

ET+A

Leistungselektronik und elektrische Antriebe

Kapitel 11 Selbstgeführte Wechselrichter

Adrian Omlin

Inhaltsverzeichnis Kapitel 11

11	DER SELBSTGEFÜHRTE WECHSELRICHTER.....	3
11.1	Einführung.....	3
11.2	Das Phasenmodul	3
11.3	Die einphasige Brückenschaltung	5
11.4	Steuerverfahren.....	10
11.4.1	Grundfrequenztaktung	10
11.4.2	Gepulste Wechselrichter inkl. PWM	10
11.4.3	Toleranzbandsteuerung.....	13
11.5	Dreiphasige Wechselrichter	14

11 Der Selbstgeführte Wechselrichter

11.1 Einführung

Im Gegensatz zu den fremdgeführten Stromrichtern benötigen selbstgeführte Schaltungen keine externe Spannung, welche die Kommutierung ermöglicht. Die Ein- und Ausschaltzeitpunkte der Halbleiter werden von der Ansteuerung bestimmt. Auch die bereits behandelten Gleichstromsteller gehören zu dieser Schaltungsart.

11.2 Das Phasenmodul

Das Grundelement des selbstgeführten Wechselrichters ist das so genannte Phasenmodul (oder Phasenbaustein). Es besteht aus zwei abschaltbaren Leistungshalbleitern mit je einer antiparallelen Diode. Als Leistungshalbleiter kommen die in Kapitel behandelten Abschaltelemente in Frage (z.B. GTO, IGCT, IGBT, FET). Welcher Typ zum Einsatz kommt, wird vor allem durch die Leistung und die Schaltfrequenz bestimmt. In den folgenden Bildern sind jeweils der im mittleren Leistungsbereich immer mehr verbreitete IGBT oder ein Schalter dargestellt.

Die antiparallele Diode ermöglicht einen Stromfluss in Gegenrichtung. Weiter hat sie zur Folge, dass der abschaltbare Leistungshalbleiter keine negative Spannung sperren muss.

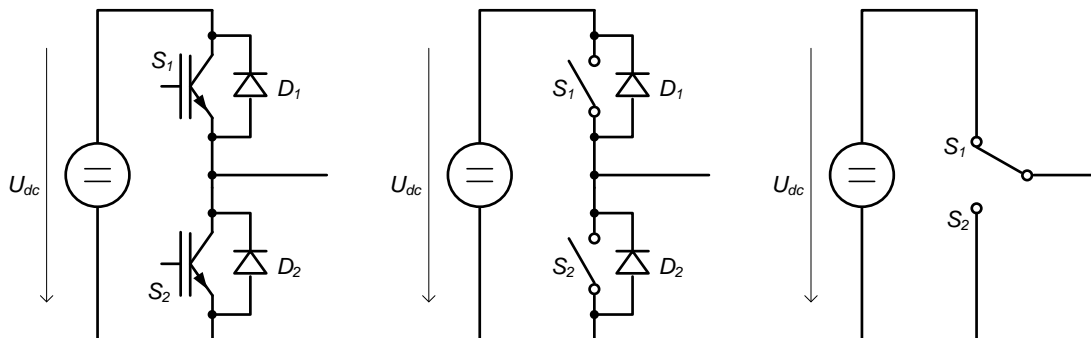


Abbildung 1: Phasenmodul. Links: mit IGBT; Mitte: Schalter statt abschaltbarer Leistungshalbleiter; rechts: vereinfachte Darstellung bei Betrieb im Gegentakt.

Abbildung 1 zeigt links ein Phasenmodul zusammen mit der speisenden Gleichspannungsquelle. Eingesetzt sind IGBTs. In der Mitte sind die beiden IGBTs durch Schalter ersetzt. Die beiden Schalter werden normalerweise im Gegentakt betrieben. Das bedeutet, dass immer einer der beiden Schalter geschlossen und der andere offen ist. So ist durch die Schalterstellung bestimmt, ob die antiparallele Diode leiten kann oder nicht. Ist beispielsweise der obere Schalter S_1 offen und der untere Schalter S_2 geschlossen, liegt an der Diode D_1 die Spannung U_{dc} in Sperrrichtung an und D_1 sperrt. Je nach Stromrichtung in der Last fließt der Strom durch S_2 oder D_2 .

Ist dagegen Schalter S_1 geschlossen, sperrt Diode D_2 , und es fließt je nach Stromrichtung in der Last ein Strom durch S_1 oder D_1 .

Ein Phasenmodul, das im Gegentakt betrieben wird, kann also funktionsmässig als Umschalter, wie in Abbildung 1 rechts dargestellt, betrachtet werden.

Grundsätzlich kann bereits mit einem einfachen Phasenmodul ein Wechselrichter aufgebaut werden. Dazu ist ein Mittelabgriff an der speisenden Gleichspannungsquelle notwendig. (Oder ein Transformator mit Mittelabgriff auf der AC-Seite.)

