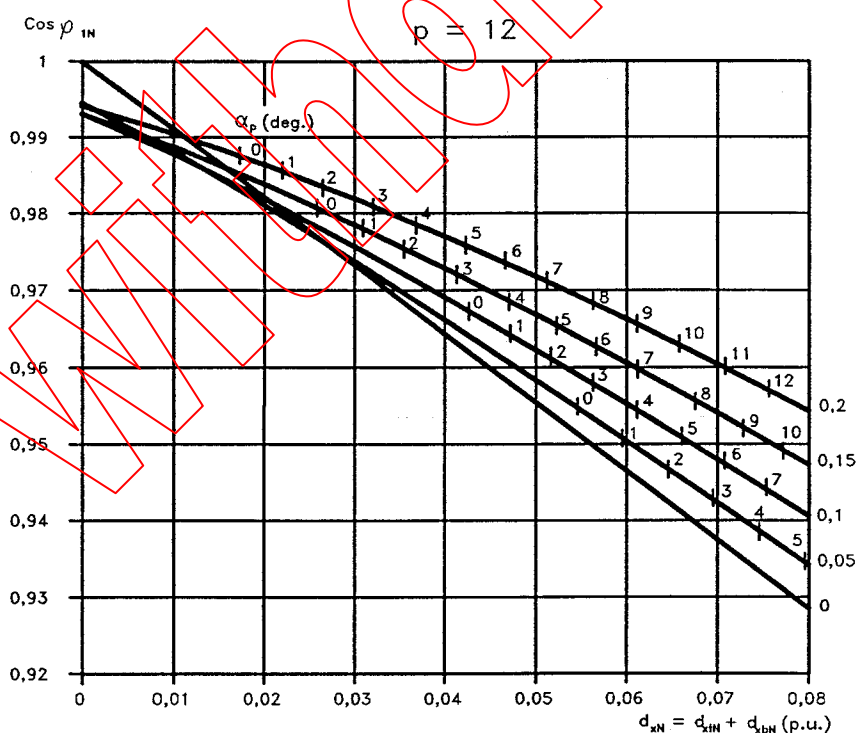


Figure 3 - Facteur de déphasage en fonction de d_{xN} pour $p = 12$

NOTE - Le paramètre des figures 2 et 3 est:

$$\frac{1}{R_{sc}} = \frac{S_{ILN}}{S_c} = \frac{U_{di} \times I_{dN}}{S_c}$$

Figure 2 - Displacement factor as a function of d_{xN} for $p = 6$ Figure 3 - Displacement factor as a function of d_{xN} for $p = 12$

NOTE - The parameter for figures 2 and 3 is:

$$\frac{1}{R_{sc}} = \frac{S_{1LN}}{S_c} = \frac{U_{di} \times I_{dN}}{S_c}$$

1.7.5 Facteur de conversion

Pour les convertisseurs ayant un indice de pulsation $p = 6$ ou plus, le facteur de conversion et le rendement sont presque égaux (voir 146-1-1, 1.5.24).

Le facteur de conversion est donné en plus du rendement, en particulier pour les convertisseurs de petite puissance, pour les convertisseurs avec indice de pulsation inférieur ou égal à 6 si l'utilisateur le demande dans les cas d'applications où la puissance des composantes alternatives de la tension et du courant ne sont pas considérées comme une contribution à la puissance utile.

Il y a lieu que le facteur de conversion soit toujours déterminé par la méthode entrée/sortie pour des conditions de charge spécifiées.

1.8 Variation de tension continue

La variation de tension continue d'un convertisseur unique raccordé à un réseau ne comportant pas de condensateurs de correction de facteur de puissance est principalement due:

- à la variation résistive de tension, c'est-à-dire à la variation de tension correspondant aux pertes dans le convertisseur,
- à la variation inductive de tension due aux commutations. Celles-ci modifient la forme d'onde de la tension aux bornes des blocs convertisseurs et modifient la tension continue qui est constituée à la base par des portions des tensions alternatives.
- à la variation de tension due à la résistance de la ligne et aux courants d'entrée non sinusoïdaux qui modifient également la forme d'onde de la tension alternative aux bornes du convertisseur.

