

ET+A

Leistungselektronik und elektrische Antriebe

Kapitel 5 Fremdgeführte Stromrichter

Adrian Omlin

Inhaltsverzeichnis Kapitel 5

5	DER FREMDGEFÜHRTE STROMRICHTER	3
5.1	Eine Übersicht	3
5.2	Der einphasige Stromrichter	6
5.2.1	Betrieb mit ohmscher Last.....	7
5.2.2	L-Glättung	10
5.2.3	C-Glättung	13
5.2.4	Steuerkennlinien	15
5.2.5	Leistungen bei L-Glättung.....	16
5.2.6	Belastung der Halbleiter bei L-Glättung	16
5.2.7	Netzurückwirkungen, Welligkeit der Ausgangsspannung	17
5.3	Der dreiphasige Stromrichter	18
5.3.1	L-Glättung	18
5.4	Anwendungen	23
5.4.1	Einsatz zur Speisung von Gleichstrommaschinen.....	23
5.4.2	Weitere Anwendungen	23

5 Der Fremdgeführte Stromrichter

5.1 Eine Übersicht

Fremdgeführte Stromrichter benötigen eine Führungsspannung, welche die Kommutierung ermöglicht. Kommutierung bezeichnet den Wechsel des Stromes von einem Halbleiter auf einen andern, bzw. von einem Halbleiterpaar auf das Nächste. Beim fremdgeführten Stromrichter erfolgt diese Kommutierung natürlich. Das heisst, ein Halbleiter löscht, weil der Strom im Halbleiter bedingt durch äussere Einflüsse null wird. Deshalb werden keine abschaltbaren Halbleiter benötigt. Die Führungsspannung kann vom Netz kommen (netzgeführte Schaltung), oder es kann die induzierte Spannung einer Maschine sein (maschinen- oder lastgeführte Schaltung).

Die fremdgeführten Stromrichterschaltungen können nach folgenden Gesichtspunkten eingeteilt werden:

Schaltungsart:

Einwegschaltung: Der Sekundärstrom einer Transformatorwicklung, bzw. der Netzstrom, wenn keine Transformator zum Einsatz kommt, ist ein Gleichstrom. Da der Mittelpunkt der Sekundärwicklung des Transformators (bei dreiphasigen Schaltungen der Sternpunkt) zugänglich sein muss, werden diese Schaltungen auch oft als Mittelpunktschaltungen bezeichnet.

Zweiwegschaltung: In diesem Fall ist der Sekundärstrom im Transformator bzw. der Netzstrom ein Wechselstrom. Aufgrund der Bauform des Gleichrichters werden diese Schaltungen oft auch als Brückenschaltung bezeichnet.

Phasenzahl:

Aufgrund der Sekundärphasenzahl des Transformators spricht man von ein-, zwei-, drei- und mehrphasigen Schaltungen. Gebräuchlich sind ein- und dreiphasige Schaltungen, die manchmal ohne Transformator direkt ans Netz geschaltet werden.

Pulszahl:

Aus der Phasenzahl und aus der Schaltungsart ergibt sich die Pulszahl. Sie entspricht der Welligkeit der erzeugten Gleichspannung. Zum Beispiel die „B2“: Brückenschaltung mit zweipulsiger Gleichspannung (zwei „Buckel“ pro Netzperiode).

Steuerungsart:

Die Schaltung kann ungesteuert (Diodengleichrichter) oder gesteuert (Thyristorgleichrichter) sein. Beim gesteuerten Gleichrichter ist die Ausgangsspannung einstellbarer.

Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl von möglichen Schaltungen.

Durch das kostengünstiger werden der Halbleiterbauelemente und die Zunahme der Kosten für Rohstoffe (Kupfer, Eisen) verdrängen die Zweiwegschaltungen (B2 und B6) die Einwegschaltungen (M1, M2, M3, DSS6) immer mehr. In der Praxis findet

die DSS6 Schaltung immer noch ihr Einsatzgebiet bei tiefen Spannungen und sehr hohen Strömen.

