

DIN IEC/TR 60146-1-2

ICS 29.200

Ersatz für
DIN IEC/TR 60146-1-2
(DIN SPEC 48146-1-2):2012-03

**Halbleiter-Stromrichter –
Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter –
Teil 1-2: Anwendungsleitfaden
(IEC TR 60146-1-2:2019)**

Semiconductor converters –
General requirements and line commutated converters –
Part 1-2: Application guide
(IEC TR 60146-1-2:2019)

Convertisseurs à semiconducteurs –
Specifications communes et convertisseurs commutés par le réseau –
Partie 1-2: Guide d'application
(IEC TR 60146-1-2:2019)

Gesamtumfang 107 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	8
1 Anwendungsbereich.....	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
3.1 Begriffe in Bezug auf Stromrichterfehler	10
3.2 Begriffe in Bezug auf vom Stromrichter erzeugte Transienten	11
3.3 Begriffe in Bezug auf die Temperatur.....	11
4 Anwendung von Halbleiter-Stromrichtern.....	12
4.1 Anwendung.....	12
4.1.1 Allgemeines	12
4.1.2 Umrichteinrichtungen und -systeme.....	12
4.1.3 Konditionierung der Versorgungsquelle (Wirk- und Blindleistung).....	13
4.2 Betriebsmittelspezifische Daten	13
4.2.1 Hauptpunkte der Spezifikation	13
4.2.2 Anschlusskennzeichnungen.....	13
4.2.3 Weitere Angaben.....	13
4.2.4 Außergewöhnliche Betriebsbedingungen	15
4.3 Stromrichtertransformatoren und Drosselspulen	15
4.4 Berechnungsfaktoren	15
4.4.1 Allgemeines	15
4.4.2 Spannungsübersetzungsverhältnisse	20
4.4.3 Netzseitiger Stromfaktor des Transformators	20
4.4.4 Ventilseitiger Stromfaktor des Transformators.....	20
4.4.5 Induktive Gleichspannungsänderung durch den Transformator	21
4.4.6 Magnetischer Kreis.....	21
4.4.7 Garantierte Transformator-Lastverluste	21
4.4.8 Garantierte Transformator-Kurzschlussimpedanz	21
4.4.9 Netzseitiger Gundschwingungsstromfaktor.....	22
4.5 Parallel- und Reihenschaltungen	22
4.5.1 Parallel- oder Reihenschaltung von Ventilbauelementen	22
4.5.2 Parallel- oder Reihenschaltung von Stromrichtersätzen und Betriebsmitteleinheiten	22
4.6 Leistungsfaktor	23
4.6.1 Allgemeines	23
4.6.2 Bei der Bestimmung des Verschiebungsfaktors benutzte Symbole	23
4.6.3 Kreisdiagramm für die Näherung des Verschiebungsfaktors $\cos \varphi_{1N}$ und der Blindleistung Q_{1LN} für den Gleichrichter- und den Wechselrichterbetrieb.....	25
4.6.4 Berechnung des Verschiebungsfaktors $\cos \varphi_1$	26
4.6.5 Umrichtgrad	28
4.7 Gleichspannungsänderung	28

	Seite
4.7.1 Allgemeines.....	28
4.7.2 Innere Gleichspannungsänderung.....	28
4.7.3 Gleichspannungsänderung aufgrund der Impedanz des Wechselstromsystems.....	32
4.7.4 Über die Gleichspannungsänderung des Stromrichters zwischen Lieferant und Kunde auszutauschende Informationen.....	35
4.8 Spannungsgrenzen für eine zuverlässige Kommutierung im Wechselrichterbetrieb	36
4.9 Kurvenform der Wechselspannung.....	36
5 Anwendungsinformationen.....	37
5.1 Praktische Berechnung der Betriebsparameter	37
5.1.1 Allgemeines.....	37
5.1.2 Annahmen	38
5.1.3 Vorausgehende Berechnungen	38
5.1.4 Berechnung der Betriebsbedingungen	39
5.2 Spannungsänderung des Versorgungssystems aufgrund von Stromrichterlasten.....	41
5.2.1 Änderung der Grundschiwingung der Spannung	41
5.2.2 Mindestanforderungen für R_{1SC} für die Spannungsänderung	41
5.2.3 Übersetzungsverhältnis des Stromrichtertransformators.....	42
5.2.4 Transformatorbemessung	43
5.3 Kompensation der Blindleistungsaufnahme des Stromrichters	43
5.3.1 Mittlere Blindleistungsaufnahme	43
5.3.2 Notwendige Kompensation der mittleren Blindleistung	44
5.3.3 Spannungsschwankungen mit festgelegter Blindleistungskompensation	45
5.4 Verzerrung der Versorgungsspannung	45
5.4.1 Kommutierungseinbrüche	45
5.4.2 Betrieb mehrerer Stromrichter an derselben Versorgungsleitung	48
5.5 Netzseitige Größen	49
5.5.1 Effektivwert des Netzstromes	49
5.5.2 Netzseitige Oberschwingungen, Näherungsverfahren für Sechspuls-Stromrichter	49
5.5.3 Mindestanforderungen für R_{1SC} für die Oberschwingungsverzerrung.....	52
5.5.4 Geschätzte Phasenverschiebung der Oberschwingungsströme	53
5.5.5 Addition von Oberschwingungsströmen	53
5.5.6 Scheitelwert und Mittelwert des Oberschwingungsspektrums.....	54
5.5.7 Phasenverschiebung des Transformators	54
5.5.8 Zwei Sechspuls-Stromrichter mit Folgesteuerung	54
5.6 Kompensation von Leistungsfaktor und Oberschwingungsverzerrung.....	55
5.6.1 Allgemeines.....	55
5.6.2 Resonanzfrequenz	55
5.6.3 Direkt angeschlossene Kondensatorbatterie	55
5.6.4 Bestimmung der Resonanzfrequenz.....	55
5.6.5 Verstimmungsdrossel.....	57
5.6.6 Rundsteuerfrequenzen (Trägerfrequenzen)	58

	Seite
5.7	Oberschwingungsanteil der Gleichspannung..... 58
5.8	Weitere Betrachtungen..... 59
5.8.1	Zufälliger Ansteuerungswinkel 59
5.8.2	Instabilität durch Unterschwingungen 60
5.8.3	Oberschwingungsfilter 60
5.8.4	Angenäherte Kabelkapazität 60
5.9	Berechnung des Kurzschluss-Gleichstromes von Stromrichtern 60
5.10	Leitfaden für die Auswahl der Störfestigkeitsklasse 61
5.10.1	Allgemeines 61
5.10.2	Störfestigkeitsklasse des Stromrichters 61
5.10.3	Auswahl der Störfestigkeitsklasse 62
6	Prüfanforderungen..... 65
6.1	Leitfaden für die Bewertung der Verlustleistung durch Kurzschlussprüfung..... 65
6.1.1	Einphasenschaltungen 65
6.1.2	Mehrphasige Zweiwegschaltungen 65
6.1.3	Mehrphasige Einwegschaltungen 65
6.2	Bewertungsverfahren für Verlustleistungen durch das Kurzschlussverfahren..... 65
6.3	Prüfverfahren..... 66
6.3.1	Verfahren A ₁ 66
6.3.2	Verfahren B 67
6.3.3	Verfahren C 68
6.3.4	Verfahren D 68
6.3.5	Verfahren E 71
6.3.6	Verfahren A2 71
7	Leistungsanforderungen..... 71
7.1	Darstellung der Bemessungswerte des Spitzenlaststromes 71
7.2	Buchstabensymbole in Bezug auf die Ersatz-Sperrschichttemperatur 72
7.3	Bestimmung der Spitzenbelastbarkeit durch Berechnung der Ersatz-Sperrschichttemperatur..... 73
7.3.1	Allgemeines 73
7.3.2	Näherung der Form von an Halbleiterbauelemente angelegte Impulsleistungen 74
7.3.3	Überlagerungsmethode für die Berechnung der Temperatur 75
7.3.4	Berechnung der Ersatz-Sperrschichttemperatur bei Dauerlast 76
7.3.5	Berechnung der Ersatz-Sperrschichttemperatur bei zyklischen Lasten 77
7.3.6	Berechnung der Ersatz-Sperrschichttemperatur für einige typische Anwendungen 78
7.4	Betriebsbedingungen des Stromkreises, die die über den Ventilbauelementen des Stromrichters angelegte Spannung beeinflussen 78
8	Stromrichterbetrieb 79
8.1	Stabilisierung..... 79
8.2	Statische Eigenschaften..... 79
8.3	Dynamische Eigenschaften des Steuerungssystems 80
8.4	Betriebsart von Einzel- oder Doppelstromrichtern 80

	Seite
8.4.1 Einzelstromrichterschaltung	80
8.4.2 Doppelstromrichterschaltungen und Grenzwerte für den Gleichrichter- und den Wechselrichterbetrieb	82
8.5 Kritischer Strom.....	83
8.6 Unterdrückung des Gleichstromflusses in Doppelstromrichterschaltungen	84
8.6.1 Allgemeines.....	84
8.6.2 Begrenzung der Steuerwinkel.....	84
8.6.3 Gesteuerter Kreisstrom	84
8.6.4 Sperren des Ansteuerimpulses	84
8.7 Funktionsweise von Umkehrstromrichtern zur Steuerung von Gleichstrommotoren.....	85
8.7.1 Allgemeines.....	85
8.7.2 Feldumkehr des Motors	85
8.7.3 Umkehr des Motorankers durch einen Stromumkehrschalter	85
8.7.4 Doppelstromrichterschaltung am Motoranker	85
9 Stromrichterfehler.....	86
9.1 Allgemeines.....	86
9.2 Fehlersuche.....	87
9.3 Schutz gegen Fehlerströme	87
Anhang A (informativ) Informationen zu Normen über Stromrichtertransformatoren	88
A.1 Hintergrund.....	88
A.1.1 Allgemeines.....	88
A.1.2 Aufbau von IEC 61378 (alle Teile)	88
A.2 Entscheidender Unterschied zwischen IEC 61378 (alle Teile) und IEC 60146 (alle Teile).....	88
A.3 Abstimmung zwischen Transformator und Leistungs-Stromrichter	89
Anhang B (informativ) Anwendungsleitfaden für den Schutz von Halbleiter-Stromrichtern gegen Überstrom durch Sicherungen	90
B.1 Zweck.....	90
B.2 Sicherungsschaltungen im Stromrichter	90
B.2.1 Allgemeines.....	90
B.2.2 Zweiwegschaltung.....	91
B.2.2.1 Schaltung A1: Leitungssicherungen, nichtgeneratorische Last.....	91
B.2.2.2 Schaltung A2: Leitungssicherungen, generatorische Lasten.....	91
B.2.2.3 Schaltung A3: Zweigsicherungen, generatorische oder nichtgeneratorische Last.....	91
B.2.3 Einwegschaltung (B), generatorische oder nichtgeneratorische Last.....	92
B.3 Hauptparameter, die bei der Auswahl der Sicherungen zu berücksichtigen sind	92
B.4 Anstehende Spannung im Betrieb	93
B.5 Selektivität für Sicherungen in Parallelschaltung	93
B.5.1 Selektivität zwischen parallelgeschalteten Sicherungen und Leistungsschalter	93
B.5.2 Selektivität zwischen parallelgeschalteten Sicherungen	94
B.5.3 Schutz des Halbleiters gegen Überstrom	95
B.6 Allgemeine Betrachtungen	95
Anhang C (informativ) Induktive Spannungsänderung durch den Stromrichtertransformator	96