La tension continue fictive à vide U_{di} peut alors être rapportée à la tension de la source infinie; la variation de tension continue englobe l'effet de toutes les impédances en série entre la source infinie et les bornes c.a. du convertisseur.

Cependant, le présent rapport suppose que la valeur efficace de la tension de ligne est constante aux bornes c.a. du convertisseur et non à la source infinie.

Par conséquent, la tension continue fictive à vide U_{di} est rapportée à la tension aux bornes du convertisseur et la variation de tension résulte de deux effets:

- la variation inhérente de tension continue, c'est-à-dire celle du convertisseur lui-même (voir 1.8.1 et 146-1-1, 1.5.28.1);
- la variation additionnelle de tension due à l'influence de l'impédance du réseau c.a. sur la forme d'onde aux bornes du convertisseur (voir 1.8.2).

Lorsqu'il existe des condensateurs de correction de facteur de puissance sur le réseau, le comportement en fréquence modifie la forme d'onde et la variation de tension.

1.7.5 Conversion factor

For convertors with a pulse number of 6 or more, the conversion factor and the power efficiency are almost equal (see IEC 146-1-1, 1.5.24).

The conversion factor should be given in addition to the power efficiency, especially for low power convertors, for convertors with pulse number of 6 or less if specified by the purchaser and in cases of applications where the power of the a.c. components of currents and voltages in the d.c. circuit is considered not to contribute to the useful power.

The conversion factor should always be determined by the input/output method for specified load conditions.

1.8 Direct voltage regulation

The voltage regulation of a single convertor connected to a system that does not include power factor correction capacitors is mainly due to:

- resistive voltage regulation, i.e. the voltage regulation consequential of power dissipation within the convertor;
- inductive voltage regulation due to commutation. Commutation distorts the voltage waveform at the terminals of semiconductor assemblies and change d.c. voltage that is basically made up of samples of the a.c. voltages;
- voltage regulation due to the impedance of the line and non-sinusoidal input currents of the convertor that also distort the voltage waveform at convertor terminals.

The ideal no-load direct voltage U_{di} could then be referred to the voltage of the infinite bus, i.e. voltage regulation should include the effect of all impedances existing between such infinite power source and the a.c. terminals of the convertor.

However this report assumes the r.m.s. line voltage to be constant at the a.c. terminals of the convertor, not at infinite power source.

Thus the ideal no-load direct voltage U_{di} should be referred to convertor terminal voltage and the voltage regulation results from two contributions:

- the inherent direct voltage regulation, i.e. the voltage regulation of the convertor itself (see 1.8.1 and IEC 146-1-1, 1.5.28.1);
- the additional direct voltage regulation due to the influence of a.c. system impedance on the waveform of convertor terminal voltage (see 1.8.2).

When power factor correction capacitors are included in the system the frequency behaviour influences the voltage waveform and the voltage regulation.

1.8.1 Variation inhérente de tension

La variation inhérente de tension est donnée par la somme de la variation de tension continue due au transformateur et aux autres parties de l'équipement convertisseur, telles que les réactances, etc., plus la variation, en fonction du courant, de la tension à l'état passant des thyristors et de la tension directe des diodes.

On admet que la tension alternative est constante aux bornes côté réseau du convertisseur.

Il y a lieu que la variation de tension soit rapportée à la tension correspondant à la prise normale du transformateur. Lorsqu'un convertisseur fonctionne en onduleur, la variation de tension s'ajoute à la tension de sortie et produit donc une augmentation de la tension continue.

La variation inhérente de tension est calculée d'après la réactance et les pertes des éléments de l'équipement. La variation de tension peut être déterminée par une mesure directe entrée/sortie dans un essai en charge, au choix du fournisseur.

Pour les équipements monophasés, pour les montages non homogènes et pour les convertisseurs à commande séquentielle, la méthode de détermination de la variation inhérente de tension est à spécifier.