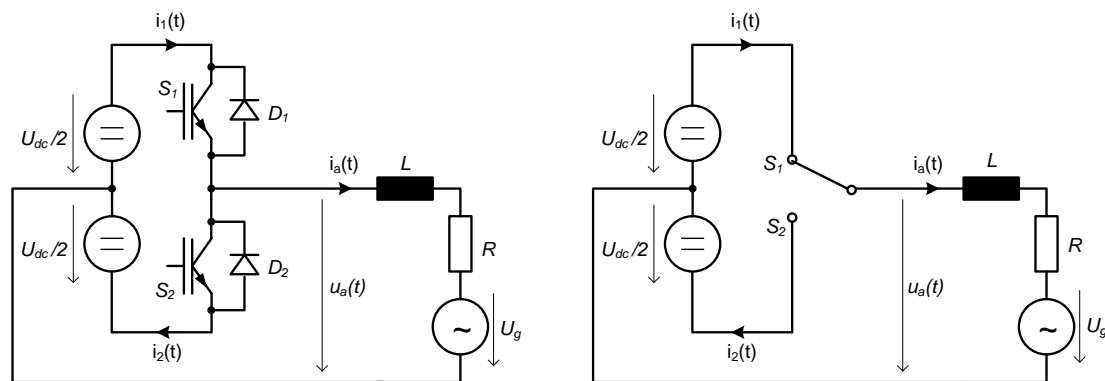


Abbildung 2: Wechselrichter in Mittelpunktschaltung.

Ist Halbleiter S_1 eingeschaltet, gilt $u_a = +U_{dc}/2$, ist Halbleiter S_2 eingeschaltet, gilt $u_a = -U_{dc}/2$. Die Last sieht also eine rechteckförmige Spannung u_a . Über die Schaltfrequenz der Halbleiter kann die Frequenz der rechteckförmigen Wechselspannung u_a eingestellt werden. Je nach Typ der Last stellt sich ein entsprechender Strom ein. Die Abbildung 3 zeigt Stromverläufe für eine reine R-Last ($L = 0$ und $U_g = 0$) sowie für eine reine L-Last ($R = 0$, $U_g = 0$) bei Grundfrequenztaktung. Ist der Strom i_1 oder i_2 positiv, fließt er durch den abschaltbaren Leistungshalbleiter, ist er negativ, fließt er durch die Diode. Bei reiner R-Last führen die Dioden keinen Strom.

Analog zur „Standard-Gleichstromlast“ kann die in Abbildung 2 dargestellte Last bestehend aus L , R und einer sinusförmigen Gegenspannungsquelle als „Standard-Wechselstromlast“ bezeichnet werden. Die Ersatzschaltung kann beispielsweise eine Synchronmaschine, eine Asynchronmaschine oder ein Wechselspannungsnetz darstellen. Auch kann damit durch Nullsetzen einzelner Komponenten eine reine L-Last oder eine reine R-Last nachgebildet werden.

Nebst dem Nachteil, dass ein Mittelabgriff an der Gleichspannungsquelle nötig ist, werden auch die Halbleiter spannungsmässig schlecht ausgenutzt. Sie müssen die volle Zwischenkreisspannung U_{dc} sperren, während die Last nur $+U_{dc}/2$ oder $-U_{dc}/2$ sieht. In der Praxis werden für einphasige Lasten deshalb fast ausschliesslich Schaltungen mit zwei Phasenmodulen, so genannte H-Brücken, eingesetzt.