	Seite
C.1 Allgemeines	96
C.2 Empfehlung für die Berechnung der induktiven Spannungsänderung durch den Stromrichtertransformator.....	96
C.3 Induktive Gleichspannungsänderung	97
C.3.1 Ausgangsgleichspannung während der Kommutierung.....	97
C.3.2 Gleichspannungsänderung	97
C.3.3 Gleichung der induktiven Spannungsänderung durch den Stromrichtertransformator.....	98
C.4 Analyse des Verhältnisses (d_{xN}/e_{xN}).....	99
C.4.1 Allgemeines	99
C.4.2 Grundimpedanz des Stromrichtertransformators	99
C.4.3 Beziehung zwischen der Transformatorreaktanz X_t und dem Parameter e_{xN}	100
C.4.4 Ableitung des Verhältnisses (d_{xN}/e_{xN})	100
C.5 Implizite Annahmen, die im Verhältnis (d_{xN}/e_{xN}) umgesetzt wurden	100
C.6 Alte Berechnungsfaktoren zur Information	101
C.7 Induktive Spannungsänderung einschließlich der Systemreaktanzen.....	103
Literaturhinweise.....	107

Bilder

Bild 1 – Spannungen bei Stromrichterfehlern	10
Bild 2 – Kreisdiagramm für die Näherung des Verschiebungsfaktors	25
Bild 3 – Verschiebungsfaktor als Funktion von d_{xN} für $p = 6$	27
Bild 4 – Verschiebungsfaktor als Funktion von d_{xN} für $p = 12$	27
Bild 5 – d_{LN} als Funktion von d_{xN} für $p = 6$ und $p = 12$	34
Bild 6 – Kurvenform der Wechselfspannung	37
Bild 7 – Spektrum der Oberschwingungsströme auf der Wechselfspannungsseite für $p = 6$	51
Bild 8 – Einfluss von Kondensatorbemessung und Wechselstrommotorlasten auf die Resonanzfrequenz und den Verstärkungsfaktor	56
Bild 9 – Oberschwingungsanteil der Gleichspannung für $p = 6$	59
Bild 10 – Beispiel für die Energieverteilung	63
Bild 11 – Prüfverfahren A1	67
Bild 12 – Prüfverfahren D	69
Bild 13 – Einzelne Spitzenlast	72
Bild 14 – Periodische Spitzenlasten	72
Bild 15 – Näherung der Form von Leistungspulsen	75
Bild 16 – Berechnung der Ersatz-Sperrschichttemperatur bei Dauerlast.....	76
Bild 17 – Berechnung der Ersatz-Sperrschichttemperatur bei zyklischen Lasten.....	77
Bild 18 – Betriebsbedingungen des Stromkreises, die die über den Ventilbauelementen des Stromrichters angelegte Spannung beeinflussen	79
Bild 19 – Kurvenform der Gleichspannung für verschiedene Steuerwinkel	81
Bild 20 – Gleichspannung für verschiedene Lasten und Steuerwinkel	82
Bild 21 – Gleichspannungsgrenzen im Wechselrichterbetrieb	83
Bild 22 – Gleichspannung bei Werten unterhalb des kritischen Stromes.....	84

Bild 23 – Betriebsablauf von Stromrichtern in einem drehrichtungsumschaltbaren Gleichstrommotor	86
Bild B.1 – Dreiphasige Zweiwegschaltung mit Dioden oder Thyristoren mit wechselstromseitigen Sicherungen F_V für eine nichtgeneratorische Last	91
Bild B.2 – Dreiphasige Zweiwegschaltung mit wechselstromseitigen Sicherungen F_V und einer gleichstromseitigen Sicherung für eine generatorische Last	91
Bild B.3 – Dreiphasige Zweiwegschaltung mit Zweigsicherungen F_a für eine generatorische oder nichtgeneratorische Last	92
Bild B.4 – Dreiphasige Einwegschaltung mit Saugdrossel und Zweigsicherungen F_a für eine generatorische oder nichtgeneratorische Last	92
Bild B.5 – Lichtbogenspannung	93
Bild C.1 – Dreiphasige Brückenschaltung	97
Bild C.2 – Spannungsänderung	98

Tabellen

Tabelle 1 – Schaltungen und Berechnungsfaktoren	16
Tabelle 2 – Liste der bei der Bestimmung des Verschiebungsfaktors benutzten Symbole	24
Tabelle 3 – Liste der in der Berechnungsformel benutzten Symbole	31
Tabelle 4 – Beispiel für die Betriebsbedingungen	40
Tabelle 5 – Beispiel für Arbeitspunkte	41
Tabelle 6 – Beispiel für die Betriebsbedingungen	42
Tabelle 7 – Ergebnis der Iteration	43
Tabelle 8 – Beispiel für Berechnungsergebnisse der Wirk- und Blindleistungsaufnahme	44
Tabelle 9 – Beispiel für die Einbruchtiefe	47
Tabelle 10 – Beispiel für die Einbruchtiefe durch einen Stromrichter mit einem gemeinsamen Transformator	47
Tabelle 11 – Beispiel für die Einbruchtiefe durch zehn Stromrichter, die gleichzeitig arbeiten	48
Tabelle 12 – Werte für $I_L^*(\alpha, \mu)/I_L$	49
Tabelle 13 – Mindestanforderungen für R_{1SC} für Niederspannungssysteme	53
Tabelle 14 – Phasenverschiebung des Transformators und Ordnungszahlen der Oberschwingung	54
Tabelle 15 – Angenäherter kvar/km-Wert von Kabeln	60
Tabelle 16 – Kurzschlusswerte von Stromrichterströmen	61
Tabelle 17 – Rechenwerte für das Beispiel in Bild 10	64
Tabelle 18 – Buchstabensymbole in Bezug auf die Ersatz-Sperrschichttemperatur	72
Tabelle 19 – Ersatz-Sperrschichttemperatur	78
Tabelle C.1 – Spalten 12 bis 15 und 17 in IEC 60146-1-2:2011, Tabelle 1, oder in älteren Ausgaben	102

Nationales Vorwort

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 331 „Leistungselektronik“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Technische Reporte sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom IEC/TC 22 „Power electronic systems and equipment“ erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieses Dokuments bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu diesem Dokument angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees das Dokument

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Änderungen

Gegenüber DIN IEC/TR 60146-1-2 (DIN SPEC 48146-1-2):2012-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Hinzufügung von Anhängen zu Anwendungen von Stromrichtertransformatoren und Sicherungen für den Überstromschutz;
- b) Änderungen von Berechnungsverfahren für die induktive Spannungsänderung und Änderung der Beschreibung von Transformatorverlusten mit dem Ziel der Übereinstimmung mit den neuesten Transformatornormen;
- c) Hinzufügung und Aktualisierung der Verweisungen anhand der neuesten Informationen.

Frühere Ausgaben

DIN IEC/TR 60146-1-2 (DIN SPEC 48146-1-2): 2012-03

Halbleiter-Stromrichter – Allgemeine Anforderungen und netzgeführte Stromrichter – Teil 1-2: Anwendungsleitfaden

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60146, der ein Technischer Report (Fachbericht) ist, enthält einen Leitfaden für Abweichungen von den in IEC 60146-1-1:2009 angegebenen Spezifikationen, damit die Spezifikation in einer vorgegebenen Form für Sonderfälle erweitert werden kann. Darüber hinaus sind Hintergrundinformationen zu technischen Aspekten enthalten, die die Anwendung von IEC 60146-1-1:2009 erleichtern.

Dieses Dokument ist in erster Linie für netzgeführte Stromrichter anwendbar und stellt selbst keine Spezifikation dar, ausgenommen im Hinblick auf bestimmte Hilfskomponenten, für die vorhandene Normen möglicherweise nicht die notwendigen Daten zur Verfügung stellen.

Nach dem Konzept im IEC-Leitfaden 108 hat dieses Dokument keinen Vorrang vor einer produktspezifischen Norm. Der IEC-Leitfaden 108 enthält Informationen über den Zusammenhang zwischen horizontalen Normen und produktbezogenen Veröffentlichungen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050-551, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 551: Power electronics* (available at www.electropedia.org)

IEC 60050-551-20, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 551-20: Power electronics – Harmonic analysis* (available at www.electropedia.org)

IEC 60146-1-1:2009, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specification of basic requirements*

IEC 60269-1:2006, *Low-voltage fuses – Part 1: General requirements*

IEC 60269-4:2009, *Low-voltage fuses – Part 4: Supplementary requirements for fuse-links for the protection of semiconductor devices*

IEC 60529, *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*

IEC 60664-1, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests*

IEC 61148, *Terminal markings for valve device stacks and assemblies and for power conversion equipment*

IEC 61378-1:2011, *Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

IEC/IEEE 60076-57-129, *Power transformers – Part 57-129: Transformers for HVDC applications*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60146-1-1:2009, IEC 60050-551, IEC 60050-551-20 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

– IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

– ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

ANMERKUNG Einige Begriffe aus IEC 60146-1-1:2009, IEC 60050-551 und IEC 60050-551-20 werden hier aus Gründen der Zweckmäßigkeit wiederholt.

3.1 Begriffe in Bezug auf Stromrichterfehler

3.1.1

Durchzündung

Fehler durch Verlust der Sperrfähigkeit in Vorwärtsrichtung bei einem steuerbaren Ventilbauelement oder einem aus solchen bestehenden Ventilzweig während der Vorwärts-Sperrdauer

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1a). Eine Durchzündung kann im Gleichrichter- sowie im Wechselrichterbetrieb und aus verschiedenen Gründen wie z. B. einer zu hohen Sperrschichttemperatur, Spannungsschößen oberhalb der Spitzensperrspannung, einer zu hohen Anstiegssteilheit der Sperrspannung oder einem unerwünschten Zünd- oder Steuerstrom auftreten.