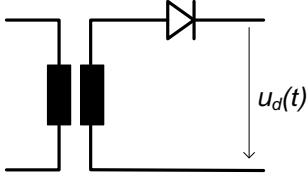
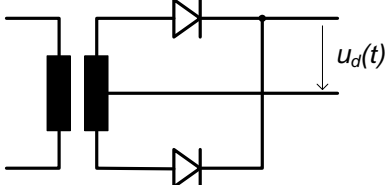
Ist keine Spannungsanpassung oder galvanische Trennung nötig, können die meisten Schaltungen auch ohne Trafo direkt ans Netz angeschlossen werden.

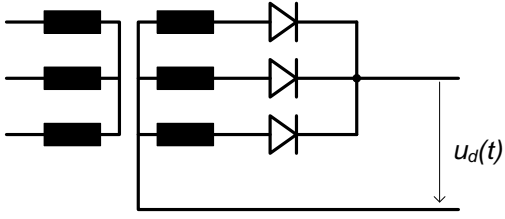
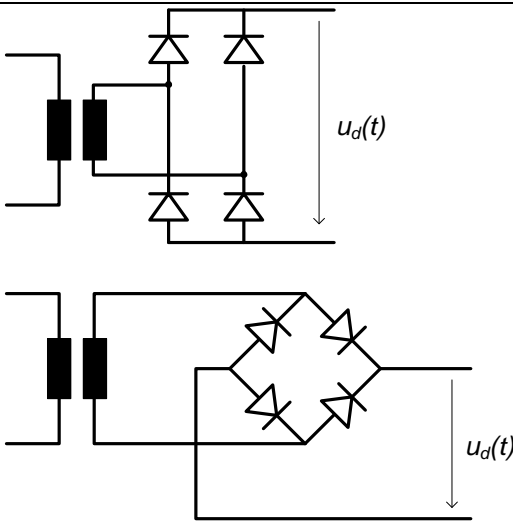
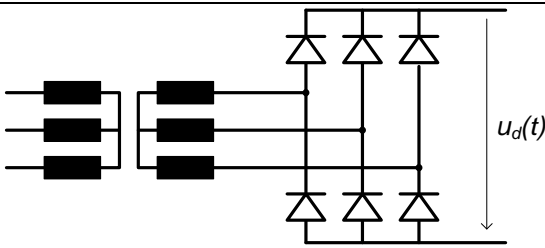
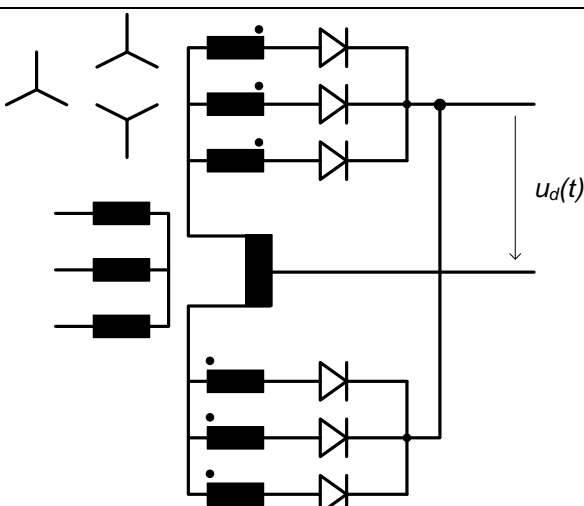
Mit speziellen Transformatoren lassen sich auch höherpulsige Schaltungen (12-, 18, 24-, ...) realisieren.

Im Leistungsbereich bis einige MW werden gesteuerte fremdgeführte Schaltungen zunehmend durch selbstgeführte Schaltungen mit abschaltbaren Halbleitern (IGBTs, GTOs und Transistoren) verdrängt, die bezüglich Leistungsfaktor, Netzrückwirkungen aber auch möglicher Regelgeschwindigkeit ein günstigeres Verhalten haben.

Die Dioden-Brückenschaltung wird aber als kostengünstige Lösung zur Speisung von Umrichtern mit Spannungszwischenkreis ihre Bedeutung beibehalten. Auch im Hochstrombereich (z.B. Aluminiumelektrolyse) werden auch in Zukunft Diodengleichrichter eingesetzt.