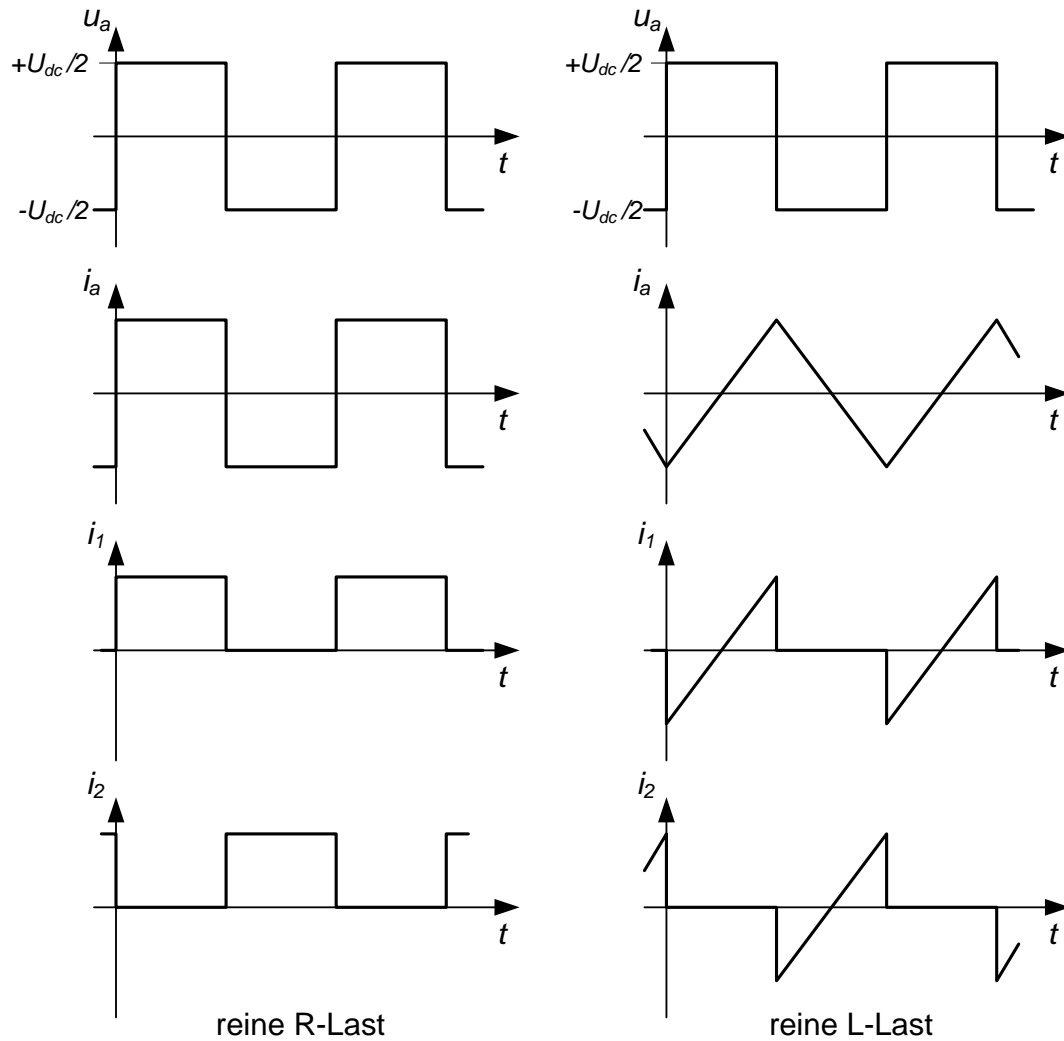


Abbildung 3: Kurvenverläufe mit reiner R- oder L-Last in Mittelpunktschaltung.

11.3 Die einphasige Brückenschaltung

Wie bereits erwähnt, hat die Brückenschaltung bei einphasigen Anwendungen die grösste praktische Bedeutung. In Abbildung 4 ist sie mit IGBTs, in Abbildung 5 als vereinfachte Darstellung mit Schaltern dargestellt.

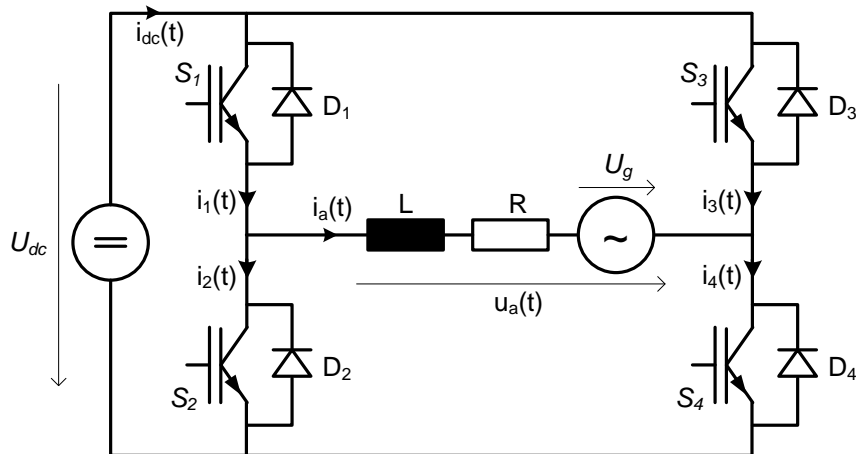


Abbildung 4: Wechselrichter in Brückenschaltung mit IGBTs.

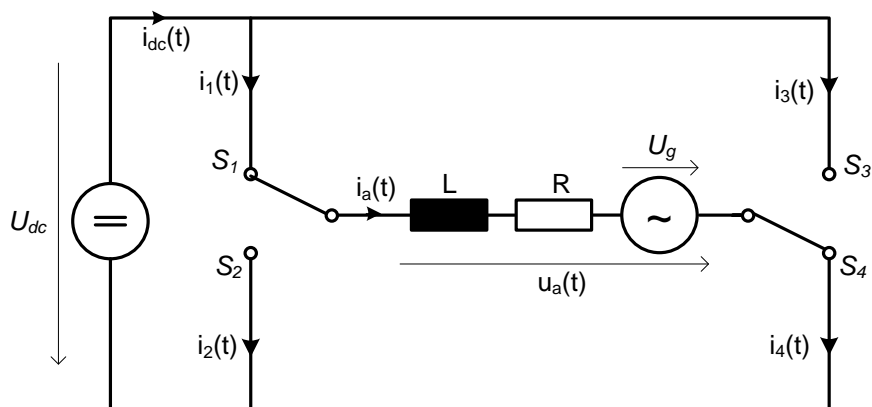


Abbildung 5: Wechselrichter in Brückenschaltung.

Die Brückenschaltung kann im Zweipunktbetrieb arbeiten. Es sind dabei jeweils Schalter S_1 und S_4 oder S_2 und S_3 geschlossen. (In Abbildung 5 sind die Umschalter entsprechend auf Position S_1 und S_4 oder S_2 und S_3 .) Die Ausgangsspannung u_a ist entweder $+U_{dc}$ oder $-U_{dc}$. Die Kurvenverläufe für reine R- und reine L-Last sind in Abbildung 6 dargestellt. Sie gleichen denjenigen der Mittelpunktsschaltung. Einzig die Spannung ist doppelt so gross. Somit werden die Halbleiter spannungsmässig besser ausgenutzt. (Bei gleicher Last würden natürlich auch die Ströme grösser).

