

	DIN IEC/TR 62543 (VDE 0553-543)	DIN
	Dies ist zugleich eine VDE-Leitlinie im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 29.200; 29.240.10 Ersatz für DIN IEC/TR 62543 (VDE 0553-543):2014-07 Siehe Anwendungsbeginn Hochspannungsgleichstrom(HGÜ-)Energieübertragung mit selbstgeführten Stromrichtern (VSC) (IEC/TR 62543:2011 + A1:2013 + A2:2017) High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC) (IEC/TR 62543:2011 + A1:2013 + A2:2017) Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer VDE-Leitlinie erstellt und ist die Übernahme eines Fachberichts der IEC (IEC/TR). Gesamtumfang 71 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE		

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieses Dokuments ist 2018-01-01.

Für DIN IEC/TR 62543 (VDE 0553-543):2014-07 besteht eine Übergangsfrist bis 2018-01-01.

Inhalt

Seite

Nationales Vorwort.....	6
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Dokumenten	7
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	8
1 Anwendungsbereich	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe	10
3.1 Allgemeines	10
3.2 Kurzzeichen	12
3.5 VSC-Übertragung	12
3.7 Typprüfungen	13
3.8 Produktionsprüfungen	13
3.9 Stichprobenprüfungen	13
3.11 Leistungsverluste.....	13
4 Überblick über die VSC-Übertragung.....	14
4.1 Grundlagen zum VSC-Übertragungsbetrieb	14
4.1.1 Der Spannungszwischenkreis-Stromrichter als Blackbox.....	14
4.1.2 Prinzipien der Wirk- und Blindleistungsregelung.....	15
4.1.3 Betriebsprinzipien einer VSC-Übertragungsanordnung	17
4.1.4 Anwendungen der VSC-Übertragung	18
4.2 Vorgesehene Lebensdauer	18
4.3 VSC-Übertragungskonfigurationen	18
4.3.1 Allgemeines	18
4.3.2 Gleichstromkreiskonfigurationen	19
4.3.3 Monopolare Konfiguration	19
4.3.4 Bipolare Konfiguration	20
4.3.5 Parallelschaltung von zwei Stromrichtern	20
4.3.6 Reihenschaltung von zwei Stromrichtern.....	21
4.3.7 Parallel- und Reihenschaltung von mehr als zwei Stromrichtern.....	21
4.4 Halbleiter für die VSC-Übertragung.....	21
5 Topologien von Stromrichtern für die VSC-Übertragung	23
5.1 Allgemeines	23
5.2 Stromrichtertopologien mit VSC-Ventilen des „Schalter“-Typs	23
5.2.1 Allgemeines	23
5.2.2 Betriebsprinzip.....	24
5.2.3 Topologien.....	24

5.3	Stromrichtertopologien mit VSC-Ventilen vom Typ „Regelbare Spannungsquelle“	27
5.3.1	Allgemeines.....	27
5.3.2	MMC-Topologie mit VSC-Stufen in Halbbrückentopologie.....	28
5.3.3	MMC-Topologie mit VSC-Stufen in Vollbrückentopologie	29
5.3.4	CTL-Topologie mit VSC-Zellen in Halbbrückentopologie	30
5.3.5	CTL-Topologie mit VSC-Zellen in Vollbrückentopologie.....	30
5.4	Überlegungen zur Auslegung von VSC-Ventilen.....	31
5.4.1	Zuverlässigkeit und Ausfallart.....	31
5.4.2	Strombemessung	31
5.4.3	Anforderungen in Bezug auf transiente Ströme und Spannungen	31
5.4.4	Diodenanforderungen	32
5.4.5	Zusätzliche Einzelheiten des Entwurfs	32
5.5	Andere Stromrichtertopologien	33
5.6	Sonstige Einrichtungen für VSC-Übertragungsanordnungen	33
5.6.1	Allgemeines.....	33
5.6.2	Leistungskomponenten einer VSC-Übertragungsanordnung.....	33
5.6.3	VSC-Stationsleistungsschalter.....	34
5.6.4	Oberschwingungsfilter auf der Seite des Wechselstromnetzes.....	34
5.6.5	Funkstörungsfilter.....	34
5.6.6	Kuppeltransformatoren und Phasendrosseln.....	34
5.6.7	Ventildrossel.....	35
5.6.8	Gleichstromkondensatoren	36
5.6.9	Gleichstromdrossel	38
5.6.10	Gleichtakt-Sperrdrossel.....	38
5.6.11	Gleichstromfilter	38
5.6.12	Widerstandsbremssystem.....	38
6	Überblick über VSC-Regler.....	39
6.1	Allgemeines.....	39
6.2	Betriebsarten und Betriebsoptionen.....	39
6.3	Energieübertragung	40
6.3.1	Allgemeines.....	40
6.3.2	Telekommunikation zwischen Stromrichterstationen.....	41
6.4	Blindleistungs- und Wechselspannungsregelung	41
6.4.1	Wechselspannungsregelung.....	41
6.4.2	Blindleistungsregelung	42
6.5	Schwarzstartfähigkeit	42
6.6	Einspeisung aus einem Windenergiepark.....	42
7	Stationärer Betrieb	43
7.1	Belastbarkeit im stationären Betrieb	43
7.2	Stromrichterleistungsverluste.....	45
8	Dynamisches Betriebsverhalten.....	45

8.1	Wechselstromnetzstörungen	45
8.2	Gleichstromnetzstörungen	46
8.2.1	Fehler in Gleichstromkabeln.....	46
8.2.2	Fehler in Gleichstromfreileitungen.....	46
8.3	Interne Fehler	46
9	HGÜ-Leistungsanforderungen	47
9.1	Oberschwingungsbezogene Leistung	47
9.2	Wellenverzerrung	48
9.3	Grundfrequenz und Oberschwingungen	48
9.3.1	Dreiphasen-Zweipunkt-VSC.....	48
9.3.3	Mehrpuls- und Mehrpunkt-Stromrichter	49
9.4	Oberschwingungsspannungen in Stromversorgungssystemen, die durch den Betrieb von VSC verursacht werden.....	49
9.5	Überlegungen zur Auslegung von Oberschwingungsfiltren (Wechselstromseite)	50
9.6	Gleichstromseitige Filterung	50
10	Umweltauswirkungen	50
10.1	Allgemeines	50
10.2	Hörbare Geräusche	50
10.3	Elektrische und magnetische Felder (EMF)	51
10.4	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).....	51
11	Prüfung und Inbetriebnahme	52
11.1	Allgemeines	52
11.2	Prüfungen im Werk.....	52
11.2.1	Prüfungen an Bauelementen.....	52
11.2.2	Regelsystemprüfungen	52
11.3	Inbetriebnahmeprüfungen/Systemprüfungen	53
11.3.1	Allgemeines	53
11.3.2	Prüfungen vor Inbetriebnahme	53
11.3.3	Teilsystemprüfungen	54
11.3.4	Systemprüfungen	54
Anhang A (informativ)	Funktionsspezifikationsanforderungen für VSC-Übertragungssysteme.....	59
Anhang B (informativ)	Modulationsstrategien für Zweipunkt-Stromrichter	67
B.1	Trägerwellen-PWM.....	67
B.2	Modulation mit selektiver Auslöschung von Oberschwingungen	69
Literaturhinweise		70

Bilder

Bild 1 – Wesentliche Bauelemente einer VSC-Station	11
Bild 2 – Modell eines allgemeinen Spannungszwischenkreis-Stromrichters (Wechselstromfilter sind nicht dargestellt)	14
Bild 3 – Prinzip der Wirkleistungsregelung	16
Bild 4 – Prinzip der Blindleistungsregelung	17
Bild 5 – Punkt-zu-Punkt-VSC-Übertragungsanordnung	17