Stromrichter grösserer Leistung werden immer dreiphasig ans Netz angeschlossen. Einphasige netzgeführte Stromrichter kommen vor allem als ungesteuerte Zweiweg-Schaltungen in der Kleinleistungselektronik zur Anwendung. Auch kleinere Antriebe mit Gleichstrommaschinen können mit einphasigen netzgeführten Stromrichtern realisiert werden. Für grosse Leistungen wurden sie vornehmlich für elektrische Triebfahrzeuge gebaut (z.B. SBB Serie 560, "neuer Pendelzug NPZ", 126 Exemplare). Für neue Bahnantriebe werden sie allerdings kaum noch verwendet, da sie durch selbstgeführte Stromrichter mit Asynchronmaschinen abgelöst wurden.

Bez.	Ersatzschaltung	Bemerkungen
M1		Einpulsige Einwegschaltung. Einfachster Gleichrichter. Heute nicht mehr verwendet wegen DC-Komponente im Transformatorstrom.
M2		Zweipulsige Mittelpunktschaltung. Selten verwendet wegen aufwändigem, schlecht ausgenutztem Transformator. z.T. auch als zweiphasig bezeichnet.

M3		Dreipulsige Mittelpunktschaltung. Heute nur noch als Teil einer DSS6 verwendet wegen der DC-Komponente im Transformatorstrom.
B2		Zweipulsige Brückenschaltung. Gebräuchlichste Schaltung für kleinere Leistungen
B6		Sechspulsige Brückenschaltung. Auch als DB (dreiphasige Brückenschaltung) bezeichnet. Gebräuchlichste Schaltung für grosse Leistungen
DSS6		Doppelstern-Saugdrossel-Schaltung, sechspulsig. Aufwändiger Transformator und zusätzliche Saugdrossel. Einsatzgebiet bei sehr hohen Strömen und kleinen Spannungen.

Das folgende Bild zeigt eine 12-pulsige Diodengleichrichter-Anlage (2 x B6) für 100 kAdc / 1200 Vdc, die parallel mit andern Gruppen eine Aluminiumhütte in Frankreich mit Gleichstrom versorgt.