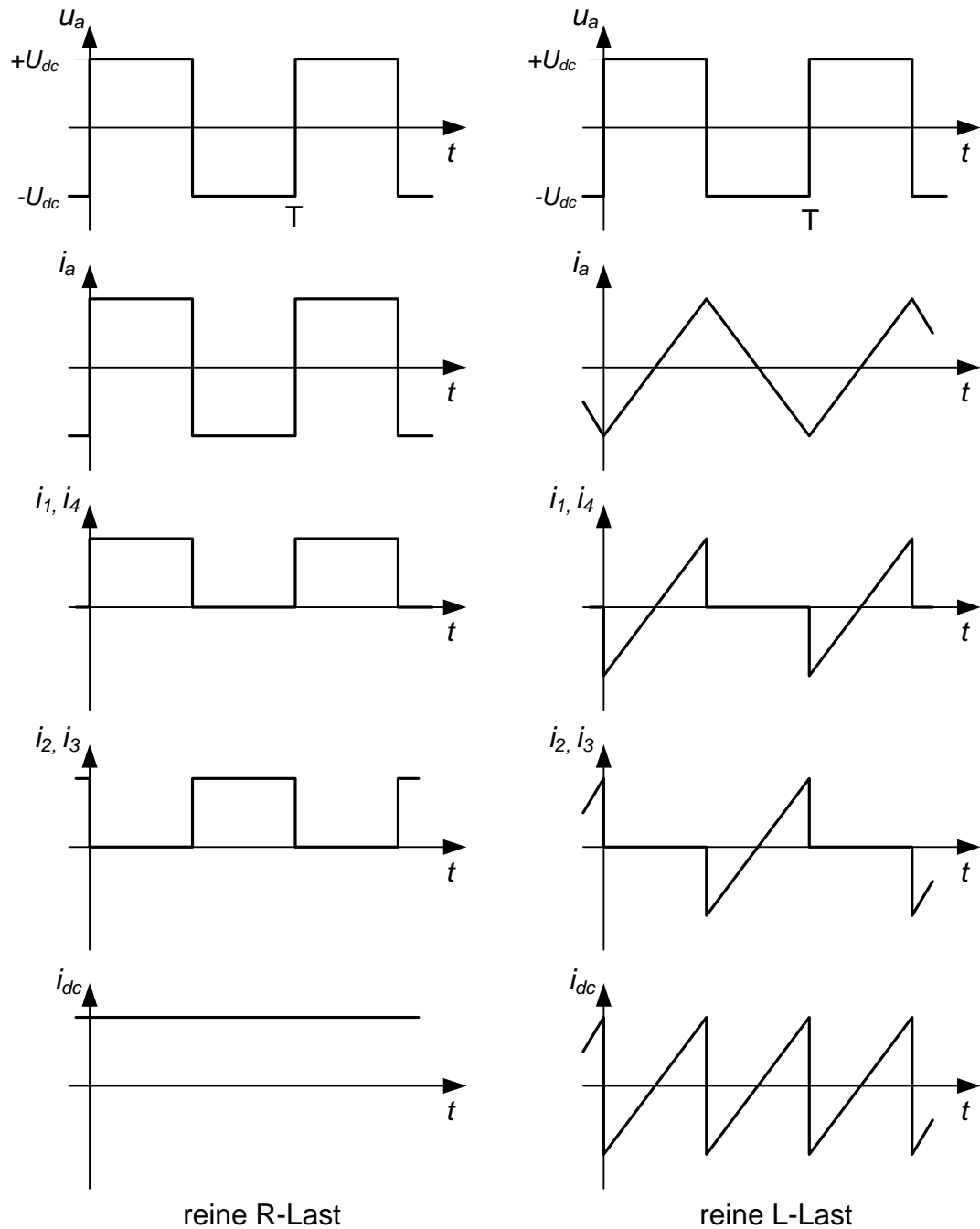


Abbildung 6: Kurvenverläufe der Brückenschaltung mit reiner R- oder L-Last.

Dreipunktbetrieb:

Die Brückenschaltung bietet im Vergleich zur Mittelpunktsschaltung einen weiteren Freiheitsgrad: es ist auch der so genannte Dreipunktbetrieb möglich, in dem zusätzlich die Zustände mit geschlossenen Schaltern S_1 und S_3 oder S_2 und S_4 vorkommen. Wenn diese Zustände geschaltet sind, ist die Ausgangsspannung u_a 0.

Durch die Wahl von α lässt sich die Amplitude der Grundschiwingung der Ausgangsspannung u_a einstellen.

Bei Dreipunktbetrieb beträgt die Amplitude \hat{U}_{a1} der Grundschiwingung der Ausgangsspannung u_a :

$$\hat{U}_{a1} = \frac{4}{\pi} U_{dc} \cos \alpha$$

Bei Zweipunktbetrieb, die auch als Spezialfall des Dreipunktbetriebs mit $\alpha = 0$ betrachtet werden kann, beträgt sie somit:

$$\hat{U}_{a1} = \frac{4}{\pi} U_{dc}$$

In der Ausgangsspannung treten auch Oberschwingungen auf, und zwar alle Ungeradzahligen. Beim Zweipunktbetrieb ist die Amplitude der v -ten Oberschiwingung jeweils um $1/v$ kleiner als diejenige der Grundschiwingung. Im Dreipunktbetrieb können die Amplituden der Oberschwingungen mit folgender Formel berechnet werden:

$$\hat{U}_{av} = \frac{4}{\pi} U_{dc} \cdot \frac{1}{v} \cos(v \cdot \alpha) \text{ mit } v = 3, 5, 7, 9, \dots$$

Abbildung 7 zeigt als Vergleich von Zwei- und Dreipunktbetrieb die Kurvenverläufe für beide Fälle bei reiner L-Last.

Beim Dreipunktbetrieb können für die Zeitbereiche, bei denen die Ausgangsspannung u_a null ist, die Zustände S_1 und S_3 oder S_2 und S_4 geschaltet werden. In der Praxis wird darauf geachtet, dass der Strom gleichmässig auf die Halbleiter verteilt wird und dass die Halbleiter möglichst wenig schalten. Die für dieses Beispiel gewählten Zustände sind zuoberst im Bild angegeben.

Wenn die Zustände mit $u_a = 0$ geschaltet sind, ist der Strom in der DC-Quelle ebenfalls null.