Bild 6 – VSC-Übertragung mit einem symmetrischen Monopol	19
Bild 7 – VSC-Übertragung mit einem asymmetrischen Monopol mit metallischer Rückleitung	19
Bild 8 – VSC-Übertragung mit einem asymmetrischen Monopol mit Erdrückleitung	20
Bild 9 – VSC-Übertragung in bipolarer Konfiguration	20
Bild 10 – Parallelschaltung von zwei Stromrichtergruppen	21
Bild 11 – Symbol eines Ausschalt-Halbleiterbauelements und der zugehörigen Freilaufdiode	22
Bild 12 – Symbol eines IGBT und der zugehörigen Freilaufdiode	22
Bild 13 – Darstellung eines 3-Phasen-Zweipunktstromrichters und der dazugehörigen Wechselstromwellenform für eine Phase	25
Bild 14 – Einphasen-Wechselstromausgang für Zweipunktstromrichter mit PWM-Ansteuerung beim 21-Fachen der Grundfrequenz	25
Bild 15 – Darstellung eines Dreiphasen-Dreipunkt-NPC-Stromrichters und der zugehörigen Wechselstromwellenform für eine Phase	26
Bild 16 – Einphasen-Wechselstromausgang für Dreipunkt-NPC-Stromrichter mit PWM-Ansteuerung beim 21-Fachen der Grundfrequenz	27
Bild 17 – Elektrisches Äquivalent für einen Stromrichter mit VSC-Ventilen, der als regelbare Spannungsquelle fungiert	28
Bild 18 – VSC-Ventilplatzanordnung und äquivalente Schaltung in MMC-Topologie in Halbbrückentopologie	29
Bild 19 – Stromrichterblockanordnung mit MMC-Topologie in Halbbrückentopologie	29
Bild 20 – VSC-Ventilplatzanordnung und äquivalente Schaltung in MMC-Topologie mit Vollbrückentopologie	30
Bild 21 – Typischer SSOA für den IGBT	31
Bild 22 – Eine Zweipunkt-VSC-Brücke mit abgeschalteten IGBTs	32
Bild 23 – Darstellung einer VSC-Gruppe als Wechselspannung mit dem Betrag U und dem Phasenwinkel δ , einer Reaktanz nachgeschaltet	39
Bild 24 – Konzept der Vektorsteuerung	40
Bild 25 – VSC-Leistungsregler	41
Bild 26 – Wechselspannungsregler	41
Bild 27 – Ein typisches vereinfachtes PQ-Diagramm	44
Bild 28 – Schutzkonzept einer VSC-Station	47
Bild 29 – Wellenformen für Dreiphasen-Zweipunkt-VSC	49
Bild 32 – Ersatzschaltung beim PCC vom VSC	49
Bild B.1 – Spektren der Spannungsüberschwingungen eines Zweipunkt-VSC mit Trägerfrequenz bei der 21. Harmonischen	68
Bild B.2 – Leitereingangsspannung für die Modulation mit selektiver Auslöschung von Überschwingungen (SHEM)	69

Nationales Vorwort

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

Die VDE-Leitlinien enthalten sicherheitstechnische Festlegungen mit einem im Vergleich zu den VDE-Bestimmungen wesentlich erweiterten Ermessensraum für eigenverantwortliches sicherheitstechnisches Handeln.

VDE-Leitlinien sind angebracht, wenn die Vielfalt der zu betrachtenden Sachlagen oder Gestaltungsmöglichkeiten nach vorherrschender Meinung durch unmittelbar anwendbare Anweisungen nicht erfasst werden kann. Sie dienen dem Anwender als Beispielsammlung oder Grundlage für eigene sicherheitstechnische Entscheidungen. Für sich allein sind sie nicht als ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden oder die Anwender geeignet.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ erarbeitet..

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

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

A1 | In dieser VDE-Leitlinie sind die eingearbeiteten Änderungen der Änderung 1 mit einem senkrechten Strich und der Kennzeichnung „A1“ am linken Seitenrand markiert.

A2 | In dieser VDE-Leitlinie sind die eingearbeiteten Änderungen der Änderung 2 mit einem senkrechten Strich und der Kennzeichnung „A2“ am linken Seitenrand markiert.

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 62543 (VDE 0553-543):2014-07** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Anpassungen im Abschnitt Normative Verweisungen;
- b) Überarbeitung im Abschnitt Begriffe;
- c) editorielle Überarbeitung;
- d) **Anhang B** wurde durch einen neuen **Anhang B** „Bestimmung von VSC-Ventil-Leistungsverlusten“ ersetzt;
- e) die Deutsche Fassung wurde im **Abschnitt 2** an den aktuellen Standardtext angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN IEC/TR 62543 (VDE 0553-543): 2012-06, 2014-07

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

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 aktuellste 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.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1 (1 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60044 (alle Teile)	IEC 60044 (alle Teile)	DIN EN 60044 (alle Teile) (VDE 0414-44)	VDE 0414-44
EN 60060-1	IEC 60060-1	DIN EN 60060-1 (VDE 0432-1)	VDE 0432-1
EN 60071-2	IEC 60071-2	DIN EN 60071-2 (VDE 0111-2)	VDE 0111-2
EN 60071-5	IEC 60071-5	DIN EN 60071-5 (VDE 0111-5)	VDE 0111-5
EN 60076 (alle Teile)	IEC 60076 (alle Teile)	DIN EN 60076 (VDE 0532-76) (alle Teile)	VDE 0532-76
EN 60099-4	IEC 60099-4	DIN EN 60099-4 (VDE 0675-4)	VDE 0675-4
EN 60146-2	IEC 60146-2	DIN EN 60146-2 (VDE 0558-2)	VDE 0558-2
–	IEC 60747-9	–	–
EN 60870 (alle Teile)	IEC 60870 (alle Teile)	DIN EN 60870 (alle Teile)	–
EN 60871-1	IEC 60871-1	DIN EN 60871-1 (VDE 0560-41)	VDE 0560-41
EN 61000 (alle Teile)	IEC 61000 (alle Teile)	DIN EN 61000 (VDE 0839) (alle Teile)	VDE 0839
EN 61000-4-1	IEC 61000-4-1	DIN EN 61000-4-1 (VDE 0847-4-1)	VDE 0847-4-1
EN 61071	IEC 61071	DIN EN 61071 (VDE 0560-120)	VDE 0560-120
EN 61803	IEC 61803	DIN EN 61803	–
EN 61869-1	IEC 61869-1	DIN EN 61869-1 (VDE 0414-9-1)	VDE 0414-9-1
EN 61975	IEC 61975	DIN EN 61975 (VDE 0553-975)	VDE 0553-975
EN 62501	IEC 62501	DIN EN 62501 (VDE 0553-501)	VDE 0553-501
EN 62747	IEC 62747	DIN EN 62747	–
EN 62751 (alle Teile)	IEC 62751 (alle Teile)	DIN EN 62751 (VDE 0553-751) (alle Teile)	VDE 0553-751
EN 62751-1	IEC 62751-1	DIN EN 62751-1 (VDE 0553-751-1)	VDE 0553-751-1

Tabelle NA.1 (2 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 62751-2	IEC 62751-2	DIN EN 62751-2 (VDE 0553-751-2)	VDE 0553-751-2
–	IEC/TR 62001 (alle Teile)	–	–
–	IEC/TS 60815 (alle Teile)	DIN IEC/TS 60815 (VDE V 0674-256) (alle Teile)	VDE V 0674-256
–	IEC/TS 61973	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60044 (VDE 0414-44) (alle Teile), *Messwandler*

DIN EN 60060-1 (VDE 0432-1), *Hochspannungs-Prüftechnik – Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen*

DIN EN 60071-2 (VDE 0111-2), *Isolationskoordination – Teil 2: Anwendungsrichtlinie*

DIN EN 60071-5 (VDE 0111-5), *Isolationskoordination – Teil 5: Verfahren für Hochspannungs-Gleichstrom-Stromrichterstationen (HGÜ-Stromrichterstationen)*

DIN EN 60076 (VDE 0532-76) (alle Teile), *Leistungstransformatoren*

DIN EN 60099-4 (VDE 0675-4), *Überspannungsableiter – Teil 4: Metalloxidableiter ohne Funkenstrecken für Wechselspannungsnetze*

DIN EN 60146-2 (VDE 0558-2), *Halbleiter-Stromrichter – Teil 2: Selbstgeführte Halbleiter-Stromrichter einschließlich Gleichstrom-Direktumrichter*

DIN EN 60870 (alle Teile), *Fernwirkeneinrichtungen und -systeme*

DIN EN 60871-1 (VDE 0560-41), *Parallelkondensatoren für Wechselspannungs-Starkstromanlagen mit einer Nennspannung über 1 kV – Teil 1: Allgemeines*

DIN EN 61000 (VDE 0839) (alle Teile), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)*

DIN EN 61000-4-1 (VDE 0847-4-1), *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-1: Prüf- und Messverfahren*

DIN EN 61071 (VDE 0560-120), *Kondensatoren der Leistungselektronik*

DIN EN 61803, *Bestimmung der Leistungsverluste in Hochspannungsgleichstrom-(HGÜ-)Stromrichterstationen mit netzgeführten Stromrichtern*

DIN EN 61869-1 (VDE 0414-9-1), *Messwandler – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*

DIN EN 61975 (VDE 0553-975), *Anlagen zur Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) – Systemprüfungen*

DIN EN 62501 (VDE 0553-501), *Spannungsgeführte Stromrichterventile (VSC-Ventile) für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) – Elektrische Prüfung*

DIN EN 62747, *Terminologie für Spannungszwischenkreis-Stromrichter (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme*