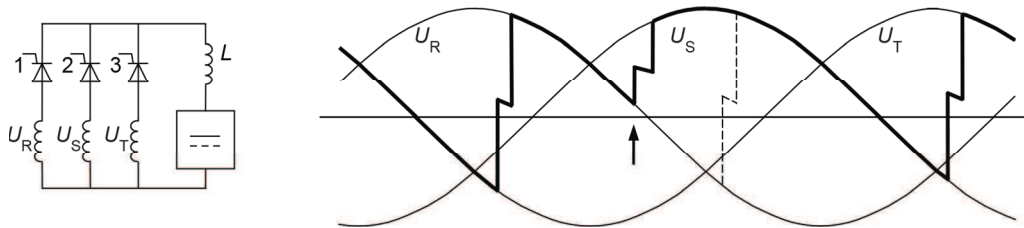


Bild 1a) Durchzündung im Zweig 2

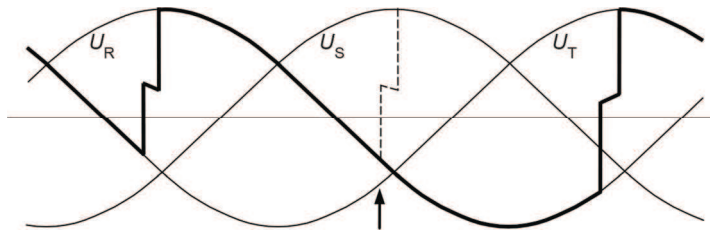


Bild 1b) Zündversager im Zweig 2

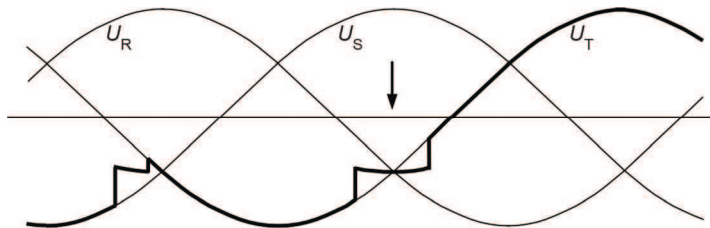


Bild 1c) Wechselrichterkippung bezogen auf Zweig 3

Bild 1 – Spannungen bei Stromrichterfehlern

[QUELLE: IEC 60050-551:1998, 551-16-60, modifiziert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde ergänzt.]

3.1.2

Falschzündung

Zündung eines einrastenden Ventilbauelementes oder eines aus solchen bestehenden Ventilzweiges zum falschen Zeitpunkt

[QUELLE: IEC 60050-551:1998, 551-16-63]

3.1.3

Durchbruch

<eines elektronischen Ventilbauelementes oder eines Ventilzweiges> Ausfall, durch den die Fähigkeit eines elektronischen Ventilbauelementes oder eines Ventilzweiges, Spannung zu sperren, auf Dauer verloren geht

[QUELLE: IEC 60050-551:1998, 551-16-66]

3.1.4**Zündversager**

Ausfall der Stromführung in einem einrastenden Ventilbauelement oder einem aus solchen bestehenden Ventilzweig während der Dauer, die bei ungestörtem Betrieb die Stromflussdauer ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1b).

[QUELLE: IEC 60050-551:1998, 551-16-65, modifiziert – Anmerkung 1 zum Begriff wurde ergänzt.]

3.1.5**Wechselrichterkipfung**

beim Wechselrichten auftretende Situation, in der ein Ventilzweig am Ende der üblichen Stromflussdauer oder Schonzeit weiterhin Strom führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1c).

[QUELLE: IEC 60050-551:1998, 551-16-64, modifiziert – Die Definition wurde umformuliert und Anmerkung 1 zum Begriff wurde ergänzt.]

3.1.6**Kommutierungsversager**

Ausfall der Kommutierung von einem stromführenden Zweig zum folgenden

[QUELLE: IEC 60050-551:1998, 551-16-59]

3.2 Begriffe in Bezug auf vom Stromrichter erzeugte Transienten**3.2.1****Transienten auf der Gleichspannungsseite**

Spannungstransienten, die durch schnelle Änderungen der an die Induktivität und die Kapazität des Gleichstromkreises angelegten Gleichspannung erzeugt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe 7.4.

3.2.2**Kommutierungstransienten im Netz**

auf der Wechsellspannungsseite nach der Kommutierung erzeugte Spannungstransienten

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe 7.4.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Kommutierungstransienten sind periodisch.

3.3 Begriffe in Bezug auf die Temperatur**3.3.1****Wärmewiderstand****thermischer Widerstand**

R_{th}

Quotient aus der Differenz zwischen der Ersatz-Sperrschichttemperatur und der Temperatur eines festgelegten äußeren Referenzpunktes durch die im Bauelement auftretende stationäre Verlustleistung unter Bedingungen eines thermischen Gleichgewichtes

Anmerkung 1 zum Begriff: In den meisten Fällen kann angenommen werden, dass die Verlustleistung gleich der Wärmeströmung ist.

3.3.2

transienter thermischer Widerstand

Z_{th}

Quotient aus

- a) der Änderung der Temperaturdifferenz zwischen der Ersatz-Sperrschichttemperatur und der Temperatur an einem festgelegten externen Referenzpunkt nach Ablauf eines Zeitintervalls und
- b) der sprungförmigen Änderung der Verlustleistung, welche die Temperaturänderung hervorruft, zum Beginn des Zeitintervalls

Anmerkung 1 zum Begriff: Unmittelbar vor dem Beginn dieses Zeitintervalls sollte die Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Zeit konstant sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der transiente thermische Widerstand wird als Funktion des Zeitintervalls angegeben.

3.3.3

Ersatz-Sperrschichttemperatur

T_j

Ersatztemperatur des Übergangs eines Halbleiterbauelementes

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ersatz-Sperrschichttemperatur ist nicht notwendigerweise die höchste Temperatur im Halbleiterbauelement.

Anmerkung 2 zum Begriff: Auf der Grundlage der Leistungsabgabe und des Wärmewiderstandes oder des transienten thermischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Betriebsart kann die Ersatz-Sperrschichttemperatur mit einer festgelegten Beziehung berechnet werden.

[QUELLE: IEC 60050-521:2002, 521-05-15, modifiziert – Das Symbol T_j sowie die Anmerkungen zum Begriff wurden ergänzt.]

3.3.4

Ersatztemperatur

<eines Halbleiterbauelementes> theoretischer Temperaturwert, der mit Hilfe einer vereinfachten Darstellung des thermischen und elektrischen Verhaltens des Halbleiterbauelementes berechnet werden kann

[QUELLE: IEC 60050-521:2002, 521-05-14, modifiziert – Die Anmerkungen zum Begriff wurden gestrichen.]

4 Anwendung von Halbleiter-Stromrichtern

4.1 Anwendung

4.1.1 Allgemeines

Halbleiter-Stromrichter werden in den meisten Industrie-Branchen für das Umrichten von elektrischer Leistung und außerdem für die Umwandlung mechanischer, chemischer oder anderer Energiearten in elektrische Energie und umgekehrt eingesetzt.

Darüber hinaus werden sie in Energieversorgungseinrichtungen zur Konditionierung der Versorgungsquelle benutzt.

4.1.2 Umrichteinrichtungen und -systeme

Zu den Anwendungsbeispielen für Umrichteinrichtungen und -systeme gehören folgende, die aber nicht darauf beschränkt sind:

- a) Gleichstromverbraucher, stabilisierte/einstellbare Spannungs-/Stromregelung;
- b) Wechselstromsteller (Wechselstrom- oder Gleichstromausgang);

- c) veränderliche Wechselstromfrequenz:
 - netzgeführte Stromrichter;
 - Schlupfenergieerückgewinnung;
 - maschinengeführte Stromrichter;
 - selbstgeführte Stromrichter;
 - Spannungseinprägung (Spannungsquelle);
 - Stromeinprägung (Stromquelle);
- d) Antriebe mit einstellbarer Drehzahl (werden in speziellen IEC-Normen wie IEC 61800-1 behandelt);
- e) unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV, werden in speziellen IEC-Normen wie IEC 62040-3 behandelt);
- f) chemische Prozesse (Elektrolyse, Galvanisieren, Elektrophorese);
- g) Stromversorgungen für Rechner;
- h) Bahnunterwerke, Eisenbahnen, Straßenbahnen, Grubenbahnen, Elektrofahrzeuge;
- i) Fernmeldestromversorgungen;
- j) Elektromagnete, Feldversorgungen;
- k) Gleichspannungsversorgungen für Radiosender;
- l) Gleichspannungsversorgungen für Lichtbogenöfen;
- m) Photovoltaik-Energieumwandlung.

4.1.3 Konditionierung der Versorgungsquelle (Wirk- und Blindleistung)

Zu Beispielen für die Konditionierung der Versorgungsquelle gehören folgende Einrichtungen, die aber nicht darauf beschränkt sind:

- a) Hochspannungs- oder Mittelspannungsnetze (Übertragung und Verteilung, Blindleistungskompensation);
- b) Niederspannungsnetze (Energieeinsparung);
- c) Stromerzeugungsanlagen im Inselbetrieb, Notstromanlagen oder verteilte Stromerzeugungsanlagen;
- d) Gleichspannungs- oder Wechselspannungsversorgungen speziell für Sonnen-, Wind- oder chemische Energie.

ANMERKUNG Einige der aufgeführten Anwendungen sind Thema spezieller bereits vorliegender oder in Vorbereitung befindlicher IEC-Publikationen.

4.2 Betriebsmittelspezifische Daten

4.2.1 Hauptpunkte der Spezifikation

Siehe IEC 60146-1-1:2009, 6.6.2, unter „Leistungsschild“.

4.2.2 Anschlusskennzeichnungen

IEC 61148 muss angewendet werden.

4.2.3 Weitere Angaben

4.2.3.1 Allgemeines

Zusätzlich zu den grundlegenden Daten, die nach den Festlegungen in IEC 60146-1-1:2009 auf dem Leistungsschild erscheinen sollten, kann mit der folgenden Liste verhindert werden, dass wichtige Informationen in Bezug auf die Kundenanforderungen oder das Produkt des Lieferanten in der Spezifikation nicht angegeben werden.

4.2.3.2 Versorgungsource

Die folgenden Informationen sind zur Beschreibung des Zustandes der Versorgungsource notwendig:

- a) Spannung und Frequenz (soweit anwendbar); Bereich der Bemessungswerte, Unsymmetrie, kurzzeitige Ausfälle;
- b) Kurzschlussleistung (oder Beschreibung der Kabel, Leitungen und Transformatoren); Mindestwerte, statistische Mittelwerte, Höchstwerte;
- c) weitere vorhandene Lasten (Motoren, Kondensatoren, Schmelzöfen usw.);
- d) Störgrenzen (Blindleistung, Stromüberschwingungen usw., allgemeingültig oder zulässig);
- e) Art der Erdung.

4.2.3.3 Spezifikation des Ausgangs

Die folgenden Informationen sind für die Auslegung der Stromrichterschaltung und von deren Steuerung notwendig:

- a) Ausgangsspannung und -frequenz (soweit anwendbar);
- b) geforderter Bereich der Änderung (stetig oder stufenweise);
- c) Fähigkeit zur Spannungs- und/oder Stromrichtungsumkehr (Betriebsquadrant(en));
- d) Grenzwerte der zulässigen Spannungs-/Strom-/Frequenzänderung;
- e) Lastart;
- f) Art der Erdung;
- g) Verzerrung der Wellenformen am Ausgang.