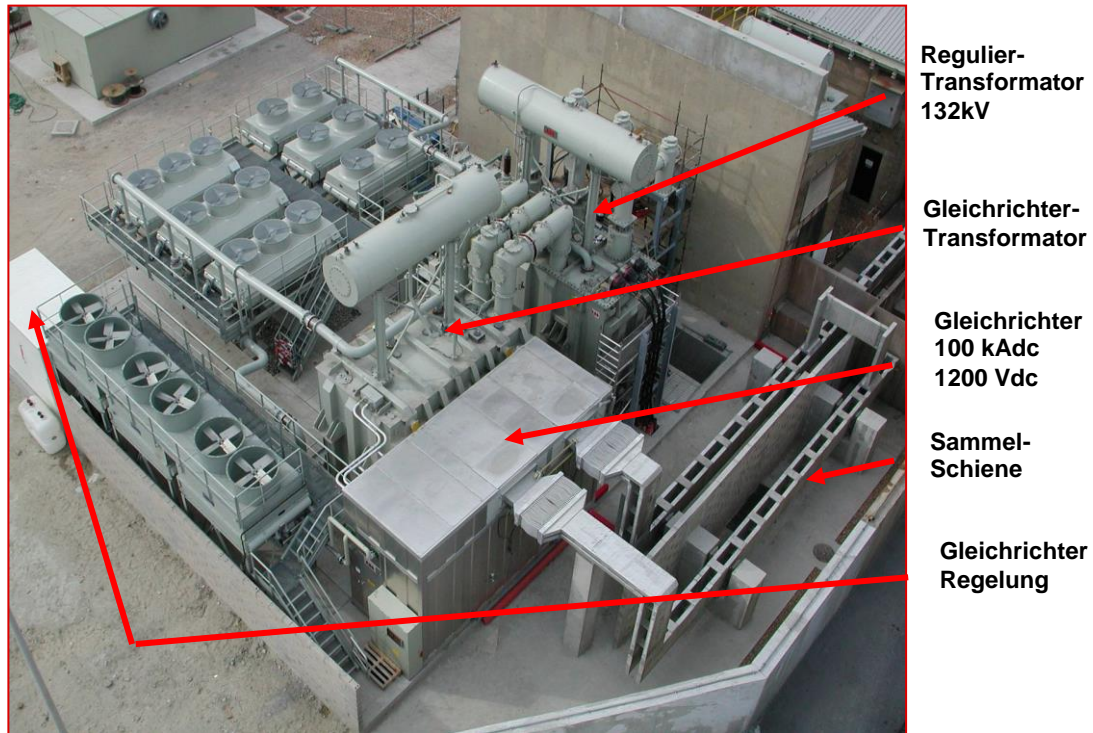


Abb. 5-1: Hochstromgleichrichter für 100 kA / 1200 V

5.2 Der einphasige Stromrichter

In diesem Kapitel wird die oft verwendete zweipulsige Brückenschaltung B2 betrachtet. Die Bezeichnung zweipulsig sagt aus, dass die Gleichspannung in jeder Netzperiode zwei Maxima hat. Die Schaltungsart der Halbleiter wird als Brücke bezeichnet.

Es werden alle Komponenten als ideal angenommen. Die ganze Schaltung sei verlustlos. Die speisende Wechselspannung ist unabhängig vom Strom sinusförmig.

5.2.1 Betrieb mit ohmscher Last

Ungesteuerte B2

Im ungesteuerten Fall sind alle vier Halbleiter Dioden. Die gleichen Kurvenverläufe entstehen auch, wenn Thyristoren mit einem Steuerwinkel von $\alpha = 0^\circ$ gezündet werden.

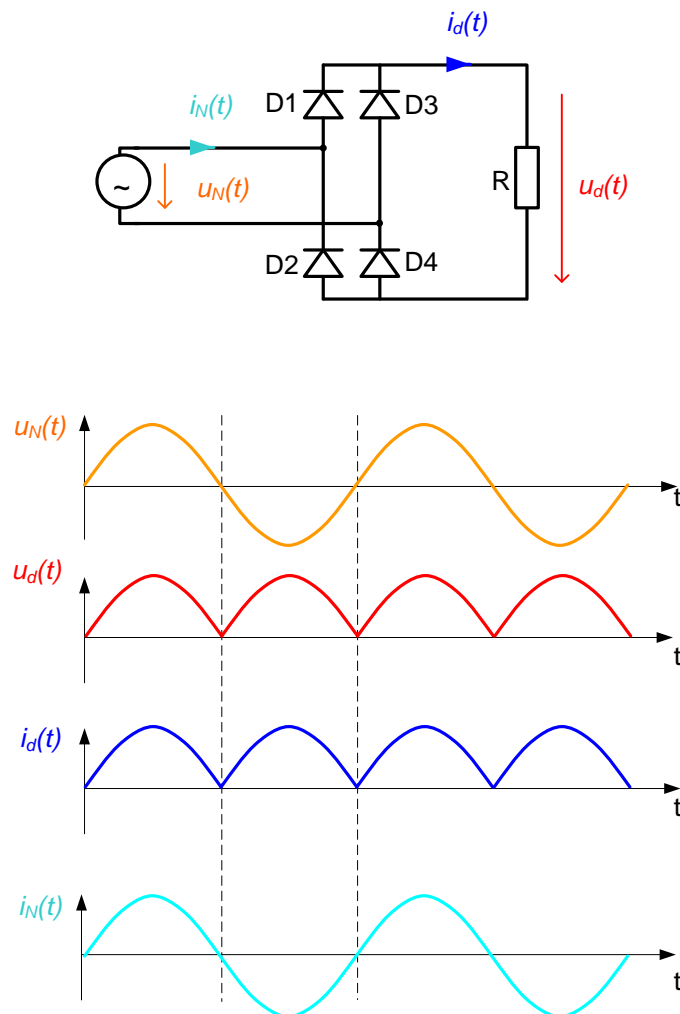


Abb. 5-2: Kurvenformen der B2-Schaltung mit ohmscher Last im ungesteuerten Fall.