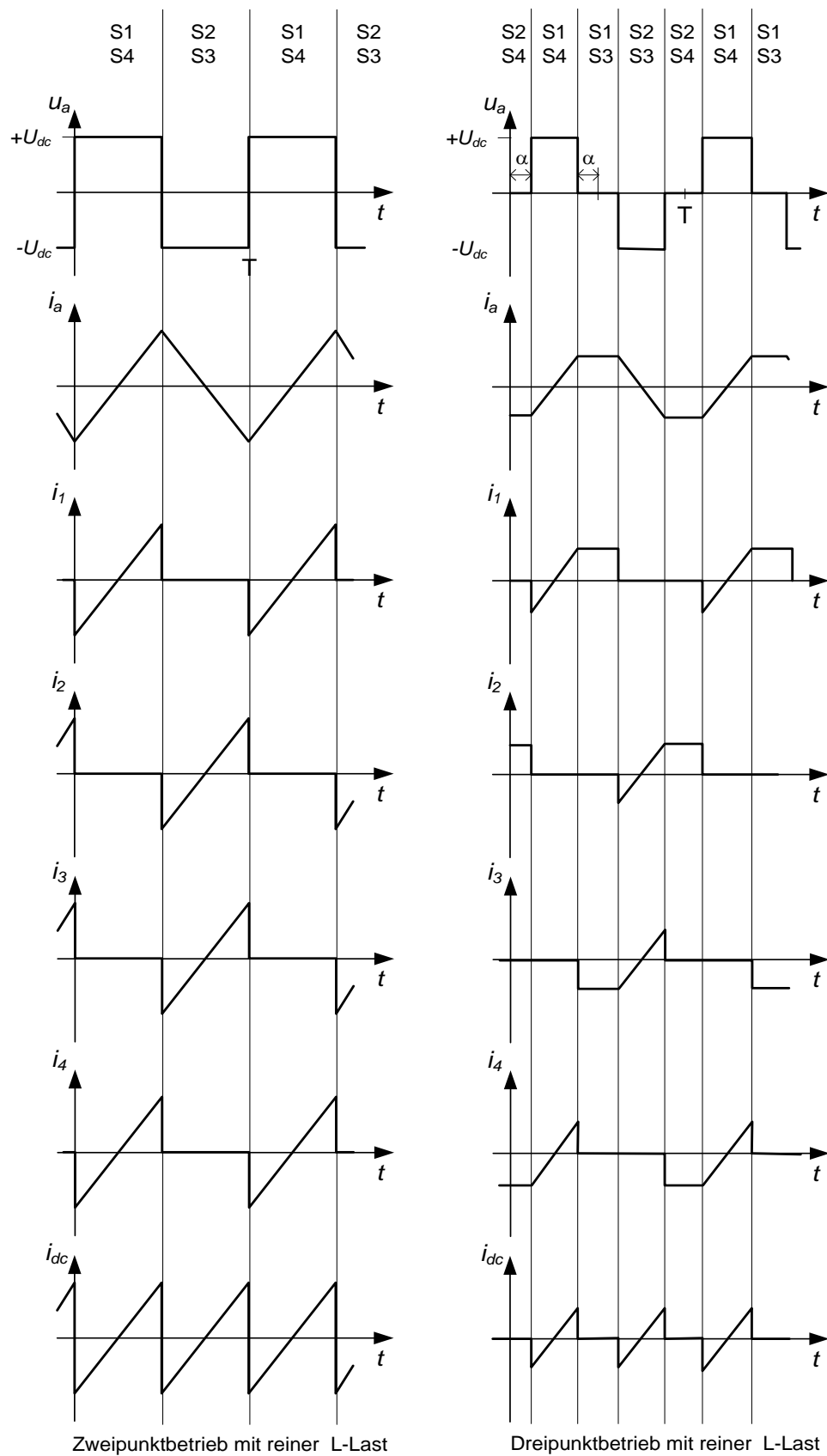


Abbildung 7: Brückenschaltung mit L-Last im Zwei- und Dreipunktbetrieb.

11.4 Steuerverfahren

11.4.1 Grundfrequenztaktung

Entspricht die Grundfrequenz der Wechselrichter-Ausgangsspannung der Schaltfrequenz der Halbleiter, spricht man von Grundfrequenztaktung. Dazu gehören alle in den vorhergehenden Unterkapiteln betrachteten Kurvenverläufe.

Im Zweipunktbetrieb kann durch das Takten nur die Frequenz, nicht aber die Amplitude der Ausgangsspannung eingestellt werden. Der Dreipunktbetrieb bietet zusätzlich die Möglichkeit, die Amplitude einzustellen.

11.4.2 Gepulste Wechselrichter inkl. PWM

Beim gepulsten Betrieb werden die Halbleiter während einer Ausgangsperiode mehrmals geschaltet. Durch mehrmaliges Pulsen in jeder Halbwelle werden zwar die Schaltverluste in den Halbleitern grösser, die in der Ausgangsspannung entstehenden Oberschwingungen werden aber zu höheren Frequenzen hin verschoben. Die Stromoverschwingungen werden bedingt durch die in der Last praktisch immer vorhandene Induktivität kleiner. Durch die Wahl der Pulsbreite lässt sich die Amplitude der Grundschiwingung der Ausgangsspannung einstellen.