4.2.3.4 Spezifikation der Umgebung

Die folgenden Informationen sind für die Auslegung von Kühlung, Aufbau, Schaltschrank usw. des Stromrichters notwendig:

- a) gemäßigtes, tropisches, arktisches Klima;
- b) Temperatur, Luftfeuchte, Staubgehalt (falls nicht anders festgelegt, gilt IEC 60664-1, Verschmutzungsgrad 1);
- c) außergewöhnliche Betriebsbedingungen;
- d) Errichtung in Innenräumen/im Freien;
- e) Schutzart (nach IEC 60529);
- f) Einhaltung bestimmter Normen (IEC oder andere einschließlich Sicherheitsnormen).

4.2.3.5 Elektrische Betriebsbedingungen

Die folgenden Informationen können sich möglicherweise mit den bereits angegebenen decken, sollten aber zur Beschreibung der Einzelheiten angegeben werden.

- a) Kategorie des Versorgungssammelschiene:
 - dem Stromrichter zugeordnetes System (nur Stromrichter);
 - übergeordnetes System (umfasst Lasten mit Wechselstrommotor);
 - hochwertiges System (zur Versorgung von Lasten mit geringem Störfestigkeitspegel wie Rechner, medizinische Ausrüstung usw.).
- b) Störfestigkeitsklasse des Betriebsmittels: für einen oder mehrere Parameter darf eine andere Störfestigkeitsklasse gewählt werden.

4.2.4 Außergewöhnliche Betriebsbedingungen

4.2.4.1 Allgemeines

Für die normalen Betriebsbedingungen siehe IEC 60146-1-1:2009, 5.2.1. Im Fall von außergewöhnlichen Betriebsbedingungen sollte eine Sondervereinbarung nach IEC 60146-1-1:2009, 5.2.4, zwischen Kunde und Lieferant getroffen werden.

4.2.4.2 Temperaturunterschied des Kühlmittels

Für die Kühlmitteltemperatur ist zu beachten, dass der Temperaturbereich der normalen Betriebsbedingungen zwischen Stromrichter und Transformator unterschiedlich ist. Für die normalen Betriebsbedingungen des Stromrichtertransformators siehe IEC 61378-1:2011, 4.2.

4.2.4.3 Staub- und Feststoffgehalt

Für besondere Anwendungen darf der Verschmutzungsgrad nach IEC 60664-1 oder andere einschlägige IEC-Publikationen gesondert festgelegt werden, z. B. erfolgt die Festlegung von anderen Verschmutzungsclassen als Klasse 1 nach IEC 60664-1.

4.3 Stromrichtertransformatoren und Drosselspulen

IEC 61378-1 und IEC/IEEE 60076-57-129 müssen beachtet werden. IEC 61378-3 sollte beachtet werden.

4.4 Berechnungsfaktoren

4.4.1 Allgemeines

Tabelle 1 gibt Berechnungsfaktoren für die jeweilige Stromrichterschaltung an. Für Buchstabensymbole und Begriffe siehe IEC 60146-1-1:2009, 4.2, und 4.6.2 dieses Fachberichtes.

Tabelle 1 – Schaltungen und Berechnungsfaktoren (1 von 4)

Nr.	Transformator-schaltung		Stromrichterschaltung	p^a	q^a	Netz-seitiger Grund-schwin-gungs-strom-faktor ^{b,d} I'_{1L} / I_d	Netz-seitiger Strom-faktor ^b I'_L / I_d	Ventil-seitiger Strom-faktor ^c I_v / I_d	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	$\frac{U_{iM}}{U_{di}}$	$\frac{\delta qs}{g}$	Bei der Kurzschlussmessung kurzzuschließende Anschlüsse ^d			garan-tierte Trans-formator-Lastver-luste ^d	garan-tierte Trans-formator-Kurz-schluss-impe-danz ^d
	netz-seitig	ventilseitig										A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Einzelstromrichter, Einwegschaltungen																
1				2	2	—	0,5	$0,707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	$0,450 \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$3,14 \pi$	2		—	—	—	—
2				3	3	—	$0,471 \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)$	$0,577 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)$	$0,675 \left(\frac{3}{\pi\sqrt{2}} \right)$	$2,09 \left(\frac{2\pi}{3} \right)$	3		—	—	—	—
3				6	6	—	$0,816 \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right)$	$0,408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1,35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$2,09 \left(\frac{2\pi}{3} \right)$	6		—	—	—	—
4				6	6	—	$0,816 \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right)$	$0,408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$1,35 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$2,09 \left(\frac{2\pi}{3} \right)$	6		—	—	—	—
5				6	3	$\frac{\sqrt{3}}{\pi \times \sqrt{2}}$ ($\approx 0,390$)	$0,408 \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \right)$	$0,289 \left(\frac{1}{2\sqrt{3}} \right)$	$0,675 \left(\frac{3}{\pi\sqrt{2}} \right)$	$2,42 \left(\frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \right)$	3/2	1-3-5	2-4-6	—	$\frac{P_A + P_B}{2}$	e_{XA} und e_{XB}
6				6	2	—	$0,272 \left(\frac{1}{3\sqrt{3}} \right)$	$0,236 \left(\frac{1}{3\sqrt{2}} \right)$	$0,450 \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \right)$	$3,14 \pi$	2/3	—	—	—	—	—

Tabelle 1 (2 von 4)

Nr.	Transformator-schaltung		Stromrichterschaltung	p^a	q^a	Netz-seitiger Grund-schwin-gungs-strom-faktor ^{b,d} I'_{1L} / I_d	Netz-seitiger Strom-faktor ^b I'_L / I_d	Ventil-seitiger Strom-faktor ^c I_v / I_d	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	$\frac{U_{iM}}{U_{di}}$	$\frac{\delta qs}{g}$	Bei der Kurzschlussmessung kurzzuschließende Anschlüsse ^d			garan-tierte Trans-formator-Lastver-luste ^d	garan-tierte Trans-formator-Kurz-schluss-impe-danz ^d
	netz-seitig	ventilseitig										A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Einzelstromrichter, vollgesteuerte Zweiwegschaltungen																
7				2	2	—	1	1	$0,900$ $\left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$1,57$ $\left(\frac{\pi}{2}\right)$	4	—	—	—	—	—
8				6	3	$\frac{\sqrt{6}}{\pi}$ ($\approx 0,78$)	$0,816$ $\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)$	$0,816$ $\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)$	$1,35$ $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$1,05$ $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	6	1-3-5			P_A	e_{XA}
9				12	3	$\frac{\sqrt{6}}{\pi}$ ($\approx 0,78$)	$0,789$ $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	$0,408$ $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	$1,35$ $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$1,05$ $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	3	11-13-15	21-23-25	11-13-15 und 21-23-25	P_C	e_{XA} und e_{XB}
10	Wie 9 aber mit zwei verschiedenen Transformatoren		Wie 9	12	3	$\frac{\sqrt{6}}{\pi}$ ($\approx 0,78$)	$0,789$ $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	$0,408$ $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	$1,35$ $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$1,05$ $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	3	11-13-15	21-23-25		P_A+P_B	e_{XA} und e_{XB}
11				12	3	—	$0,789$ $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)$	$0,408$ $\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)$	$1,35$ $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$1,05$ $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	3	—	—	—	—	—

Tabelle 1 (3 von 4)

Nr .	Transformator- schaltung		Stromrichterschaltung	p^a	q_a	Netz- seitiger Grund- schwin- gungs- strom- faktor ^{b,d} I'_{1L} / I_d	Netz- seitiger Strom- faktor ^b I'_L / I_d	Ventil- seitiger Strom- faktor ^c I_v / I_d	$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	$\frac{U_{iM}}{U_{di}}$	$\frac{\delta qs}{g}$	Bei der Kurzschlussmessung kurzzuschließende Anschlüsse ^d			garan- tierte Trans- formator- Lastver- luste ^d	garan- tierte Trans- formator -Kurz- schluss- impe- danz ^d
	netz- seitig	ventilseitig										A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
12				12	3	$\frac{2 \times \sqrt{6}}{\pi}$ ($\approx 1,559$)	$1,577$ $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}}\right)$	$0,816$ $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$	$2,70$ $\left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$0,524$ $\left(\frac{\pi}{6}\right)$	12	11-13-15	21-23-25	11-13-15 und 21-23-25	P_C	e_{XA} und e_{XB}
13	Wie 12 aber mit zwei verschiedenen Transformatoren		Wie 12	12	3	$\frac{2 \times \sqrt{6}}{\pi}$ ($\approx 1,559$)	$1,577$ $\left(\frac{1+\sqrt{3}}{\sqrt{3}}\right)$	$0,816$ $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$	$2,70$ $\left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$0,524$ $\left(\frac{\pi}{6}\right)$	12	11-13-15	21-23-25		P_A+P_B	e_{XA} und e_{XB}
Einzelstromrichter, teilgesteuerte Zweiwegschaltungen																
14				2	2	—	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}$	$0,900$ $\left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$1,57$ $\left(\frac{\pi}{2}\right)$	—	—	—	—	—	—
15				6	3	—	Siehe 4.4.3	Siehe 4.4.4	$1,35$ $\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)$	$1,05$ $\left(\frac{\pi}{3}\right)$	—	—	—	—	—	—
Doppelstromrichterschaltungen																
16				Siehe Schaltung 5												
17				Siehe Schaltung 5												
18				Siehe Schaltung 8												

Tabelle 1 (4 von 4)

Nr .	Transformatorschaltung g		Stromrichterschaltung	p ^a	q _a	Netz- seitiger Grund- schwin- gungs- strom- faktor ^{b,d} I' _{1L} / I _d	Netz- seitiger Strom- faktor ^b I' _L / I _d	Ventil- seitiger Strom- faktor ^c I _v / I _d	U _{di} U _{v0}	U _{iM} U _{di}	δqs g	Bei der Kurzschlussmessung kurzzuschließende Anschlüsse ^d			garan- tierte Trans- formator- Lastver- luste ^d	garan- tierte Trans- formator- -Kurz- schluss- impe- danz ^d
	netz- seitig	ventilseitig										A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
19				Siehe Schaltung 8												

^a Siehe IEC 60146-1-1:2009, Tabelle 2.

^b Bezogen auf die Primärseite des Transformators mit dem Spannungsübersetzungsverhältnis 1.

^c Bezogen auf die Sekundärseite des Transformators.

^d IEC 61378-1:2011, Tabelle 1, enthält keine Informationen für die Zeilen 1 bis 4, 6, 7, 11, 14 und 15. Die Zellen, die keine entsprechenden Werte enthalten, werden dann mit einem Bindestrich „–“ gefüllt. Wenn die Werte benötigt werden, sind die Handbücher für die Stromrichtertheorie heranzuziehen. Einige Informationen können Anhang C entnommen werden.