DIN EN 62751 (VDE 0553-751) (alle Teile), *Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme*

DIN EN 62751-1 (VDE 0553-751-1), *Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*

DIN EN 62751-2 (VDE 0553-751-2), *Bestimmung der Leistungsverluste in Spannungszwischenkreis-Stromrichtern (VSC) für Hochspannungsgleichstrom(HGÜ)-Systeme – Teil 2: Modulare Mehrpunkt-Stromrichter*

DIN IEC/TS 60815 (VDE V 0674-256) (alle Teile), *Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für verschmutzte Umgebungen*

1 Anwendungsbereich

Dieser Technische Bericht enthält allgemeine Hinweise zum Thema Spannungszwischenkreis-Stromrichter (im Deutschen auch „selbstgeführt“ genannt), die zur Energieübertragung mittels Hochspannungsgleichstrom verwendet werden. Er beschreibt Stromrichter, die einen Spannungszwischenkreis besitzen (d.h. dass sie ein kapazitives Energiespeichermedium enthalten und dass die Polarität der Gleichspannung unveränderlich ist) und darüber hinaus selbstgeführt sind, indem sie Halbleiterbauteile nutzen, die durch Steuervorgänge sowohl an- als auch abgeschaltet werden können. Der Anwendungsbereich umfasst zwei- und dreistufige Stromrichter mit Pulsbreitenmodulation (PWM) (en: pulse-width modulation) ebenso wie mehrstufige Stromrichter, modulare mehrstufige Stromrichter und kaskadierte zweistufige Stromrichter, schließt aber zwei- und dreistufige Stromrichter ohne PWM mit rechteckförmigen Ausgangsgrößen aus.

Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) mit Spannungszwischenkreis-Stromrichtern wird als „VSC-Übertragung“ (en: voltage sourced converter, VSC) bezeichnet.

Die verschiedenen Arten von Stromkreisen, die sich für die VSC-Übertragung verwenden lassen, werden in diesem Bericht ebenso beschrieben wie ihre wesentlichen Betriebseigenschaften und typischen Anwendungen. Das vorrangige Ziel besteht darin, den Käufern einen Leitfaden an die Hand zu geben, der ihnen dabei hilft, eine VSC-Übertragungsanlage zu spezifizieren.

Netzgeführte und stromgeführte Stromrichter sind ausdrücklich nicht Gegenstand dieses Berichts.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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 61975, *High-voltage direct current (HVDC) installations – System tests*

IEC 62501, *Voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission – Electrical testing*

IEC 62747, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

IEC 62571 (alle Teile), *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high voltage direct current (HVDC) systems*

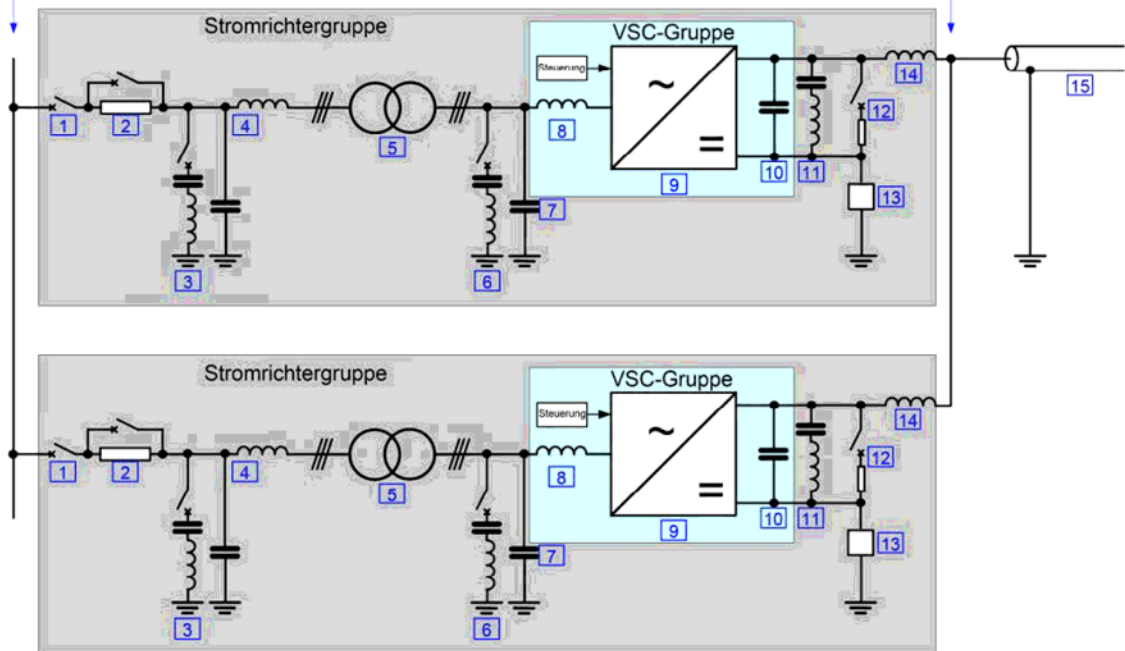
3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 62747, **IEC 62501** und die folgenden Begriffe.

3.1 Allgemeines

Grundbegriffe für Spannungszwischenkreis-Stromrichter zur HGÜ sind in IEC 62747 enthalten. Die Terminologie zur elektrischen Prüfung von VSC-Ventilen für die HGÜ ist in **IEC 62501** enthalten.

Zur Verdeutlichung der Erläuterungen zeigt **Bild 1** eine systematische Darstellung eines VSC-Systems. In Abhängigkeit von der Stromrichtertopologie und den Anforderungen des betreffenden Projekts können einige Bauelemente weggelassen werden oder sich unterscheiden.

Wechselstrom-
VerknüpfungspunktGleichstrom-
Verknüpfungspunkt

A1 / A2

- | | | | |
|-------|--|----|--|
| 1 | Leistungsschalter | 9 | VSC-Gruppe ³⁾ |
| 2 | Einschaltwiderstand | 10 | VSC-Gleichstromkondensator ⁴⁾ |
| 3 | Netzseitiger Überschwingungsfilter ¹⁾ | 11 | VSC-Gleichstromüberschwingungsfilter ¹⁾ |
| 4 | Netzseitiger Hochfrequenzfilter ⁶⁾ | 12 | Widerstandsbremssystem ⁷⁾ |
| 5 | Kuppeltransformator | 13 | Sternpunkt-Erdungsweig ⁵⁾ |
| 6 | Stromrichterseitiger Überschwingungsfilter ¹⁾ | 14 | Gleichstromdrossel ⁸⁾ |
| 7 + 8 | Stromrichterseitiger Hochfrequenzfilter ²⁾ | 15 | Gleichstromkabel oder -freileitung |
| 8 | Phasendrossel ²⁾ | | |

- ¹⁾ Bei einigen VSC-Bauarten, die Ventile vom Typ „regelbare Spannungsquelle“ nutzen, sind die Überschwingungsfilter möglicherweise nicht erforderlich.
- ²⁾ Bei einigen VSC-Bauarten kann die Phasendrossel die Funktion des stromrichterseitigen Hochfrequenzfilters teilweise übernehmen.
- ³⁾ Bei einigen VSC-Topologien kann jedes Ventil der VSC-Gruppe eine „Ventildrossel“ umfassen, die in das Ventil eingebaut oder als separates Bauteil ausgeführt sein kann.
- ⁴⁾ Bei einigen VSC-Bauarten kann der VSC-Gleichstromkondensator ganz oder teilweise auf die drei Phaseneinheiten der VSC-Gruppe verteilt sein, wobei er dann als Gleichstrom-Submodulkondensator bezeichnet wird.
- ⁵⁾ Je nach Bauart der VSC-Gruppe kann sich der Sternpunkt-Erdungsweig an einer anderen Stelle befinden.
- ⁶⁾ Bei einigen VSC-Bauarten kann der Kuppeltransformator die Funktion des netzseitigen Hochfrequenzfilters teilweise übernehmen.
- ⁷⁾ Wahlweise.
- ⁸⁾ Wahlweise, falls sich Phasendrosseln auf der Gleichstromseite des Stromrichters befinden.