Fixe Pulsbreite:

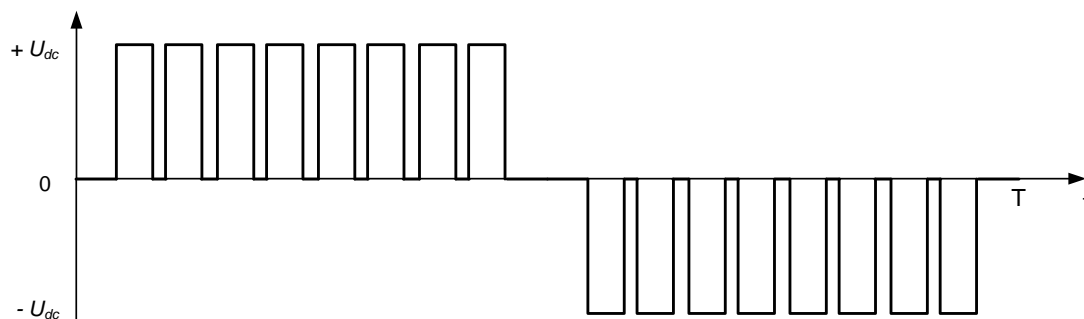


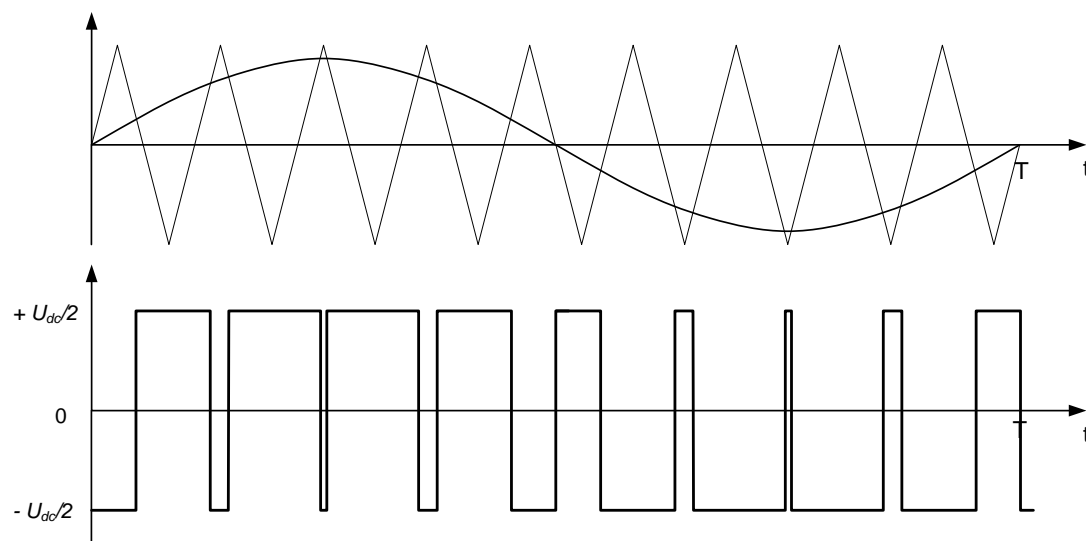
Abbildung 8: Eine Periode bei Modulation mit fixer Pulsbreite (Dreipunktbetrieb).

Das Verwenden einer fixen Pulsbreite resultiert in oben beschriebenen Verbesserungen. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel, bei dem die Taktfrequenz der Halbleiter achtmal höher ist als die Frequenz der Grundschiwingung der Ausgangsspannung.

Unterschwingungsverfahren:

Da meistens eine sinusförmige Ausgangsspannung erwünscht ist, bringt eine veränderliche Pulsbreite Vorteile in Bezug auf die Oberschwingungen. Diese Verfahren werden als PWM-Verfahren (Puls Width Modulation, Puls Weiten Modulation) bezeichnet.

Oft werden die Pulsbreiten mit dem so genannten Unterschwingungsverfahren erzeugt. Der sinusförmige Sollwert wird dabei mit einem dreieckförmigen Trägersignal verglichen. Ist das Sollsignal grösser als der Träger, wird der entsprechende Schalter nach oben geschaltet, ist das Sollsignal kleiner, wird der entsprechende Schalter nach unten geschaltet. Für ein Phasenmodul sieht das folgendermassen aus:



Oben: dreieckförmiges Trägersignal und sinusförmiger Sollwert für einen Phasenbaustein.