4.4.2 Spannungsübersetzungsverhältnisse

Tabelle 1 gibt die folgenden Übersetzungsverhältnisse an:

Spalte 10	Spalte 11
$\frac{U_{di}}{U_{v0}}$	$\frac{U_{iM}}{U_{di}}$

Dabei ist

U_{di} die ideale Leerlauf-Gleichspannung;

U_{v0} die Leerlaufspannung der Ventilwicklung des Transformators;

U_{iM} die ideale Scheitel-Leerlaufspannung zwischen den Endanschlüssen eines Zweiges unter Vernachlässigung innerer und äußerer Spannungsabfälle in den Ventilen, im Leerlauf. Das Verhältnis bleibt bei einem Schwachlaststrom nahe dem kritischen Strom gleich.

ANMERKUNG Bei den Schaltungen 5, 11 und weiteren Schaltungen mit Saugdrosseln erhöht sich das Übersetzungsverhältnis U_{iM}/U_{di} im Leerlauf.

4.4.3 Netzseitiger Stromfaktor des Transformators

Tabelle 1, Spalte 8, gibt den Quotienten aus dem Effektivwert I'_L des netzseitigen Stromes und dem Gleichstrom I_d unter der Annahme eines geglätteten Gleichstromes, einer rechteckigen Kurvenform der Wechselströme und bei folgendem Spannungsübersetzungsverhältnis für Einweg- oder Zweiwegschaltungen an:

$$\frac{U_L}{U_{v0}} = 1$$

Dabei ist

U_L die netzseitige Außenleiterspannung;

U_{v0} die ventilseitige Spannung zwischen zwei kommutierenden Phasen.

Bei anderen Werten des Spannungsübersetzungsverhältnisses beträgt der netzseitige Strom etwa:

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

ANMERKUNG Bei den Schaltungen 14 und 15 hängt der netzseitige Stromfaktor wie folgt vom Steuerwinkel α ab:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{3}; \quad \frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,816$$

$$\frac{\pi}{3} < \alpha < \pi; \quad \frac{I'_L}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

4.4.4 Ventilseitiger Stromfaktor des Transformators

Tabelle 1, Spalte 9, gibt den Quotienten aus dem Effektivwert I_v des ventilseitigen Stromes in jedem Transformatoranschluss und dem Gleichstrom I_d an.

ANMERKUNG Bei den Schaltungen 14 und 15 hängt der ventileitige Stromfaktor wie folgt vom Steuerwinkel α ab:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{3}; \quad \frac{I_v}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,816$$

$$\frac{\pi}{3} < \alpha < \pi; \quad \frac{I_v}{I_d} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

4.4.5 Induktive Gleichspannungsänderung durch den Transformator

Tabelle 1, Spalte 12, gibt den folgenden Parameter an: $\frac{\delta q_s}{g}$

Mit dem Parameter wird die induktive Spannungsänderung durch den Stromrichtertransformator nach der Beschreibung in 4.7.2.4 berechnet.

ANMERKUNG Das Verhältnis (d_{xtN}/e_{xN}) in IEC 60146-1-2:2011 wurde gestrichen, weil dort Werte für die Transformatorimpedanz verwendet werden, die von den Normen für Stromrichtertransformatoren der Reihe IEC 61378 nicht unterstützt werden. Außerdem wird die praktische Anwendung als ungünstig angesehen, da das Verhältnis nur schwer nachzuvollziehen ist. Um die Komplexität zu zeigen, wird das Verhältnis in Anhang C nur zur Information analysiert.

4.4.6 Magnetischer Kreis

Für die magnetischen Kreise der mit Drehstrom gespeisten Schaltungen wird in Tabelle 1 angenommen, dass dreisickenklige Transformatoren verwendet werden.

4.4.7 Garantierte Transformator-Lastverluste

Die Symbole P_A , P_B und P_C in Spalte 16 geben die Verluste an, die in der jeweiligen Kurzschlusskombination A, B oder C in den Spalten 13, 14 bzw. 15 gemessen werden (siehe IEC 61378-1:2011, 7.5.1).

Die Inhalte von Tabelle 1, Spalten 13 bis 16, sind nur zur Information angegeben. Für Verluste des Stromrichtertransformators sollte auf IEC 61378 (alle Teile) Bezug genommen werden.

Nach IEC 61378-1:2011, 5.2 und 6.1, sind die garantierten Transformator-Lastverluste die Lastverluste, die mit dem Bemessungswert des Grundswingungsstroms bei den in Tabelle 1, Spalten 13 bis 15, angegebenen Kurzschlussbedingungen gemessen werden.

Der tatsächliche Lastverlust im Betrieb beinhaltet zusätzliche Verluste durch den nichtsinusförmigen Stromrichterstrom. Dieser Wert muss nach IEC 61378-1:2011, 6.2, berechnet werden. Nach IEC 61378-1:2011, 6.1, „wird er nicht garantiert, muss aber vom Transformatorhersteller dem Abnehmer zur Verfügung gestellt werden“.

4.4.8 Garantierte Transformator-Kurzschlussimpedanz

Die Symbole e_{xA} und e_{xB} in Spalte 17 geben die garantierte Transformator-Kurzschlussimpedanz an. e_{xA} ist die induktive Kurzschlussimpedanz, die bei der Kurzschlussmessung A in Spalte 13 ermittelt wird. e_{xB} ist die Kurzschlussimpedanz, die bei der Kurzschlussmessung B in Spalte 14 ermittelt wird. Aus diesen Werten kann die Kommutierungsreaktanz X_t ermittelt werden, die für die Berechnung der induktiven Spannungsänderung des Transformators mit der in 4.7.2.4 angegebenen Gleichung benutzt wird (siehe IEC 61378-1:2011, 7.2.1).

Die Inhalte von Tabelle 1, Spalten 13 bis 15 und 17, sind nur zur Information angegeben. Für die Kurzschlussimpedanz des Stromrichtertransformators sollte auf IEC 61378 (alle Teile) Bezug genommen werden.

4.4.9 Netzseitiger Gundschwingungsstromfaktor

Die Inhalte von Tabelle 1, Spalte 7, sind nur zur Information angegeben. Für den netzseitigen Grundschwingungsstromfaktor des Stromrichtertransformators sollte auf IEC 61378 (alle Teile) Bezug genommen werden.

ANMERKUNG Für den Vergleich dieses Faktors mit dem „netzseitigen Stromfaktor“ in Spalte 8 wird darauf hingewiesen, dass sich die Definitionen für den Bemessungsstrom zwischen IEC 60146 (alle Teile) und IEC 61378 (alle Teile) unterscheiden. Für nähere Erläuterungen wird auf Anhang A verwiesen.

4.5 Parallel- und Reihenschaltungen

4.5.1 Parallel- oder Reihenschaltung von Ventilbauelementen

4.5.1.1 Allgemeines

Wenn Dioden oder Thyristoren in Reihen- oder Parallelschaltung angeordnet sind, sollten Vorkehrungen getroffen werden, mit denen sichergestellt wird, dass alle Bauelemente mit ihren Bemessungswerten für Spannung und Strom betrieben werden.

4.5.1.2 Stromausgleich von Ventilbauelementen in Parallelschaltung

Unterschiede der Durchlassspannung oder des Spannungsabfalls im Durchlasszustand und Unterschiede der Einschaltzeit der Thyristoren und der Steuerwinkel können eine ungleichmäßige Stromverteilung verursachen. Außerdem üben Impedanzunterschiede der parallelen Zweige einen maßgeblichen Einfluss aus.

Falls mit dem Ziel der Stromsymmetrie eine Klasseneinteilung der Vorwärts- oder Durchlasskennlinie und der Eigenschaften der Einschaltzeit der Ventilbauelemente bei der Herstellung stattfindet, sollte dies vom Betriebsmittellieferant angegeben werden.

4.5.1.3 Spannungsteilung bei Ventilbauelementen in Reihenschaltung

Unterschiede der Rückwärts- und Sperrkennlinie, Unterschiede des Einschaltmomentes für Thyristoren und Unterschiede der Sperrverzögerungsladung können eine ungleichmäßige Spannungsverteilung verursachen.

4.5.2 Parallel- oder Reihenschaltung von Stromrichtersätzen und Betriebsmitteleinheiten

4.5.2.1 Allgemeines

Auch bei einer Reihen- oder Parallelschaltung von Stromrichtersätzen und Betriebsmitteleinheiten sollten Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden.

4.5.2.2 Parallelschaltung

Bei einer Parallelschaltung von Einheiten muss berücksichtigt werden, ob sie mit Mitteln zur Spannungseinstellung ausgerüstet sind oder nicht.

a) Einheiten ohne Mittel für die Spannungseinstellung

Falls Betriebsmitteleinheiten für eine Parallelschaltung vorgesehen sind, darf keine der parallel geschalteten Einheiten seine Bemessungswerte beim Betrieb mit Gesamtbemessungswert am Ausgang überschreiten.

Falls das Betriebsmittel in Parallelschaltung mit anderen Quellen, die andere Kennwerte besitzen, betrieben werden muss, sollten die Anforderungen an die Lastverteilung gesondert festgelegt werden.

b) Einheiten mit Mitteln für die Ausgangsspannungseinstellung

Wenn diese Betriebsmittel in Parallelschaltung betrieben werden müssen, sollten die Anforderungen an die Lastverteilung gesondert festgelegt werden.

4.5.2.3 Reihenschaltung

Falls Stromrichtersätze oder Betriebsmitteleinheiten für eine Reihenschaltung vorgesehen sind, sollten Maßnahmen ergriffen werden, die sicherstellen, dass jede Einheit innerhalb ihrer Grenzwerte der Bemessungsspannung betrieben wird, auch wenn die Wechselspannungsseite abgetrennt und die Gleichspannungsseite noch mit einer aktiven Last verbunden ist.

Bei einer Reihenschaltung darf die Spannung gegen Erde bedeutend höher sein als die Spannung zwischen den Anschlüssen. In diesem Fall sollte die Isolierung entsprechend ausgelegt und geprüft werden.

4.6 Leistungsfaktor

4.6.1 Allgemeines

Bei Stromrichtern mit einer Pulszahl von mindestens 6 ist der Gesamtleistungsfaktor nur von begrenztem Interesse. Der für normale Anwendungen zweckdienliche Wert ist der Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ der Grundwelle.

Der Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ bezieht sich auf die Netzseite des Stromrichtertransformators.

Aus diesem Grund und wenn eine Garantie notwendig ist, sollte auf den Verschiebungsfaktor Bezug genommen werden, der unter der Annahme sowohl einer symmetrischen als auch einer sinusförmigen Spannung berechnet wird, falls nichts anderes festgelegt ist.

Der Verschiebungsfaktor von vollgesteuerten dreiphasigen Thyristorschaltungen sollte durch eine Berechnung aus den gemessenen Reaktanzen nach 4.6.4 bestimmt werden.

Bei einphasigen Betriebsmitteln mit einer Bemessungsausgangsleistung von mehr als 300 kW, bei teilgesteuerten dreiphasigen Schaltungen und bei Stromrichtern mit Folgesteuerung muss das Verfahren für die Bestimmung des Verschiebungsfaktors gesondert festgelegt werden.