Bild 1 – Wesentliche Bauelemente einer VSC-Station

3.2 Kurzzeichen

U_{conv}	Außenleiter-Wechselspannung der Stromrichtergruppe(n), Effektivwert einschließlich Oberschwingungen
I_{conv}	Wechselstrom der Stromrichtergruppe(n), Effektivwert einschließlich Oberschwingungen
U_{L}	Außenleiter-Wechselspannung des Wechselstromnetzes, Effektivwert einschließlich Oberschwingungen
I_{L}	Wechselstrom des Wechselstromnetzes, Effektivwert einschließlich Oberschwingungen
U_{d}	Außenleiter-Gleichspannung der Gleichstromsammelschiene des VSC-Übertragungssystems
I_{d}	Gleichstrom der Gleichstromsammelschiene des VSC-Übertragungssystems

A1/A2

3.5 VSC-Übertragung

A1/A2

3.5.4

VSC-Gleichstromkondensator

Kondensatorbatterie(n), die (sofern vorhanden) zwischen zwei Gleichstromanschlüssen des VSC angeschlossen ist (sind) und als Energiespeicher und/oder zum Filtern dient (dienen)

A1/A2

3.5.6

wechselstromseitiger Funkstörungsfilter

RFI-Filter

Filter, die (sofern vorhanden) dazu dienen, das Eindringen von Funkstörungen (en: radio frequency interference, RFI) in das Wechselstromnetz auf ein annehmbares Maß zu reduzieren

A1/A2

3.5.8

ventilseitiger Oberschwingungsfilter

Filter, die (sofern vorhanden) dazu dienen, die HF-Beanspruchung des Kuppeltransformators zu mindern

A1/A2

3.5.10

Gleichstrom-Oberschwingungsfilter

Gleichstromfilter, die (sofern vorhanden) dazu dienen, die von einem VSC-Ventil erzeugten Oberschwingungen am Eindringen in das Gleichstromnetz zu hindern

A1

ANMERKUNG Der Filter kann aus einem abgestimmten Parallelzweig, einer Glättungsdrossel, einer Gleichtakt-Sperrdrossel oder aus Kombinationen dieser Einrichtungen bestehen.

3.5.11

Gleichstromdrossel

Drossel, die (sofern vorhanden) in Reihe mit einer Gleichstromsammelschiene geschaltet wird

A1

ANMERKUNG Die Gleichstromdrossel dient dazu, die in der Gleichstromleitung oder dem Gleichstromkabel fließenden Oberschwingungsströme zu verringern und kritische Resonanzen innerhalb des Gleichstromkreises durch Verstimmung zu verhindern. Gleichstromdrosseln können auch zu Schutzzwecken eingesetzt werden.

3.5.12**gleichstromseitiges Funkstörungsfilter**

Filter, die (sofern vorhanden) dazu dienen, das Eindringen von Funkfrequenzen (RF) in das Gleichstromnetz auf ein annehmbares Maß zu reduzieren

A1/A2

3.7 Typprüfungen

Prüfungen, die durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die vorgesehenen Bauelemente des VSC-Übertragungssystems die dafür festgelegten Anforderungen erfüllen. Für die Anwendung des vorliegenden Berichts werden Typprüfungen in zwei Hauptkategorien eingeteilt: die Spannungsprüfungen und die Betriebsprüfungen.

3.7.1**Spannungsprüfungen**

Prüfungen, die durchgeführt werden, um die Hochspannungsfestigkeit der Bauelemente des VSC-Übertragungssystems zu überprüfen

3.7.2**Betriebsprüfungen**

Prüfungen, die durchgeführt werden, um das Einschaltvermögen (sofern zutreffend), das Ausschaltvermögen (sofern zutreffend) und die stromabhängigen Leistungseigenschaften der Bauelemente des VSC-Übertragungssystems zu überprüfen

3.8 Produktionsprüfungen

Prüfungen, die durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob die Herstellung vorschriftsmäßig und so erfolgt ist, dass die Eigenschaften des betreffenden Bauelements des VSC-Übertragungssystems den dafür geltenden Festlegungen entsprechen

3.9 Stichprobenprüfungen

Produktionsprüfungen, die an einer kleinen Anzahl der betreffenden VSC-Übertragungsbaulemente, z. B. Ventilabschnitten oder speziellen Bauelementen, durchgeführt werden, die dem zu untersuchenden Los nach dem Zufallsprinzip entnommen wurden

A2

3.11 Leistungsverluste**3.11.1****Zusatzverluste**

elektrische Leistung, die zur Speisung der Hilfsbetriebe der VSC-Station benötigt wird

A1

ANMERKUNG Die Zusatzverluste hängen davon ab, ob die Station mit Nulllast oder unter Last betrieben wird, wobei die Zusatzverluste im letzteren Fall vom Grad der Belastung abhängen.

3.11.2**Nulllast-Betriebsverluste**

A1

Verluste, die in einem Gerät der Anlage entstehen, wenn die VSC-Station zugeschaltet ist, die VSC-Ventile aber gesperrt und alle Lasten der Station und alle Hilfseinrichtungen so angeschlossen sind, wie für die unmittelbare Lastaufnahme erforderlich

3.11.3**Leerlauf-Betriebsverluste**

A1

Verluste, die in einem Gerät der Anlage erzeugt werden, wenn die VSC-Station zugeschaltet ist und die VSC-Ventile entsperrt sind, aber keine Wirk- oder Blindleistung abgegeben wird

3.11.4

Betriebsverluste

Verluste, die in einem Gerät der Anlage bei einer bestimmten Laststufe erzeugt werden, wenn die VSC-Station zugeschaltet ist und die Stromrichter in Betrieb sind

3.11.5

Gesamtverluste des Systems

Summe aller Betriebsverluste, einschließlich der entsprechenden Zusatzverluste

3.11.6

wesentliche Zusatzlast der Station

Lasten, deren Ausfall das Umrichtvermögen der HGÜ-Stromrichterstation (z. B. die Ventilkühlung) beeinträchtigen, sowie die Lasten, die bei einem Totalausfall der Wechselstromversorgung (z. B. Batterieladegeräte, Steuereinrichtungen) aktiv bleiben müssen

ANMERKUNG Die gesamten „Betriebsverluste“ abzüglich der „Leerlauf-Betriebsverluste“ können, so wie dies bei konventionellen Wechselstromstationen üblich ist, als den „Lastverlusten“ quantitativ gleichwertig betrachtet werden.

4 Überblick über die VSC-Übertragung

4.1 Grundlagen zum VSC-Übertragungsbetrieb

4.1.1 Der Spannungswidenkreis-Stromrichter als Blackbox

Der Betrieb eines Spannungswidenkreis-Stromrichters ist in [Abschnitt 5](#) ausführlicher beschrieben. In diesem Abschnitt wird der Stromrichter als Blackbox behandelt, die in der Lage ist, Wechselstrom in Gleichstrom und Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln, wobei nur der stationäre Betrieb betrachtet wird.

Bild 2 zeigt eine systematische Darstellung eines allgemein gehaltenen Spannungswidenkreis-Stromrichters, der auf der einen Seite an einen Gleichstromkreis und auf der anderen an einen Wechselstromkreis angeschlossen ist.

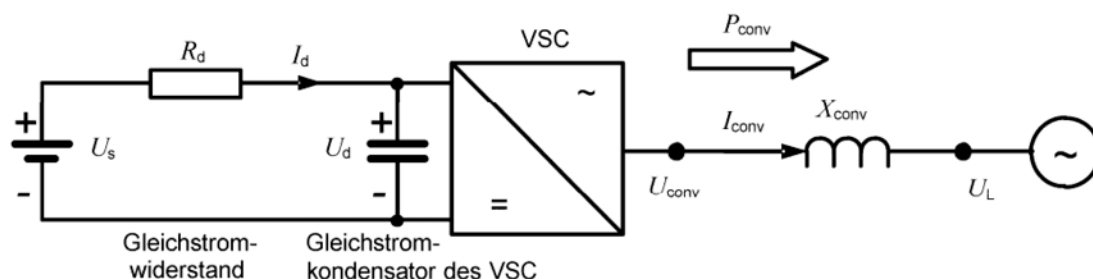


**Bild 2 – Modell eines allgemeinen Spannungswidenkreis-Stromrichters
(Wechselstromfilter sind nicht dargestellt)**

Der VSC kann entweder als Wechselrichter, der eine Wirkleistung in das Wechselstromnetz einspeist ($I_d \times U_d > 0$), oder als Gleichrichter, der Leistung aus einem Wechselstromnetz aufnimmt ($I_d \times U_d < 0$), betrachtet werden. Entsprechend kann ein VSC entweder kapazitiv durch Einspeisen einer Blindleistung in das Wechselstromnetz ($\text{Im}(U_i \times I_i) > 0$) oder induktiv durch Aufnahme einer Blindleistung aus dem Wechselstromnetz ($\text{Im}(U_i \times I_i) < 0$) betrieben werden. Sowohl in der Wechselrichter- als auch in der Gleichrichterbetriebsart kann der VSC kapazitiv oder induktiv betrieben werden.

Die Benennung „Spannungswidenkreis-Stromrichter“ wird verwendet, weil die Funktion des VSC auf dem Anschluss einer Spannungsquelle auf der Gleichstromseite basiert.