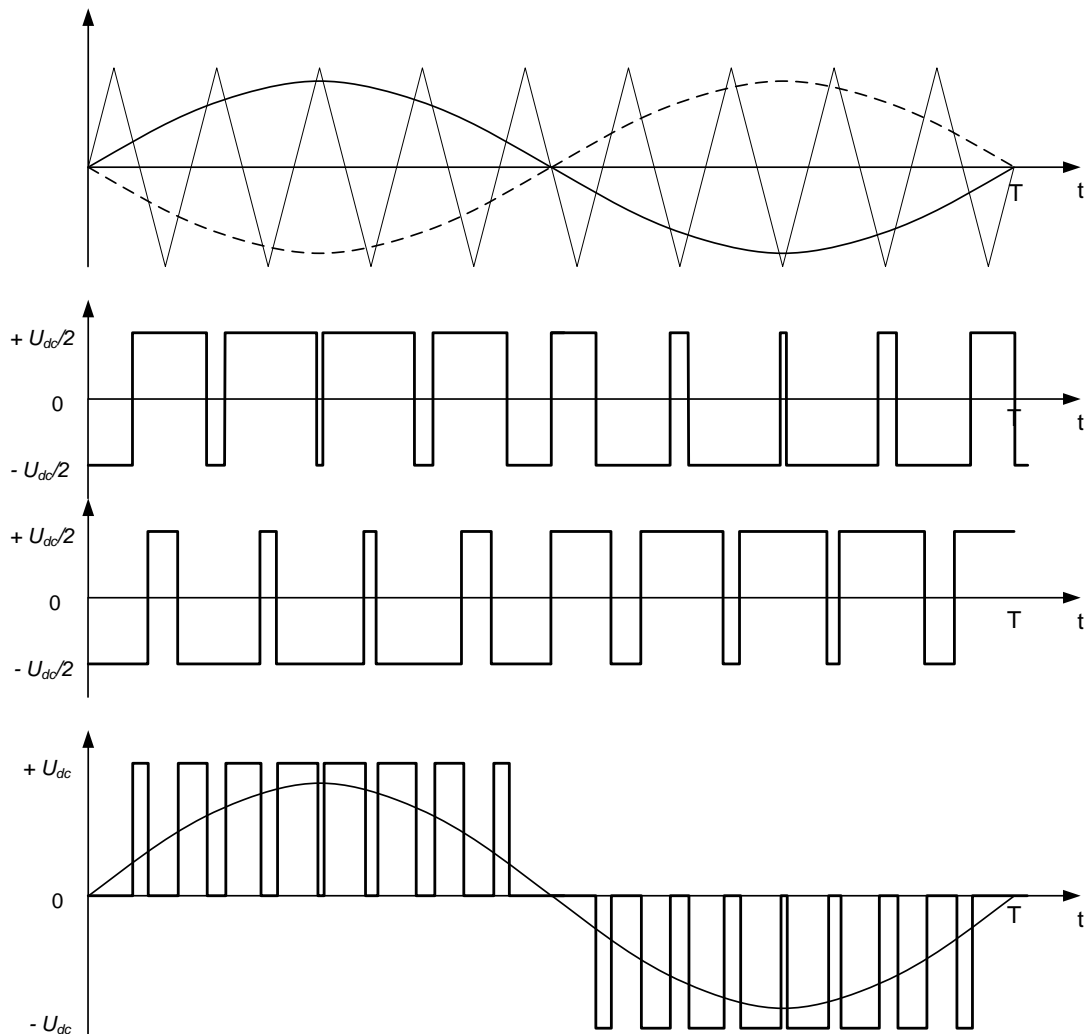
Unten: Schaltsignal bzw. mit Schalter S_1 und S_2 erzeugte Ausgangsspannung.

Abbildung 9: PWM für eine Phase, oben Träger und Sollwert, unten Ausgangsspannung eines Phasenmoduls.

Die Ausgangsspannung von einer Phase beträgt $\pm U_{dc}/2$ und bezieht sich auf den Mittelpunkt der DC-Spannungsquelle. Sie entspricht der Spannung u_a in Abbildung 2.

Das gleiche Verfahren kann auch für die Brückenschaltung in Zweipunktbetrieb verwendet werden. Dann hat die Ausgangsspannung den gleichen zeitlichen Verlauf wie in Abbildung 9 dargestellt, der Scheitelwert beträgt aber $\pm U_{dc}$.

Wird der einphasige Wechselrichter in Dreipunktbetrieb betrieben, lässt sich die Ausgangsspannung weiter verbessern. Dabei können die Schaltsignale für die beiden Phasenmodule mit dem gleichen Träger erzeugt werden. Es werden dann zwei sinusförmige Referenzsignale mit entgegengesetztem Vorzeichen verwendet.



- Oben: dreieckförmiges Trägersignal und sinusförmige Sollwerte für die beiden Phasenbausteine.
 Mitte oben: Schaltsignal bzw. mit Schalter S_1 und S_2 erzeugte Ausgangsspannung
 Mitte unten: Schaltsignal bzw. mit Schalter S_3 und S_4 erzeugte Ausgangsspannung
 Unten: An der Last anliegende Spannung u_2 mit Grundschiwingung.

Abbildung 10: PWM für einen Wechselrichter in Brückenschaltung

Das Verhältnis der Amplitude der sinusförmigen Referenz (Sollwert für die Ausgangsspannung) zur Amplitude des dreieckförmigen Trägersignals wird als Aussteuerungs- oder Modulationsgrad m bezeichnet. Die Amplitude der Grundschiwingung der Wechselrichter-Ausgangsspannung entspricht bei Brückenschaltung dem Aussteuerungsgrad multipliziert mit der Zwischenkreisspannung:

Bei Brückenschaltung: $\hat{U}_{a1} = m \cdot U_{dc}$ mit $m = \frac{\hat{U}_{\text{sinusförmigeReferenz}}}{\hat{U}_{\text{Trägersignal}}}$

Bei Mittelpunktschaltung: $\hat{U}_{a1} = m \cdot \frac{U_{dc}}{2}$ mit $m = \frac{\hat{U}_{\text{sinusförmigeReferenz}}}{\hat{U}_{\text{Trägersignal}}}$

11.4.3 Toleranzbandsteuerung

Neben der Grundfrequenztaktung und der Pulsweitenmodulation wird in der Praxis auch die Toleranzbandsteuerung (bzw. Toleranzbandregelung) eingesetzt. Dabei wird für den Ausgangsstrom ein Toleranzband vorgegeben. Sobald der Strom dieses nach oben verlässt, wird auf die negative Ausgangsspannung geschaltet. Wenn der Strom das Toleranzband nach unten verlässt, wird auf positive Ausgangsspannung geschaltet. Dieses Prinzip benötigt ein induktives Verhalten der Last, was aber in den meisten Fällen gegeben ist. Neben dem Erzeugen der Pulse wird gleichzeitig der Strom geregelt, da er innerhalb des dem Sollwert folgenden Toleranzbandes gehalten wird. Die Schaltfrequenz ist bei diesem Verfahren nicht konstant, lässt sich aber im Mittel in etwa durch die breite des Toleranzbandes einstellen.