Wenn ein Stromrichter im Gleichrichterbetrieb arbeitet, verbraucht er Wirk- und Blindleistung aus dem Wechselstromsystem.

Wenn ein Stromrichter im Wechselrichterbetrieb arbeitet, liefert er Wirkleistung in das Wechselstromsystem, entnimmt ihm aber noch Blindleistung.

ANMERKUNG Bei vielen Anwendungen wie z. B. Gleichrichtern für kleine pulsbreitenmodulierte Antriebe mit kleinen Gleichstromdrosseln oder ohne Gleichstromdrossel wird der Gesamtleistungsfaktor sehr stark von der Welligkeit beeinflusst.

4.6.2 Bei der Bestimmung des Verschiebungsfaktors benutzte Symbole

Tabelle 2 gibt die bei der Bestimmung des Verschiebungsfaktors benutzten Buchstabensymbole an.

Tabelle 2 – Liste der bei der Bestimmung des Verschiebungsfaktors benutzten Symbole
(1 von 2)

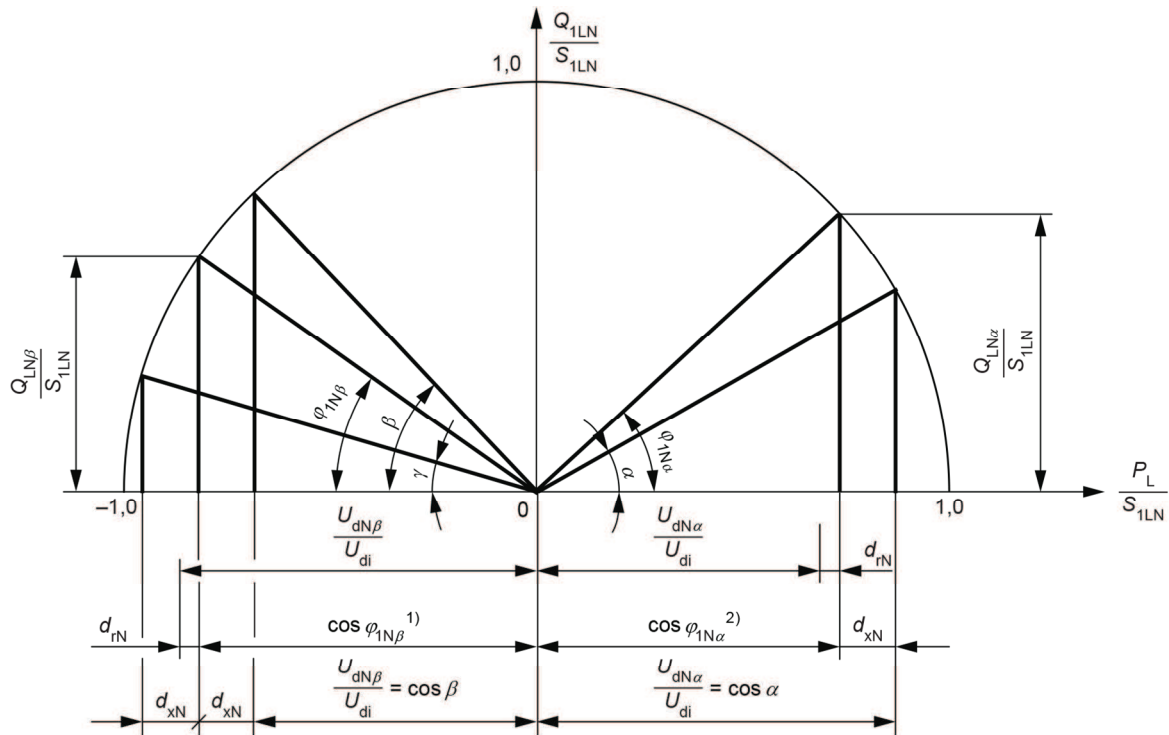
Symbol	Größe
$\cos \varphi_{1N}$	Verschiebungsfaktor bei Bemessungsgleichstrom für einen Steuerwinkel von Null
$\cos \varphi_{1N\alpha}$	Verschiebungsfaktor bei Bemessungsgleichstrom für einen Steuerwinkel α
d_{rN}	$= d_{rtN} + d_{rbN}$, gesamte ohmsche Gleichspannungsänderung bei Bemessungsstrom bezogen auf U_{di}
d_{xN}	$= d_{xtN} + d_{xbN}$, gesamte induktive Gleichspannungsänderung bei Bemessungsstrom bezogen auf U_{di}
d_{rbN}, d_{xbN}	ohmsche (bzw. induktive) Gleichspannungsänderung aufgrund anderer Komponenten des Stromrichters wie z. B. Ventildrosseln, netzseitigen Drosselspulen und Transformatoren usw., soweit vorhanden, bei Bemessungsgleichstrom bezogen auf U_{di}
d_{rtN}, d_{xtN}	ohmsche (bzw. induktive) Gleichspannungsänderung aufgrund des Stromrichtertransformators bei Bemessungsgleichstrom bezogen auf U_{di}
d_{LN}	zusätzliche Gleichspannungsänderung aufgrund der Impedanz des Wechselstromsystems, angegeben bezogen auf U_{di} bei Bemessungsgleichstrom I_{dN} , wenn der Effektivwert der Spannung an den netzseitigen Anschlüssen konstant gehalten wird
E_{dN}	gegenelektromotorische Kraft des Gleichstrommotors bei Bemessungsdrehzahl der Welle und Bemessungsfluss
f_{1N}	Bemessungsnetzfrequenz
I_{dN}	Bemessungsgleichstrom
I_{LN}	Effektivwert des Bemessungsstromes auf der Netzseite (des Stromrichters oder Transformators, falls vorhanden)
I_{1LN}	Effektivwert der Grundschiwingung von I_{LN}
p	Pulszahl
P_{LN}	$= U_{dN} \times I_{dN} + P_{rN}$, Wirkleistung auf der Netzseite bei Bemessungsgleichstrom
P_{rN}	Verlustleistungen im Stromkreiswiderstand bei Bemessungsgleichstrom
Q_{1LN}	Blindleistung auf der Netzseite bei Bemessungsgleichstrom bezogen auf I_{1LN}
R_a	Widerstand des Ankerkreises im Motor
R_C	Systemwiderstand der Versorgungsquelle
R_{1SC}	Kurzschlussverhältnis bezogen auf die Grundschiwingungsscheinleistung des Stromrichters
S_{1LN}	$= U_{di} \times I_{dN} = U_{LN} \times I_{1LN} \times \sqrt{3}$, Scheinleistung auf der Netzseite bei Bemessungslast bezogen auf die Grundschiwingung I_{1LN} des Netzstromes
S_C	Kurzschlussleistung der Versorgungsquelle
S_{tN}	Bemessungsscheinleistung des Transformators
μ	Überlappungswinkel
U_{di}	ideelle Leerlauf-Gleichspannung
U_{dN}	Bemessungsgleichspannung
U_{drN}	gesamte ohmsche Gleichspannungsänderung bei Bemessungsgleichstrom
U_{dxN}	gesamte induktive Gleichspannungsänderung bei Bemessungsgleichstrom
U_{dpN}	ideelle interne Gleichspannung bei Bemessungslast ohne die gesamte ohmsche Gleichspannungsänderung
X_C	Systemreaktanz der Versorgungsquelle
α	Steuerwinkel der Zündeinsatzsteuerung im Gleichrichterbetrieb
β	Steuerwinkel-Vorlauf der Zündeinsatzsteuerung im Wechselrichterbetrieb

Tabelle 2 – Liste der bei der Bestimmung des Verschiebungsfaktors benutzten Symbole
(2 von 2)

Symbol	Größe
γ	Löschwinkel der Kommutierung für den Wechselrichterbetrieb
φ_{1N}	Verschiebungswinkel (der Grundschiwingung) des Netzstromes bei Bemessungsgleichstrom (unter Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes des Transformators)
α	Index für den Gleichrichterbetrieb mit dem Steuerwinkel α
β	Index für den Wechselrichterbetrieb mit dem Steuerwinkel-Vorlauf β

4.6.3 Kreisdiagramm für die Näherung des Verschiebungsfaktors $\cos \varphi_{1N}$ und der Blindleistung Q_{1LN} für den Gleichrichter- und den Wechselrichterbetrieb

Der angenäherte Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_{1N}$ und die angenäherte Blindleistung Q_{1LN} für einen Stromrichter können mit dem in Bild 2 angegebenen Kreisdiagramm abgeschätzt werden.



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

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

Bild 2 – Kreisdiagramm für die Näherung des Verschiebungsfaktors

4.6.4 Berechnung des Verschiebungsfaktors $\cos\varphi_1$

4.6.4.1 Verschiebungsfaktor bei Bemessungsgleichstrom für einen Steuerwinkel $\cos\varphi_{1N}$ von Null

Dieser Faktor wird für den entsprechenden Wert der Reaktanz des Wechselstromsystems aus den Bildern 3 bzw. 4 ermittelt. Falls es nicht anders angegeben ist, wird angenommen, dass der Effektivwert der netzseitigen Klemmenspannung konstant gehalten wird.

Bild 3 wird für Sechspulsschaltungen angewendet.

Bild 4 wird für Zwölfpulsschaltungen angewendet.

Die in Bild 4 angegebenen Werte für α_p gelten für den systembedingten Steuerungswinkel, der bei einer Zwölfpulsschaltung in bestimmten Betriebsbereichen auftritt, selbst wenn keine Zündeinsatzsteuerung angewendet wird. Bei Stromrichtern mit Zündeinsatzsteuerung stellen sie die kleinsten Steuerwinkel dar, die unter den angegebenen Bedingungen bestehen können.

4.6.4.2 Verschiebungsfaktor $\cos\varphi_{1N\alpha}$ bei Bemessungsgleichstrom für einen Steuerwinkel α

Bei einer Zündeinsatzsteuerung mit einem Steuerwinkel α darf der entsprechende Wert $\cos\varphi_{1N\alpha}$ nach der folgenden Gleichung mit einer ausreichenden Genauigkeit für praktische Anwendungen berechnet werden:

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

Für Wechselrichterbereich darf der Verschiebungsfaktor nach der folgenden Gleichung berechnet werden:

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

Bei einem Wechselrichter stellt die Abszisse in den Bildern 3 und 4 den induktiven Gleichspannungsanstieg bei Bemessungslast bezogen auf U_{di} dar.