In Bild 2 ist auf der linken Seite eine Gleichspannungsquelle U_S dargestellt, an die ein Gleichstromwiderstand R_d , der den Widerstand des Gleichstromkreises repräsentiert, und ein Gleichstromkondensator angeschlossen sind. Der Gleichstrom-Parallelkondensator dient zur Stabilisierung der Gleichspannung U_d . In Abhängigkeit von der VSC-Topologie handelt es sich beim Gleichstrom-Speicherkondensator entweder um einen zwischen den beiden Polen angeschlossenen zentralen Gleichstrom-Speicherkondensator oder um mehrere innerhalb der Stromrichter-Phaseneinheiten verteilte Speicherkondensatoren. Die Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom findet im VSC statt, wie in Abschnitt 5 erklärt.

Auf der Wechselstromseite ist eine Schnittstelleninduktivität vorgesehen, die zwei Aufgaben hat: Erstens stabilisiert sie den Wechselstrom und zweitens ermöglicht sie die Steuerung der vom VSC abgegebenen Wirk- und Blindleistung, wie in 4.1.2 erläutert. Die Schnittstelleninduktivität kann in Form von Drosseln, Streuinduktivitäten in Transformatoren oder als eine Kombination dieser beiden realisiert werden. Der Gleichstromkondensator auf der Eingangsseite und die Wechselstrom-Schnittstelleninduktivität auf der Ausgangsseite sind wichtige Bauelemente für die vorschriftsmäßige Funktion eines VSC.

Auf der Wechselstromseite kann der VSC an ein passives oder ein aktives Wechselstromnetz angeschlossen sein. Ist der VSC wechselstromseitig an ein passives Netz angeschlossen, so kann der Energiefluss nur von der Gleichstromeingangsseite in Richtung der passiven Last auf der Wechselstromseite fließen. Ist jedoch die Wechselstromseite an ein aktives Wechselstromnetz angeschlossen, so kann der Energiefluss durch Steuerung der vom VSC abgegebenen Wechselspannung U_{conv} in beide Richtungen fließen.

Durch Steuerung des Phasenwinkels von U_{conv} lässt sich die Wirkleistung durch den VSC steuern, wie in 4.1.2.2 erläutert. Durch Steuerung der Spannungsamplitude von U_{conv} lässt sich die Blindleistung durch den VSC steuern, wie in 4.1.2.3 erläutert.

4.1.2 Prinzipien der Wirk- und Blindleistungsregelung

4.1.2.1 Allgemeines

Der VSC lässt sich als Äquivalent zu einem synchronen Generator ohne Trägheit betrachten, der in der Lage ist, die Wirkleistung und die Blindleistung getrennt zu regeln.

Der Austausch von Wirk- und Blindleistung zwischen einem VSC und dem Wechselstromnetz wird durch den Phasenwinkel und die Amplitude der VSC-Ausgangsspannung in Bezug auf die Spannung des Wechselstromnetzes geregelt.

Wirkleistung und Blindleistung stehen im Zusammenhang mit den Wechselspannungen U_L und U_{conv} des Wechselstromsystems bzw. des Stromrichters sowie mit dem Blindwiderstand X und dem Phasenwinkel δ zwischen diesen Spannungen, so wie in den folgenden Gleichungen ausgedrückt:

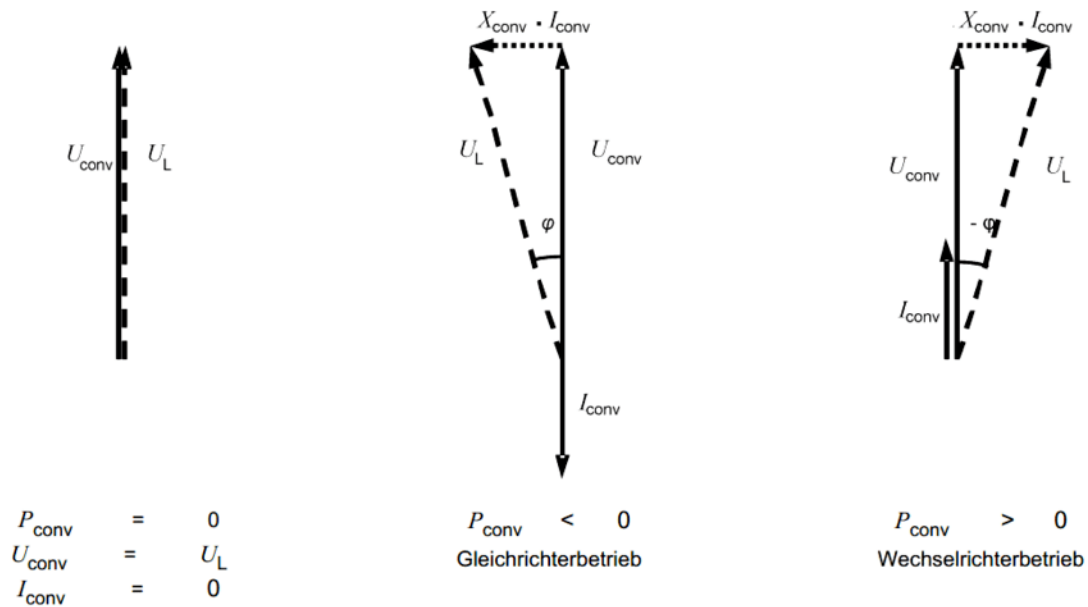
$$P = \frac{U_L \times U_{conv} \times \sin \delta}{X}$$

$$Q = \frac{U_L \times (U_L - U_{conv} \times \cos \delta)}{X}$$

Wenn U_{conv} mit der Netzspannung U_L in Phase und ihre Amplitude gleich der von U_L ist, gibt der VSC keinen Wechselstrom I_{conv} ab. In diesem Falle wird der Gleichstrom I_d null, und die Gleichstrom-Kondensatorspannung U_d wird gleich der Gleichstromquellenspannung U_S .

4.1.2.2 Prinzip der Wirkleistungsregelung

Das Prinzip der Wirkleistungsregelung ist in Bild 3 dargestellt, wobei die Wirkleistung durch die Schnittstelleninduktivität mittels Einstellung des Phasenwinkels der VSC-Spannung geregelt wird.

**Bild 3 – Prinzip der Wirkleistungsregelung**

Wenn der Winkel der VSC-Ausgangsspannung der Wechselstrom-Netzspannung voreilt, speist der VSC Wirkleistung in das Wechselstromnetz ein, d. h. er arbeitet als Wechselrichter. Auf der Gleichstromseite wird der Gleichstromquelle ein gleichwertiger Strom entnommen, und die Spannung U_d nimmt in Übereinstimmung mit dem Ohmschen Gesetz ab ($U_d = U_s - R_d \cdot I_d$).

Wenn dagegen die VSC-Ausgangsspannung der Spannung des Wechselstromnetzes nacheilt, nimmt der VSC Wirkleistung aus dem Wechselstromnetz auf, d. h. er arbeitet als Gleichrichter. Auf der Gleichstromseite wird ein gleichwertiger Strom in die Gleichstromquelle eingespeist, und die Spannung U_d steigt in Übereinstimmung mit dem Ohmschen Gesetz an ($U_d = U_s + R_d \cdot I_d$).

Ist der VSC mit einer passiven Last verbunden, so wird ein vom Ohmschen Gesetz bestimmter Ausgangswechselstrom $I_{\text{conv}} = U_{\text{conv}}/Z$ aus dem VSC entnommen. Und wiederum wird ein gleichwertiger Gleichstrom aus der Quelle entnommen und fällt die Spannung U_d am Gleichstromkondensator auf einen vom Ohmschen Gesetz bestimmten Wert ab. An der Wechselstromseite kann keine Wirkleistung entnommen werden, da es sich um einen passiven Wechselstromkreis handelt.

4.1.2.3 Prinzip der Blindleistungsregelung

Das Prinzip der Blindleistungsregelung ist in [Bild 4](#) dargestellt, wobei die Blindleistung durch die Schnittstelleninduktivität mittels Einstellung der Amplitude der Ausgangswechselspannung des VSC geregelt wird.

Ist die Amplitude der VSC-Ausgangsspannung U_{conv} größer als die Netzwechselspannung U_L , so speist der VSC eine Blindleistung in das Wechselstromnetz ein, d. h. er arbeitet im kapazitiven Modus. Ist die Amplitude der VSC-Ausgangsspannung kleiner als die Netzwechselspannung, so nimmt der VSC Blindleistung aus dem Wechselstromnetz auf, d. h. er arbeitet im induktiven Modus.