1.8.1.1 Variation résistive de tension continue due au transformateur principal et au transformateur interphase

Cette variation est donnée par la formule:

$$U_{\text{drtN}} = \frac{\text{pertes dans les bobinages de transformateur au courant assigné}}{I_{\text{dN}}}$$

1.8.1.2 Variation résistive de tension continue due à d'autres éléments

Ces autres éléments sont par exemple des inductances de lissage, des réactances, des transducteurs, des répartiteurs de courant, des diodes, des thyristors, etc.

Cette variation est calculée par la formule:

$$U_{\text{drbN}} = \frac{\text{pertes dans les composants au courant assigné}}{I_{\text{dN}}}$$

1.8.1 *Inherent direct voltage regulation*

The inherent voltage regulation is given by the sum of the direct voltage regulation produced by the transformer and other parts of the converter equipment, such as reactors, etc., plus the change with current of on-state voltage for thyristors and forward voltage for diodes.

It is assumed that the alternating voltage at the line side terminals of the converter is constant.

The voltage regulation should refer to the principal tap of the transformer. When a thyristor converter operates in the inverter range, the voltage regulation is adding to and gives an increase of the direct voltage.

The inherent voltage regulation should be calculated from the reactances and power losses of the components of the equipment. The voltage regulation may be determined by direct measurement in an input/output load test on the equipment if so preferred by the supplier.

For single-phase equipment, for equipment with non-uniform thyristor connections and for converters with sequence control, the method of determining the inherent voltage regulation will be specified.

1.8.1.1 *Resistive direct voltage regulation due to main and interphase transformer*

This regulation is given by the formula:

$$U_{\text{drtN}} = \frac{\text{losses in transformer windings at rated current}}{I_{\text{dN}}}$$

1.8.1.2 *Resistive direct voltage regulation due to other components*

Examples of such components are series-smoothing reactors, line side reactors, transducers, current balancing means, diodes, thyristors etc.

This regulation is calculated from the formula:

$$U_{\text{drbN}} = \frac{\text{losses in the components at rated current}}{I_{\text{dN}}}$$

1.8.1.3 Variation inductive de tension continue due au transformateur de convertisseur

Pour tous les montages, la variation inductive de tension peut être calculée d'après l'essai de mesure de la réactance de commutation du transformateur (voir 146-1-3) avec la formule:

$$U_{dxtn} = d_{xtn} \times U_{di}$$

NOTE - La formule n'est pas valable pour des commutations multiples. Pour les montages énumérés dans le tableau 1, la variation de tension peut aussi être calculée d'après le facteur: d_{xtn}/e_{xN} donné dans le tableau 1 et e_{xN} (voir 1.5.4). Dans ce cas:

$$U_{dxtn} = \left(\frac{d_{xtn}}{e_{xN}} \right) \times e_{xN} \times U_{di}$$

1.8.1.4 Variation inductive de tension continue due aux autres constituants

Par exemple les réactances côté ligne, les réactances de répartition de courant, etc.

Les symboles ci-après sont utilisés dans les formules:

d_{xbLN}	variation inductive de tension continue, à I_{dN} , due aux réactances côté ligne, en fonction de U_{di}
d_{xbvN}	variation inductive de tension continue, à I_{dN} , due aux réactances côté valves, en fonction de U_{di}
U_{dxbLN}	variation inductive de tension continue correspondant à d_{xbLN}
U_{dxbvN}	variation inductive de tension continue correspondant à d_{xbvN}
X_{bL}	réactance par phase côté ligne, des inductances, transformateur, etc.
X_{bv}	réactance par phase côté valves, des inductances, transformateur, etc.
I_{bN}	courant efficace dans les réactances correspondant à I_{dN} , calculé sur la base d'une forme d'onde rectangulaire
I_{dN}	courant continu assigné
U_{bN}	tension efficace entre phases aux bornes côté ligne des réactances, etc.
g	nombre de groupes commutants se partageant le courant I_{dN}
p	indice de pulsation
q	indice de commutation
s	nombre de groupes commutants en série
δ	nombre de groupes commutant simultanément par réactance