4.6.4.3 Verschiebungsfaktor $\cos\varphi_{1\alpha}$ bei anderen Lasten als Bemessungslast

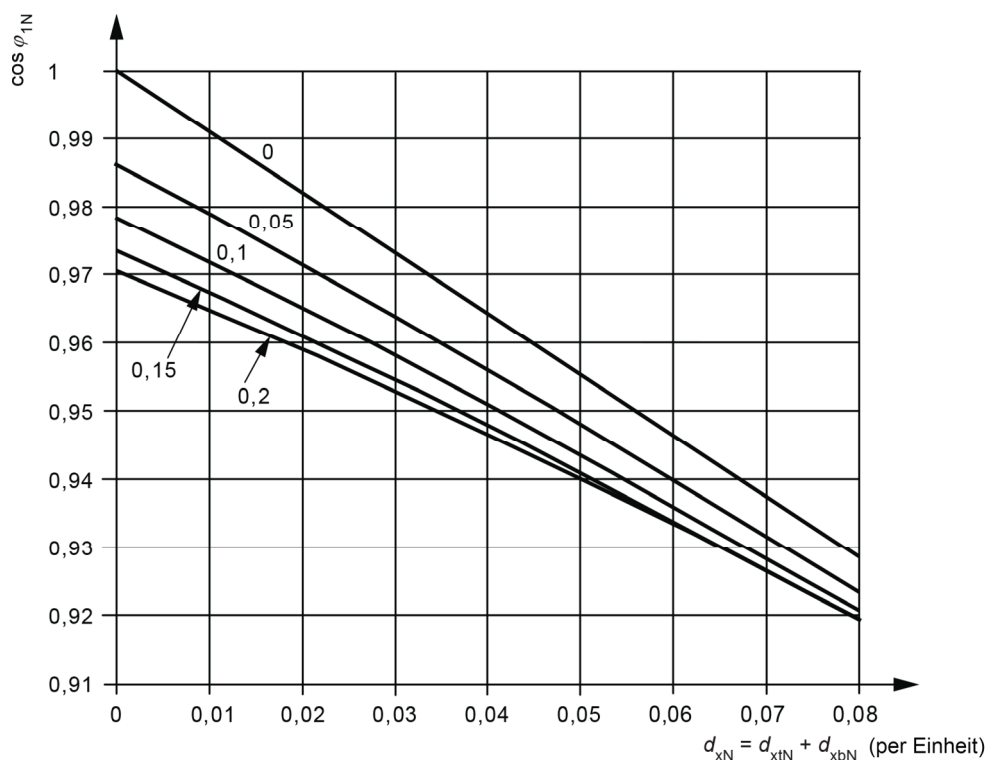
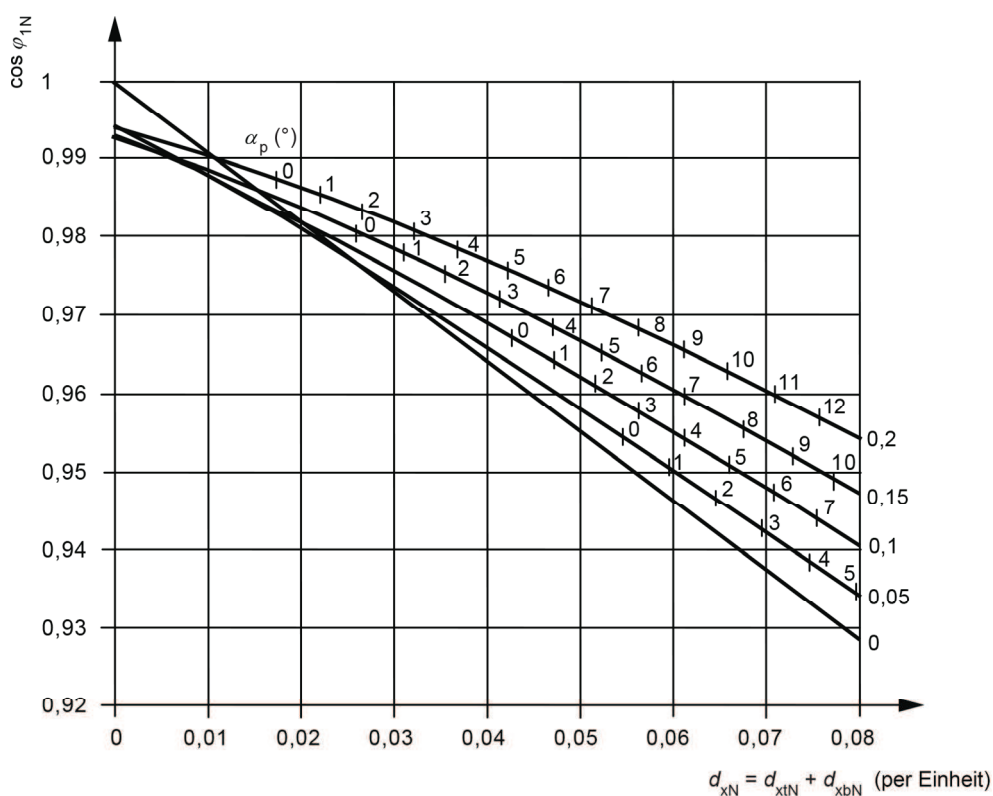
Wenn die Kurven in den Bildern 3 und 4 für andere Lasten als die Bemessungslast benutzt werden, wird $\cos\varphi_1$ beim tatsächlichen Gleichstrom I_d mit den tatsächlichen Werten von I_d , d_{xt} und d_{xb} ermittelt.

Das heißt, der Wert:

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

wird für die Ermittlung von $\cos\varphi_1$ aus den Bildern 3 bzw. 4 benutzt. Dann ist:

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

Bild 3 – Verschiebungsfaktor als Funktion von d_{xN} für $p = 6$ Bild 4 – Verschiebungsfaktor als Funktion von d_{xN} für $p = 12$

ANMERKUNG Der Parameter für die Bilder 3 und 4 ist:

$$\frac{1}{R_{1SC}} = \frac{S_{1LN}}{S_C} = \frac{U_{di} \times I_{dN}}{S_C}$$

4.6.5 Umrichtgrad

Bei Stromrichtern mit einer Pulszahl von 6 oder mehr sind Umrichtgrad und Wirkungsgrad annähernd gleich (siehe IEC 60146-1-1:2009, 3.7.11 und 3.7.12).

Der Umrichtgrad sollte zusätzlich zum Wirkungsgrad angegeben werden, insbesondere bei Stromrichtern mit geringer Leistung, bei Stromrichtern mit einer Pulszahl von 6 oder weniger, wenn es vom Lieferant festgelegt ist, und in Anwendungsfällen, in denen angenommen wird, dass die Leistung der Wechselstromanteile von Strömen und Spannungen im Gleichstromkreis nicht zur Nutzleistung beiträgt.

Der Umrichtgrad sollte immer mit der direkten Methode (Eingang/Ausgang) für die festgelegten Lastbedingungen bestimmt werden.

4.7 Gleichspannungsänderung

4.7.1 Allgemeines

Die Spannungsänderung eines Einzelstromrichters, der mit einem System ohne Blindleistungs-Kompensationskondensatoren verbunden ist, beruht hauptsächlich auf:

- einer ohmschen Spannungsänderung, d. h. der Spannungsänderung, die aus der Verlustleistung innerhalb des Stromrichters resultiert;
- einer induktiven Spannungsänderung aufgrund der Kommutierung; die Kommutierung verzerrt die Spannungskurve an den Anschlüssen der Halbleiterbaugruppen und ändert die Gleichspannung, die sich im Grunde aus den Werten von Teilabschnitten der Wechselspannung zusammensetzt;
- einer Spannungsänderung aufgrund der Impedanz des Netzes und von nichtsinusförmigen Eingangsströmen des Stromrichters, die auch die Spannungskurve an den Stromrichteranschlüssen verzerrt.

Die ideale Leerlauf-Gleichspannung U_{di} könnte dann auf die Spannung des starren Knotens bezogen werden, d. h. die Spannungsänderung muss die Wirkung aller Impedanzen einbeziehen, die zwischen einer solchen starren Stromquelle und den Wechselstromanschlüssen des Stromrichters bestehen.

In diesem Dokument wird jedoch angenommen, dass der Effektivwert der Netzspannung an den Wechselspannungsanschlüssen des Stromrichters konstant ist, nicht aber an der starren Stromquelle.

Damit wird die ideale Leerlauf-Gleichspannung U_{di} auf die Klemmenspannung des Stromrichters bezogen und die Spannungsänderung ergibt sich aus zwei Beiträgen:

- aus der inneren Gleichspannungsänderung, d. h. der Spannungsänderung des Stromrichters selbst (siehe 4.7.2 und IEC 60146-1-1:2009, 3.7.7);
- aus der zusätzlichen Gleichspannungsänderung aufgrund des Einflusses der Impedanz des Wechselstromsystems auf die Kurvenform der Klemmenspannung des Stromrichters (siehe 4.7.3).

Wenn die Blindleistungs-Kompensationskondensatoren in das System einbezogen werden, beeinflusst das Frequenzverhalten die Spannungskurve und die Spannungsänderung.

4.7.2 Innere Gleichspannungsänderung

4.7.2.1 Allgemeines

Die innere Gleichspannungsänderung ergibt sich aus der Summe der Gleichspannungsänderung, die vom Transformator und anderen Teilen des Stromrichters wie Drosselspulen usw. erzeugt wird, zuzüglich der Änderung mit dem Strom der Durchlassspannung für Thyristoren und der Vorwärtsspannung für Dioden.

Es wird angenommen, dass die Wechselspannung an den netzseitigen Anschlüssen des Stromrichters konstant ist.

Die Spannungsänderung sollte sich auf die Hauptanzapfung des Transformators beziehen. Wenn ein Thyristor-Stromrichter im Wechselrichterbereich arbeitet, wird die Spannungsänderung addiert und führt zu einer Erhöhung der Gleichspannung.

Die innere Gleichspannungsänderung sollte aus den Reaktanzen und den Verlustleistungen der Komponenten des Betriebsmittels berechnet werden. Wenn es vom Lieferanten vorgezogen wird, darf die Spannungsänderung durch direkte Messung bei einer Belastungsprüfung zwischen Eingang und Ausgang am Betriebsmittel gemessen werden.

Bei einphasigen Betriebsmitteln, bei Betriebsmitteln mit teilgesteuerten Thyristorschaltungen und bei Stromrichtern mit Phasenfolgesteuerung wird das Verfahren für die Bestimmung der inneren Spannungsänderung festgelegt.

4.7.2.2 Ohmsche Gleichspannungsänderung durch Stromrichtertransformator und Saugdrossel

Diese Änderung wird mit der folgenden Gleichung angegeben:

$$U_{\text{drtN}} = \frac{P_{\text{rtN}}}{I_{\text{dN}}}$$

Dabei sind

P_{rtN} die Verluste in den Transformatorwicklungen bei Bemessungsgleichstrom.

4.7.2.3 Ohmsche Gleichspannungsänderung durch andere Komponenten

Beispiele für solche Komponenten sind Glättungsdrosseln in Reihenschaltung, netzseitige Drosselpulen, Transduktordrosseln, stromausgleichende Bauteile, Dioden, Thyristoren usw. Ein Spannungsabfall durch die Schwellenspannung des Ventilbauelementes wird ausgeschlossen.

Diese Änderung wird mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$U_{\text{drbN}} = \frac{P_{\text{rbN}}}{I_{\text{dN}}}$$

Dabei sind

P_{rbN} die Verluste in den Komponenten bei Bemessungsgleichstrom.