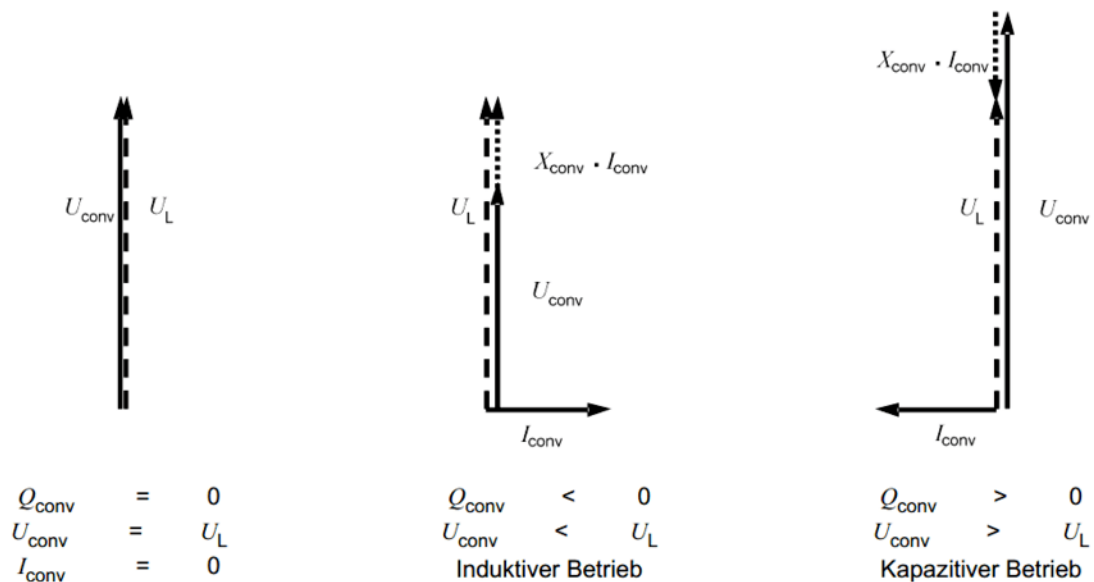


Bild 4 – Prinzip der Blindleistungsregelung

4.1.3 Betriebsprinzipien einer VSC-Übertragungsanordnung

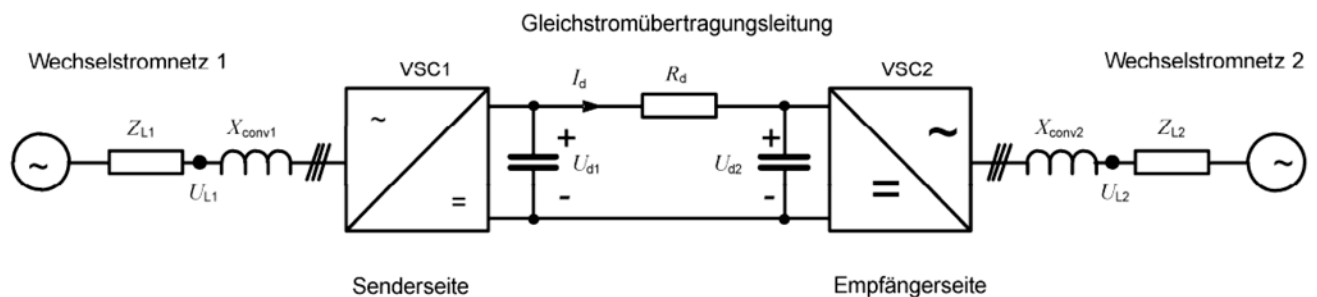


Bild 5 – Punkt-zu-Punkt-VSC-Übertragungsanordnung

Die in Bild 5 dargestellte Punkt-zu-Punkt-VSC-Übertragungsanordnung umfasst zwei VSC, die auf der Gleichstromseite über eine Gleichstromübertragungsleitung miteinander verbunden und auf der Wechselstromseite an zwei verschiedene Wechselstromnetze angeschlossen sind. Die wesentlichen Eigenschaften eines VSC wurden in den vorigen Abschnitten beschrieben. Eine dieser Eigenschaften ist, dass die Gleichspannungspolarität immer gleich bleibt (im Gegensatz zu LCC-HGÜ, bei dem die Polarität der Gleichspannung von der Richtung der Energieübertragung abhängt). Daher wird die Richtung des Energieflusses auf der Gleichstromleitung von der Richtung des Gleichstroms bestimmt. In Bild 5 verlaufen der Stromfluss und der Energiefluss vom VSC1 (der Sender- oder Gleichrichterseite) zum VSC2 (der Empfänger- oder Wechselrichterseite) der Gleichstromleitung.

Ein Gleichstrom fließt immer vom höheren zum niedrigeren Gleichspannungsniveau. Die Gleichspannung am Senderende der Gleichstromleitung muss daher höher sein als die Gleichspannung am Empfängerende. Der Wert des Stroms wird durch das Ohmsche Gesetz als der durch den Widerstand in der Gleichstromleitung geteilte Spannungsunterschied zwischen Sender- und Empfängerseite bestimmt $I_d = (U_{d1} - U_{d2})/R_d$.

A2 Zum Beispiel lässt sich der Energiefluss auf der Gleichstromleitung durch Konstanthaltung der Gleichspannung am empfängerseitigen Stromrichter (dem Wechselrichter) steuern und indem man den senderseitigen Stromrichter (den Gleichrichter) den Gleichstrom regeln lässt.

4.1.4 Anwendungen der VSC-Übertragung

Die Hauptanwendungsgebiete der HGÜ sind in der Regel die Verbindung von asynchronen Wechselstromnetzen und die Fernübertragung über Freileitungen und Kabel. Die folgenden charakteristischen Merkmale der VSC-Übertragung sind entscheidend für verschiedene Anwendungen.

- Je geringer die Anzahl an externen Geräten, wie z. B. Wechselstrom-Oberschwingungsfiltern, desto kompakter die Bauweise der betreffenden VSC-Stationen. Kleine Anschlussflächen sind von Vorteil für räumlich begrenzte Anwendungen wie z. B. Anlagen in Stadtzentren oder auf abgelegenen Plattformen vor der Küste.
- Da die VSC-Übertragung auf selbstgeführtem Betrieb basiert, sind Anwendungen mit potentialgetrennten und schwachen Wechselstromnetzen möglich. Während des Normalbetriebs ermöglicht der VSC die Steuerung von Spannung und Frequenz des Wechselstromnetzes. Der Betrieb bei Wechselstromfehlerzuständen ist ein Hauptkriterium für VSC. Die Fähigkeit von VSC, Fehlerströme einzuspeisen, erleichtert den Schutz von Wechselstromnetzen und die Fehlerabschaltung. Beispiele sind der Anschluss von abgelegenen Windenergieparks, Öl- und Gasplattformen und abgelegenen Bergbaubetrieben.
- A2 | – In den meisten Fällen funktioniert die VSC-Übertragung mit einer gleichbleibenden Gleichspannungspolarität. Eine Richtungsumkehr des Energieflusses erfordert die Umkehrung des Gleichstroms. Im Falle der parallelen Zusammenschaltung von Wechselstromnetzen über Wechselstrom- und Gleichstromkabel liefern schnelle Energieumkehrungen über die Gleichstromsteuerung ein genaues Maß für die Laststromstabilisierung zwischen den Wechselstromnetzen. Da sich die Polarität der Gleichspannung nicht umkehrt, lassen sich Mehrpolsysteme mit VSC leichter realisieren als mit LCC-HGÜ.

4.2 Vorgesehene Lebensdauer

Die Wahl der VSC-Übertragung anstelle von LCC-HGÜ, Wechselstromübertragung oder lokaler Stromerzeugung beruht in der Regel auf ihren finanziellen, technischen oder ökologischen Vorteilen. Bei der Beurteilung unterschiedlicher Techniken ist es wichtig, jeweils die gesamten Lebenszykluskosten miteinander zu vergleichen.

Die technisch mögliche Lebensdauer von Übertragungssystemen ist in der Regel sehr lang und beträgt 30 Jahre oder mehr. Eine Investition sollte jedoch nur so lange andauern, wie sie den höchsten Kapitalwert liefern kann, was als die „optimale Lebensdauer“ bezeichnet wird. Die optimale Lebensdauer ist immer kleiner oder gleich der technisch möglichen Lebensdauer.

4.3 VSC-Übertragungskonfigurationen

4.3.1 Allgemeines

Bei der VSC-Übertragung gibt es mehrere Möglichkeiten für die Gleichstromkreis- und -stromrichtergruppen.

Jede VSC-Station kann aus einer einzelnen Stromrichtergruppe einer Phaseneinheitstopologie aufgebaut sein, die zu einer monopolen Übertragungsanordnung führt.