Folgendes Bild zeigt das Toleranzbandverfahren für einen Wechselrichter in Mittelpunktschaltung.

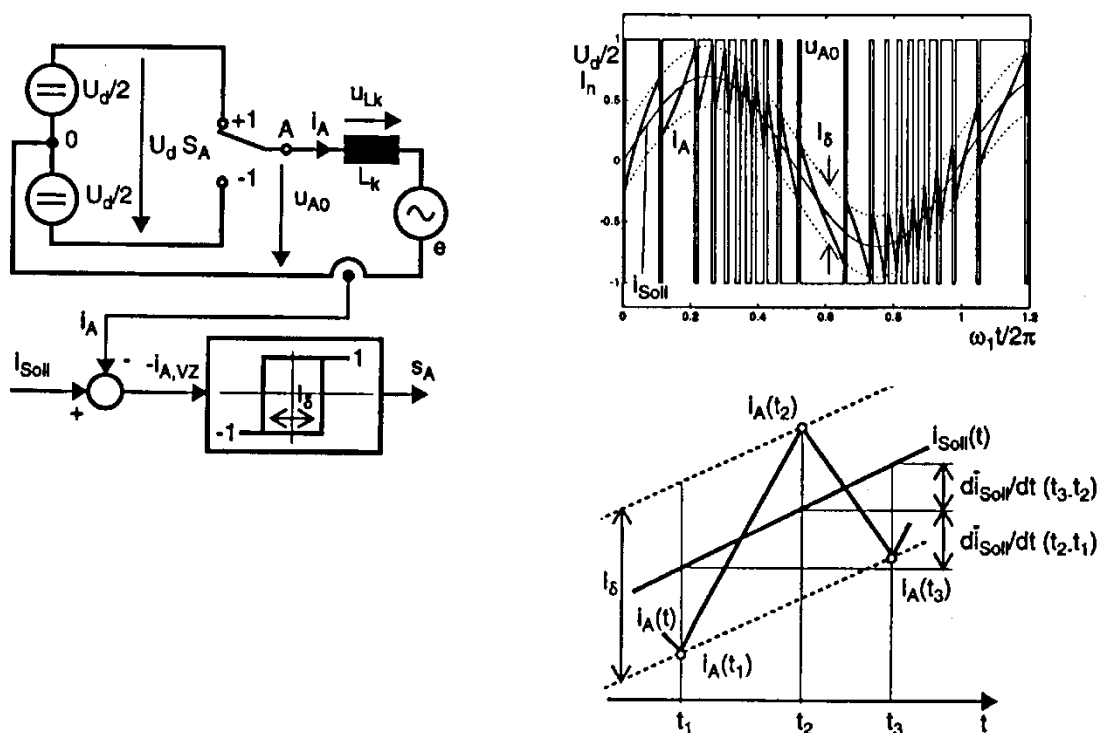


Abbildung 11: Toleranzbandregelung für Wechselrichter in Mittelpunktschaltung.

11.5 Dreiphasige Wechselrichter

Werden drei Phasenmodule verwendet, entsteht ein dreiphasiger Wechselrichter.

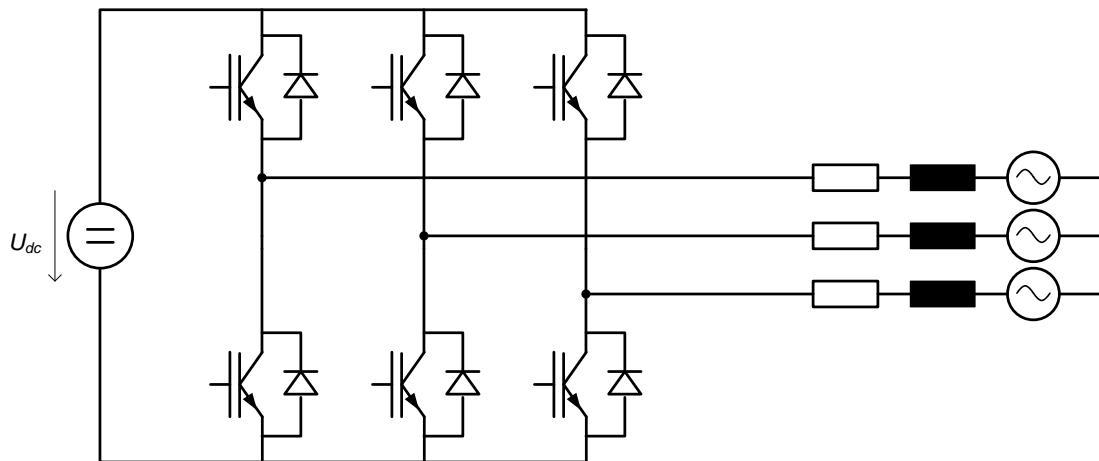


Abbildung 12: Dreiphasiger IGBT-Wechselrichter mit dc-Quelle und Wechselstromlast.

Grundsätzlich lassen sich wie beim einphasigen Wechselrichter zur Erzeugung der Schaltsignale die Grundfrequenztaktung, das Unterschwingungsverfahren oder das Toleranzbandverfahren einsetzen.

Auch hier kann zur besseren Übersicht jedes der drei Phasenmodule durch einen Umschalter ersetzt werden.

Heutzutage wird der grösste Teil der in drehzahlvariablen Antrieben eingesetzten Asynchronmaschinen mit solchen dreiphasigen Wechselrichtern gespeist.

Der dreiphasige Wechselrichter wird im Vertiefungsfach Leistungselektronik und Antriebstechnik ausführlich behandelt.