4.7.2.4 Induktive Gleichspannungsänderung durch den Stromrichtertransformator

Die induktive Spannungsänderung kann mit folgender Gleichung aus dem Wert X_t berechnet werden:

$$d_{\text{xtN}} = \frac{\delta \times q \times s}{2 \times \pi \times g} \times X_t \times \frac{I_{\text{dN}}}{U_{\text{di}}}$$

Dabei ist

g die Anzahl der Kommutierungsgruppen, zwischen denen sich I_{dN} aufteilt;

I_{dN} der Bemessungsgleichstrom;

q die Kommutierungszahl;

s die Anzahl der in Reihe geschalteten Kommutierungsgruppen;

U_{di} die ideale Leerlauf-Gleichspannung;

δ die Anzahl der je Primärwicklung gleichzeitig kommutierenden Kommutierungsgruppen.

Der folgende, in der Gleichung verwendete Parameter ist in Tabelle 1, Spalte 12, aufgeführt.

$$\frac{\delta \times q \times s}{g}$$

X_t ist die nach IEC 61378-1:2011, 7.2, gemessene Kommutierungsreaktanz des Transformators. Wird der Messwert von X_t als bezogener Wert (pu) angegeben, muss bei der Umrechnung des Wertes vom bezogenen Wert in Ohm (oder Millihenry) die Basis des bezogenen Wertes genau beachtet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass IEC 61378-1 die Transformatorleistung auf der Basis der Grundschiwingung des Stromes definiert. Siehe Anhang A.

Ein alternatives Verfahren zur Ermittlung der induktiven Spannungsänderung des Transformators ist in IEC 61378-1:2011, 7.2.2, angegeben.

Die für d_{xtN} angegebene Gleichung zeigt, dass die Spannungsänderung eine lineare Kennlinie zum Lastgleichstrom hat. Die Gleichung kann jedoch angewendet werden, wenn die folgenden aufgeführten Annahmen erfüllt werden. Für Einzelheiten wird empfohlen, Handbücher über die Theorie der netzgeführten Stromrichter heranzuziehen. Siehe Literaturverzeichnis.

a) Einfache Kommutierung

Die Gleichung wird unter der Annahme abgeleitet, dass zu einem Zeitpunkt eine einfache Kommutierung stattfindet. Bei mehrfachen Kommutierungen weicht die Kennlinie der Spannungsänderung von der durch die Gleichung angegebenen Linie ab. Solche Erscheinungen treten auf, wenn der Lastgleichstrom ausreichend groß ist und sich die Kommutierungsdauer verlängert und in die nächste Kommutierung hineinreicht.

b) Keine Spannungsinduktion durch den Lastgleichstrom

Bei einigen Arten von Stromrichterschaltungen mit Sechspulsbetrieb kann die Spannungsinduktion in den Ventilwicklungen aus dem Gleichstrom erfolgen. Es ist jedoch zu beachten, dass die in Tabelle 1 aufgeführten Stromrichterschaltungen frei von solchen Erscheinungen sind.

Die Spannungsinduktion aus dem Lastgleichstrom wird am Beispiel der Stromrichterschaltung 3 erläutert.

In der Stromrichterschaltung führen die 6 Zweige nacheinander für jeweils 60° Gleichstrom. Leitet nämlich einer der Zweige den Laststrom, so leitet nur eine Ventilwicklung im Transformator den Lastgleichstrom. Das im Kern dieser Wicklung induzierte Magnetfeld breitet sich auf die Kerne der anderen Phasen aus, wenn die Kerne zwischen den Phasen magnetisch gekoppelt sind.

Bei einer Dreieckschaltung der Netzwicklungen, wie in Tabelle 1 dargestellt, wird der Strom durch das Magnetfeld auch in der Netzwicklung induziert und zirkuliert innerhalb der im Dreieck geschalteten Wicklungen. Der Kreisstrom hebt das Magnetfeld auf, das durch den in der Ventilwicklung fließenden Gleichstrom induziert wird. Die ventilseitige Spannung wird dann nicht mehr durch das vom Gleichstrom erzeugte Magnetfeld beeinflusst.

Sind die Netzwicklungen jedoch im Stern geschaltet, führt dies zu Problemen. Der Kreisstrom kann in den Netzwicklungen nämlich nicht fließen. Das durch den Gleichstrom induzierte Magnetfeld kann dann nicht aufgehoben werden und induziert die Spannung in den Wicklungen der anderen Phasen. Die induzierte Spannung überlagert die von der Netzwicklung übertragene Wechselspannung. Die induzierte Spannung steigt mit zunehmendem Gleichstrom. Dann werden die Spannungen über den Zweigen verzerrt und die Leitperioden sind länger als 60°. Der Betriebszustand unterscheidet sich dann vom Sechspulsbetrieb. Das bedeutet, dass die Erscheinung die induktive Spannungsänderung beeinflusst und die vorherige Gleichung für d_{xtN} nicht mehr angewendet werden kann.

Zusammenfassend sollte beachtet werden, dass die Wicklungsschaltung oder die magnetische Auslegung des Transformators die induktive Spannungsänderung beeinflusst, und es wird empfohlen, bei der Berechnung der induktiven Spannungsänderung großen Wert auf die Transformatorschaltung zu legen.

c) Konstanter Gleichstrom

Die Gleichung wird unter der Annahme abgeleitet, dass der Gleichstrom im Idealfall konstant gehalten wird.

Wenn die Gleichstromlast sehr gering ist, ist der Gleichstrom in der Praxis nicht konstant und intermittierend. Besonders dann, wenn ein Gleichstromkondensator oder eine parasitäre Kapazität an den Gleichstromkreis mit einer geringen Last angeschlossen ist, ist der Gleichstrom wahrscheinlich intermittierend. Wenn die Gleichstromlast die Eigenschaft besitzt, eine Gleichspannung von sich zu enthalten, wie Batterien, Gleichstrommotoren oder Elektrolyse, tritt der intermittierende Strom wahrscheinlich ebenfalls auf. In diesem Fall wird die Gleichspannung höher sein als die Spannung, die mit der vorgenannten Gleichung ermittelt wird.

Siehe IEC 60146-1-1:2009, 4.3.2.2

4.7.2.5 Induktive Gleichspannungsänderung durch andere Komponenten

Beispiele dafür sind Ventildrosseln, netzseitige Drosselspulen, stromausgleichende Drosselspulen usw.

In der Berechnungsformel werden die in Tabelle 3 angegebenen Symbole angewendet.

Tabelle 3 – Liste der in der Berechnungsformel benutzten Symbole

Symbol	Größe
d_{xbLN}	induktive Gleichspannungsänderung bei I_{dN} aufgrund der netzseitigen Drosselspulen bezogen auf U_{di}
d_{xbvN}	induktive Gleichspannungsänderung bei I_{dN} aufgrund der ventilseitigen Drosselspulen bezogen auf U_{di}
U_{dxbLN}	induktive Gleichspannungsänderung entsprechend d_{xbLN}
U_{dxbvN}	induktive Gleichspannungsänderung entsprechend d_{xbvN}
X_{bL}	Reaktanz je Phase auf der Netzseite von Drosselspule, Transformator usw.
X_X	Reaktanz je Phase auf der Ventilseite von Drosselspule, Ventildrosseln usw.
I_{1L}	Effektivwert des Grundschrwingungs-Primärphasenstromes des Transformators
I_{bN}	Effektivwert des Stromes in der Drosselspule entsprechend I_{dN} , berechnet auf der Grundlage einer rechteckigen Stromkurvenform
I_{dN}	Bemessungsgleichstrom
U_{bN}	Bemessungswert der Außenleiterspannung an den netzseitigen Anschlüssen der Drosselspule usw.
g	Anzahl der Kommutierungsgruppen, zwischen denen sich I_{dN} aufteilt
p	Pulszahl
q	Kommutierungszahl
s	Anzahl der in Reihe geschalteten Kommutierungsgruppen
δ	Anzahl der je Primärwicklung gleichzeitig kommutierenden Kommutierungsgruppen

a) Für Drosselspulen, Transformatoren usw. auf der Netzseite gilt:

– für dreiphasige Systeme:

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

– für einphasige Systeme:

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

b) Für ventilseitige Drosselspulen gilt:

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

Die induktive Gleichspannungsänderung aufgrund anderer Komponenten ist:

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

4.7.2.6 Innere Gleichspannungsänderung des Stromrichters

Die Gleichspannungsänderung bei Bemessungsgleichstrom aufgrund des Stromrichtertransformators und der Saugdrossel (soweit vorhanden) wird wie folgt angegeben:

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

Die Gleichspannungsänderung bei Bemessungsgleichstrom aufgrund anderer Komponenten des Stromrichters wird wie folgt angegeben:

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

Die innere Gleichspannungsänderung bei Bemessungsgleichstrom wird wie folgt angegeben:

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

4.7.3 Gleichspannungsänderung aufgrund der Impedanz des Wechselstromsystems

4.7.3.1 Einfluss der Impedanz des Wechselstromsystems auf die Gleichspannungsänderung des Stromrichters

Selbst wenn der Effektivwert der Klemmenspannung des Stromrichters konstant gehalten wird, verursacht die Impedanz des Wechselstromsystems eine zusätzliche Spannungsänderung an den Gleichspannungsanschlüssen des Stromrichters.

Diese ist eine Folge von Änderungen der Kurvenform der Stromrichterklammenspannungen aufgrund nichtsinusförmiger Ströme, die vom Stromrichter entnommen werden und welche die Spannungsänderung beeinflussen.

Der Einfluss ist von der Pulszahl und vom Verhältnis (R_{1SC}) der Kurzschlussleistung der Quelle zur Scheinleistung der Grundschwingung des Stromrichters bei Bemessungsgleichstrom abhängig.

ANMERKUNG R_{SC} bezieht sich auf die in IEC 60146-1-1:2009 angegebene Bemessungsscheinleistung. Der Einfluss der Impedanz des Wechselstromsystems wird zweckmäßigerweise mit R_{1SC} berechnet.

4.7.3.2 Berechnung der zusätzlichen Gleichspannungsänderung U_{dLN} aufgrund der Impedanz des Wechselstromsystems

Bild 5 gibt die zusätzliche Gleichspannungsänderung d_{LN} bezogen auf U_{di} bei Bemessungsgleichstrom aufgrund der Impedanz des Wechselstromsystems an. Die entsprechende Spannungsänderung U_{dLN} ist:

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

Falls nichts anderes angegeben ist, wird angenommen, dass der Effektivwert der netzseitigen Klemmenspannung des Stromrichters konstant gehalten wird.

Wenn die Kurven in Bild 5 für andere Lasten als die Bemessungslast benutzt werden, müssen mit den tatsächlichen Werten von I_d , d_{xt} und d_{xb} die tatsächliche Änderung d_L und daraus die zusätzliche Änderung U_{dL} ermittelt werden.

Das heißt,

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

wird zum Eintragen in das Diagramm in Bild 5 verwendet.