Bei einigen Anwendungen kann es erforderlich oder von Vorteil sein, mehrere Stromrichtergruppen zusammenzufassen, die jeweils derselben Stromrichter-Phaseneinheitstopologie entsprechend aufgebaut sind. So kann es z. B. technisch unmöglich oder unwirtschaftlich sein, die Leistungs-, Strom- oder Spannungsbemessungswerte mit einer einzigen Stromrichtergruppe zu erreichen. Um dafür zu sorgen, dass die Verfügbarkeit verbessert wird und Stromausfälle im Fehlerfall begrenzt bleiben, können mehrere Stromrichtergruppen zusammengeschaltet werden.

Zwei oder mehr Stromrichtergruppen können auf verschiedene Art und Weise zusammengefasst werden. Die Gleichstromanschlüsse der Stromrichtergruppen können parallel geschaltet werden, um hohe Ausgangsströme zu erhalten, oder in Reihe, um hohe Ausgangsspannungen zu erreichen.

4.3.2 Gleichstromkreiskonfigurationen

Für die VSC-Übertragung können sowohl Kabel als auch Freileitungen verwendet werden. Jedoch sind mit dem Grundprinzip der VSC-Übertragung verschiedene Aspekte verbunden, die Einfluss auf die Auswahl haben können.

- Da ein VSC in der Regel nur genau eine Gleichspannungspolarität ermöglicht, braucht das Kabel nicht für die Umkehrung der Spannungspolarität ausgelegt zu sein. Dies ermöglicht die Verwendung von Gleichstromkabeln mit Isolierung aus extrudiertem vernetzten Polyethylen (XLPE). Bei Gleichstromkabeln werden Fehler als Ausnahmesituation betrachtet, die zu einem dauerhaften Fehler des betreffenden Bereichs und einer Unterbrechung der Stromübertragung führt.
- Da Freileitungen immer dem Risiko von Blitzschlag und Verschmutzung ausgesetzt sind, sind Fehler in ihrem Verlauf wahrscheinlich. Die meisten Leitungsausfälle sind temporär, und die Übertragung wird sofort wieder aufgenommen, wenn der Fehler behoben und die Luftisolierung wiederhergestellt ist.

Eine Kurzkopplungskonfiguration stellt einen Sonderfall der VSC-Übertragung dar, in dem die Gleichstromübertragungsstrecke gleich null ist.

4.3.3 Monopolare Konfiguration

4.3.3.1 Allgemeines

Der VSC kann in verschiedenen monopolaren Konfigurationen betrieben werden:

- symmetrischer Monopol;
- asymmetrischer Monopol mit metallischer Rückleitung;
- asymmetrischer Monopol mit Erdrückleitung.

4.3.3.2 Symmetrischer Monopol

In einem symmetrischen Monopol haben die Ausgangsgleichspannungen den gleichen Betrag, jedoch entgegengesetzte Vorzeichen. Der Mittelpunkt des Gleichstromkreises wird entweder durch Kondensatoren, wie in Bild 6 gezeigt, oder mit anderen Mitteln geerdet.

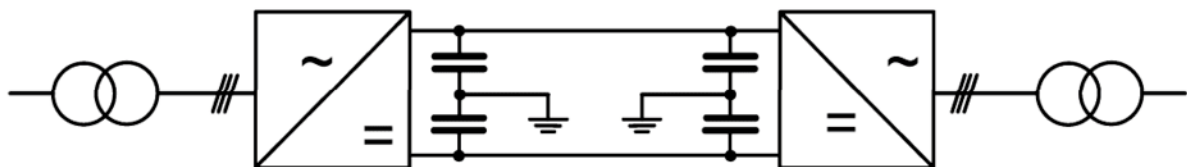


Bild 6 – VSC-Übertragung mit einem symmetrischen Monopol

4.3.3.3 Asymmetrischer Monopol

Wie auf den Bildern 7 und 8 dargestellt, ist der gleichstromseitige Ausgang des Stromrichters bei asymmetrischen Monopolen unsymmetrisch, wobei in der Regel eine Seite geerdet ist. Das Übertragungssystem kann mit metallischer Rückleitung oder Erdrückleitung betrieben werden.

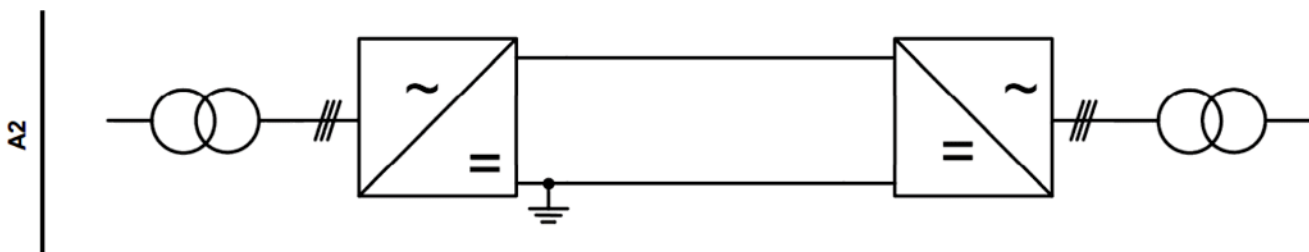


Bild 7 – VSC-Übertragung mit einem asymmetrischen Monopol mit metallischer Rückleitung

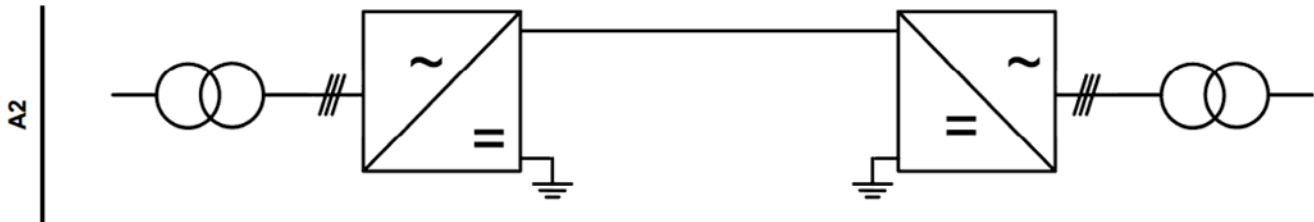


Bild 8 – VSC-Übertragung mit einem asymmetrischen Monopol mit Erdrückleitung

4.3.4 Bipolare Konfiguration

Zwei asymmetrische Stromrichter können in einer bipolaren Konfiguration entweder mit Erdrückleitung oder mit metallischer Rückleitung miteinander verbunden werden.

Die Auslegung der Sternpunkt-Rückleitungssammelschiene kann in einem ähnlichen Prozess erfolgen, wie er üblicherweise bei bipolaren LCC-HGÜ-Anordnungen zur Anwendung kommt.

Für den Fall, dass ein Stromrichter oder eine Gleichstromleitung bzw. ein Gleichstromkabel ausfällt, ist in der Regel eine Möglichkeit vorgesehen, das restliche System in asymmetrischem Monopolbetrieb zu betreiben.

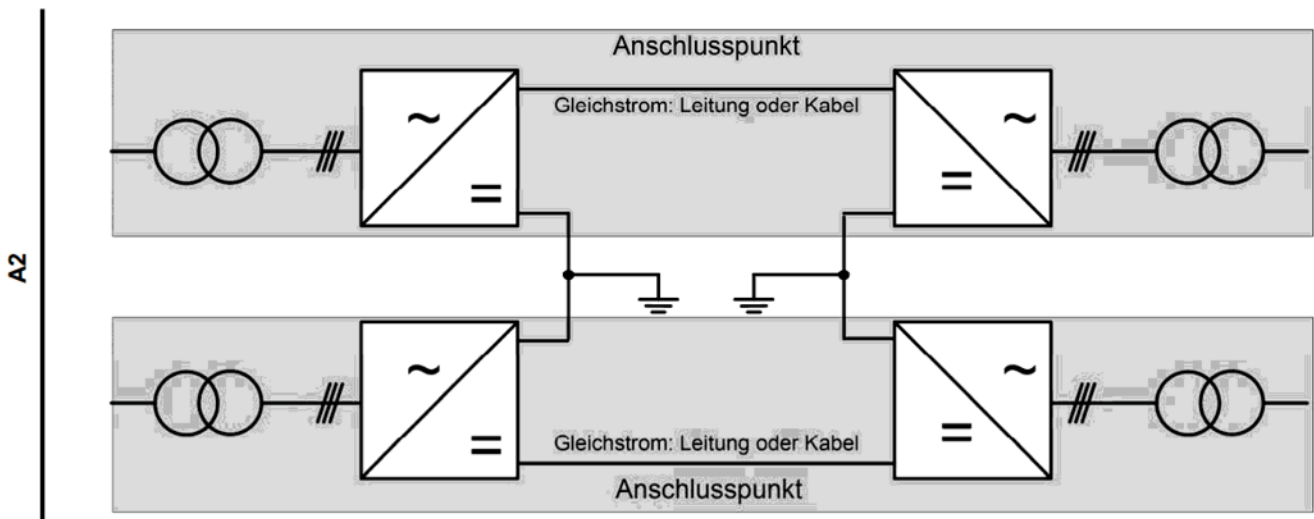


Bild 9 – VSC-Übertragung in bipolarer Konfiguration

4.3.5 Parallelschaltung von zwei Stromrichtern

Die Gleichspannungsanschlüsse von zwei VSCs können parallel geschaltet werden, was zu hohen Gleichströmen führt.