1.8.1.3 Inductive direct voltage regulation due to the convertor transformer

For all connections, the inductive voltage regulation can be calculated from the transformer commutating reactance test (see IEC 146-1-3) using the formula:

$$U_{dxtn} = d_{xtn} \times U_{di}$$

NOTE - The formula is not valid for multiple commutation. For connections listed in table 1, the voltage regulation can also be calculated from the factor: d_{xtn}/e_{xN} given in table 1 and e_{xN} (see 1.5.4). In such case:

$$U_{dxtn} = \left(\frac{d_{xtn}}{e_{xN}} \right) \times e_{xN} \times U_{di}$$

1.8.1.4 Inductive direct voltage regulation due to other components

For example line side reactors, current balancing reactors, etc.

The following symbols are used in the calculation formulae:

d_{xbLN}	inductive direct voltage regulation at I_{dN} due to line side reactors in per unit of U_{di}
d_{xbvN}	inductive direct voltage regulation at I_{dN} due to valve side reactors in per unit of U_{di}
U_{dxbLN}	inductive direct voltage regulation, corresponding to d_{xbLN}
U_{dxbvN}	inductive direct voltage regulation, corresponding to d_{xbvN}
X_{bL}	reactance per phase on line side of reactor, transformer etc.
X_{bv}	reactance per phase on valve side of reactor, transformer etc.
I_{bN}	r.m.s. current in reactor, corresponding to I_{dN} , calculated on the basis of rectangular current waveform
I_{dN}	rated direct current
U_{bN}	rated phase-to-phase voltage at the line side terminals of the reactor etc.
g	number of commutating groups between which I_{dN} is divided
p	pulse number
q	commutation number
s	number of commutating groups in series
δ	number of commutating groups commutating simultaneously per reactor

a) Pour les réactances, transformateurs, etc., côté réseau:

En triphasé:

$$d_{xbLN} = \frac{\sqrt{3} \times I_{bN} \times X_{bL}}{U_{bN}} \sin\left(\frac{\pi}{\rho}\right) \quad \text{et} \quad U_{dxbLN} = \frac{\sqrt{3} \times I_{bN} \times U_{di} \times X_{bL}}{U_{bN}} \sin\left(\frac{\pi}{\rho}\right)$$

En monophasé:

$$d_{xbLN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{bN} \times X_{bL}}{U_{bN}} \quad \text{et} \quad U_{dxbLN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{bN} \times X_{bL} \times U_{di}}{U_{bN}}$$

b) Pour les réactances côté valves:

$$d_{xbvN} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times \frac{I_{bN} \times X_{bv}}{U_{di}} \quad \text{et} \quad U_{dxbvN} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times I_{bN} \times X_{bv}$$

La variation inductive de tension continue due aux autres composants est:

$$U_{dxbN} = U_{dxbLN} + U_{dxbvN}$$

1.8.1.5 Variation inhérente de tension continue du convertisseur

La variation de tension continue pour le courant assigné due au transformateur principal et au transformateur interphase (s'il y a lieu), est donnée par:

$$U_{dtN} = U_{drtN} + U_{dxtN}$$

La variation de tension continue pour le courant assigné due aux autres constituants du convertisseur est donnée par:

$$U_{dbN} = U_{drbN} + U_{dxbN}$$

La variation totale de tension continue au courant assigné est donnée par:

$$U_{dtN} + U_{dbN} = U_{drtN} + U_{dxtN} + U_{drbN} + U_{dxbN}$$

1.8.2 Variation de tension continue due à l'impédance du réseau c.a.

1.8.2.1 Influence de l'impédance du réseau c.a. sur la variation de tension continue du convertisseur

Même si la tension efficace aux bornes du convertisseur est maintenue constante, l'impédance du réseau c.a. provoque une variation additionnelle de tension continue aux bornes c.c. du convertisseur.

Ceci est une conséquence du changement dans la forme d'onde aux bornes du convertisseur du fait de la forme non sinusoïdale des courants absorbés par le convertisseur, qui influence la variation de tension.

a) For reactors, transformers etc., on the line side:

For three-phase systems:

$$d_{xbLN} = \frac{\sqrt{3} \times I_{bN} \times X_{bL}}{U_{bN}} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \quad \text{and} \quad U_{dxbLN} = \frac{\sqrt{3} \times I_{bN} \times U_{di} \times X_{bL}}{U_{bN}} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right)$$

For single-phase systems:

$$d_{xbLN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{bN} \times X_{bL}}{U_{bN}} \quad \text{and} \quad U_{dxbLN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{bN} \times X_{bL} \times U_{di}}{U_{bN}}$$

b) For valve side reactors:

$$d_{xbvN} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times \frac{I_{bN} \times X_{bv}}{U_{di}} \quad \text{and} \quad U_{dxbvN} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times I_{bN} \times X_{bv}$$

The inductive direct voltage regulation due to other components is:

$$U_{dxbN} = U_{dxbLN} + U_{dxbvN}$$

1.8.1.5 Inherent direct voltage regulation of the convertor

The direct voltage regulation at rated direct current due to main and interphase transformers (if any), is given by:

$$U_{dtN} = U_{drtN} + U_{dxtN}$$

The direct voltage regulation at rated direct current due to other components of the convertor, is given by:

$$U_{dbN} = U_{drbN} + U_{dxbN}$$

The inherent direct voltage regulation at rated direct current, is given by:

$$U_{dtN} + U_{dbN} = U_{drtN} + U_{dxtN} + U_{drbN} + U_{dxbN}$$

1.8.2 Direct voltage regulation due to a.c. system impedance

1.8.2.1 Influence of a.c. system impedance on d.c. voltage regulation of the convertor

Even if the convertor terminal voltage r.m.s. value is maintained constant, the a.c. system impedance causes an additional voltage regulation to appear on the d.c. terminals of the convertor.

This is a consequence of changes in waveform of convertor terminal voltages, due to non-sinusoidal currents drawn by the convertor, that influence the voltage regulation.

Cette influence dépend de l'indice de pulsation et du rapport (R_{SC}) de la puissance de court-circuit du réseau à la puissance apparente fondamentale du convertisseur.

1.8.2.2 Calcul de la variation additionnelle de tension U_{dLN} due à l'impédance du réseau c.a.

La figure 4 donne la variation additionnelle de tension d_{LN} en fonction de U_{di} , pour le courant continu assigné, due à l'impédance du réseau c.a. La variation correspondante de tension U_{dLN} est:

$$U_{dLN} = d_{LN} \times U_{di}$$

Sauf indication contraire on admet que la valeur efficace de la tension aux bornes côté ligne du convertisseur est maintenue constante.

En utilisant les courbes de la figure 4 pour d'autres valeurs de la charge que la charge assignée, les valeurs réelles de I_d , d_{xt} et d_{xb} doivent être prises pour obtenir la variation réelle de tension d_L , d'où la variation réelle de tension U_{dL} .

On prendra donc:

$$d_{xt} + d_{xb} = (d_{xtN} + d_{xbN}) \times \frac{I_d}{I_{dN}}$$

pour utiliser le diagramme de la figure 4.

1.8.2.3 Mesure de la variation additionnelle de tension due à l'impédance du réseau

Un voltmètre branché côté continu d'un convertisseur n'indique pas la variation inhérente de tension continue (voir 1.8.1), mais une valeur différente.

L'influence de l'impédance du réseau c.a. ne peut pas être mesurée directement au moyen d'un voltmètre indiquant la valeur efficace de la tension alternative lorsque le convertisseur est mis en charge.

La variation additionnelle de tension continue due à l'impédance du réseau peut être mesurée avec une approximation suffisante au moyen d'un circuit de mesure constitué par un redresseur auxiliaire raccordé aux bornes côté ligne du convertisseur, à travers un transformateur si nécessaire.

Ce redresseur auxiliaire doit avoir le même indice de commutation et le même indice de pulsation que le convertisseur et l'ondulation de sa tension continue doit avoir le même déphasage que l'ondulation du convertisseur par rapport à la tension alternative.

La variation relative de la tension de sortie du redresseur auxiliaire lors d'une variation de charge du convertisseur représente la variation relative de la tension continue du convertisseur due à l'impédance du réseau.