Um unerwünschte Wechselwirkungen zwischen den beiden parallel geschalteten Stromrichtern zu verhindern, muss zwischen ihnen eine angepasste Impedanz vorgesehen sein.

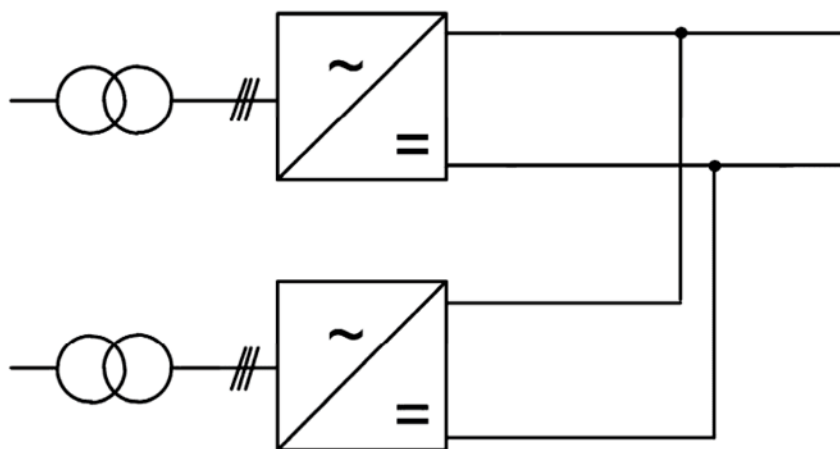


Bild 10 – Parallelschaltung von zwei Stromrichtergruppen

Wird die Parallelschaltung von Stromrichtergruppen gewählt, so ist eine Steuerung auf hoher Ebene erforderlich, um die Stromreihenfolgen zwischen den Stromrichtergruppen zu koordinieren.

Um eine hohe Zuverlässigkeit auch im Falle von Fehlern bei internen Stromrichtern zu erreichen, sind zusätzliche Schalt- und Trenneinrichtungen erforderlich, um fehlerhafte Stromrichtergruppen isolieren zu können. Der gemeinsame Gleichstrom-Übertragungskreis hat naturgemäß keine Redundanz in Bezug auf Gleichstromleitungsfehler.

4.3.6 Reihenschaltung von zwei Stromrichtern

Zwei VSCs können auf ihrer Gleichstromseite in Reihe geschaltet werden. Dieser Ansatz kann dazu dienen, das Gleichspannungsleistungsvermögen einer VSC-Übertragung in Bezug auf das Leistungsvermögen der einzelnen Stromrichtergruppen zu erweitern.

In Bezug auf die Reihenschaltung hat die in 4.3.4 beschriebene bipolare Anordnung die größte technische Relevanz.

4.3.7 Parallel- und Reihenschaltung von mehr als zwei Stromrichtern

Grundsätzlich ist es auch möglich, mehr als zwei Stromrichtergruppen parallel oder in Reihe zu schalten. Jede dieser Stromrichtergruppen wird entweder mit getrennten Wicklungen eines gemeinsamen Transformators oder mit getrennten Transformatoren verbunden.

In der Regel muss die erhöhte Komplexität von Mehrfachventilen im Hinblick auf die für das jeweilige Projekt geltenden Anforderungen bewertet werden.

4.4 Halbleiter für die VSC-Übertragung

Im Normalbetrieb von Spannungszwischenkreis-Stromrichtern sind die Leistungshalbleiter einer unipolaren Spannung ausgesetzt und müssen in der Lage sein, den Strom in beiden Richtungen zu leiten. Daher sind Halbleiterschalter mit Ein- und Ausschaltfähigkeit und mit der Fähigkeit zum Sperren hoher Spannungen (von in der Regel mehreren kV) in der Vorwärtsrichtung erforderlich.

Gegenwärtig werden diese Anforderungen durch die Parallelschaltung eines steuerbaren Schalters und einer sogenannten Freilaufdiode erreicht, wie in Bild 11 gezeigt.



Bild 11 – Symbol eines Ausschalt-Halbleiterbauelements und der zugehörigen Freilaufdiode

Für die VSC-Technik eignen sich mehrere unterschiedliche Halbleiterschalter, in den bisher realisierten kommerziellen VSC-HGÜ-Projekten werden aber nur IGBTs eingesetzt (Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode, wie in Bild 12 gezeigt). Aufgrund dessen konzentriert sich die Beschreibung von Halbleiterschaltern in diesem Dokument auf IGBTs, obgleich auch andere Halbleiter, wie z. B. GTO und IGCT, verwendet werden können.

ANMERKUNG Die für die VSC-Übertragung geeigneten Halbleiterbauelemente lassen sich in zwei Kategorien einteilen: den „Transistor“-Typ, zu dem die IGBTs gehören, und den „Thyristor“-Typ, zu dem die GTOs und IGCTs gehören. Bauelemente vom Typ „Thyristor“ können mit größeren Strömen effizienter umgehen als die Bauelemente vom Typ „Transistor“, ihnen fehlen aber bestimmte Steuereigenschaften, wie z. B. die Fähigkeit, das Bauelement mit Hilfe aktiver Gate-Steuerung stufenlos zwischen den Zuständen Aus und Ein zu schalten. Darüber hinaus haben Bauelemente vom Typ „Thyristor“ einen höheren Gate-Stromverbrauch als Bauelemente vom Typ „Transistor“, was ihren Einsatz in Hochspannungsanwendungen wie z. B. der VSC-Übertragung erschwert.

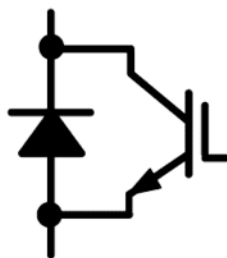


Bild 12 – Symbol eines IGBT und der zugehörigen Freilaufdiode

Wie alle Dioden haben die parallel zum steuerbaren Schalter geschalteten Freilaufdioden beim Abschalten einen signifikanten Sperrverzögerungsstrom. Sowohl die IGBTs als auch die Freilaufdioden müssen mit diesen transienten Schaltphänomenen, d. h. im Besonderen mit Strom- und Spannungsgradienten, zurechtkommen.

Bei einem IGBT handelt es sich um ein spannungsgesteuertes Bauelement; im Gate-Anschluss können nur kapazitive Ströme fließen. Die Einheit lässt sich zu jedem Zeitpunkt, sogar während der Schalttransienten, steuern, d. h. der Laststrom kann durch die Gate-Spannung beeinflusst werden.

IGBTs sind innerhalb festgelegter Betriebsbedingungen kurzschlussfest. Das bedeutet, dass der IGBT den Laststrom im Falle eines Kurzschlusses auf einige Kiloampere begrenzt. Innerhalb weniger Mikrosekunden muss ein entsprechendes Gate-Ausschaltsignal umgesetzt werden, um den Fehlerstrom auszuschalten und die Einheit thermisch nicht übermäßig zu beanspruchen.

Die Schaltzeiten von IGBTs liegen im Bereich einiger Mikrosekunden und darunter. Außerdem können die Schaltflanken über die Gate-Ansteuerschaltung eingestellt werden, wodurch sich optimale Wellenformen in Bezug auf Überspannungsspitzen und Schaltverluste erzielen lassen. In vielen Fällen ist der Einsatz von Überspannungsschutzelementen (en: snubbers) nicht erforderlich, um die Anstiegsgeschwindigkeit von Strom und Spannungen innerhalb annehmbarer Grenzen zu halten. Die Gate-Ansteuerungen für IGBTs können ziemlich einfach aufgebaut sein, da sie nur einige wenige Watt an Steuerleistung am Gate bereitstellen müssen.

Hochleistungs-IGBTs bestehen aus parallel geschalteten Chips, um die erforderliche Strombelastbarkeit zu erzielen. Die Chips sind in Presspacks oder Modulgehäusen montiert. In den meisten Fällen befinden sich die FWD-Chips im selben Gehäuse.