Ist die Netzspannung $u_N(t)$ positiv, leiten die Dioden D1 und D4. Ist sie negativ, leiten die Dioden D2 und D3. Man kann also sagen, dass die Netzspannung mit positivem Vorzeichen auf die DC-Seite durchgeschaltet wird, wenn D1 und D4 leiten, und mit negativem Vorzeichen, wenn D2 und D3 leiten. Dadurch wird eine zweipulsige Gleichspannung gebildet.

Der Gleichstrom $i_d(t)$ hat wegen der R-Last denselben zeitlichen Verlauf wie die Gleichspannung $u_d(t)$.

Aus dem Gleichstrom entsteht der Netzstrom $i_N(t)$: Sind Dioden D1 und D4 leitend, wird der Strom mit positivem Vorzeichen auf die Netzseite geschaltet. Sind D2 und D3 leitend, wird der Strom mit negativem Vorzeichen auf die Netzseite geschaltet.

Der vom Netz bezogene Strom ist demzufolge sinusförmig.

Der lineare Mittelwert der Ausgangsspannung beträgt:

$$U_{di0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi u_d d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_N = 0.900 U_N$$

Dabei bedeuten die Indizes:

d: Gleichspannung („direct“)

i: idealisiert (Spannungsabfall durch Kommutierung und Verluste vernachlässigt)

0: Zündwinkel $\alpha = 0^\circ$, was bei Dioden immer der Fall ist.

Für U_N muss der Effektivwert der Netzspannung eingesetzt werden.

Gesteuerte B2:

Werden anstelle von Dioden Thyristoren eingesetzt, lässt sich der Mittelwert der Gleichspannung über den Zündwinkel auf jeden beliebigen Wert zwischen 0 und U_{di0} einstellen.

Die Spannungs- und Stromverläufe bei R-Last sind im folgenden Bild für einen Zündwinkel von knapp 60° dargestellt.

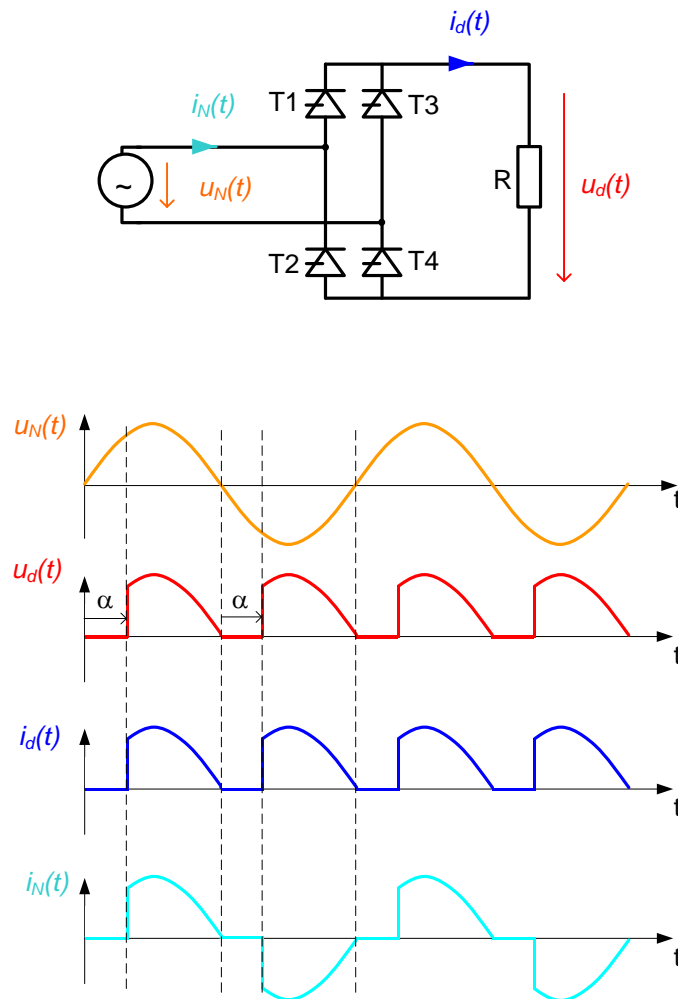


Abb. 5-3: Kurvenformen bei der B2-Schaltung mit ohmscher Last und einem Steuerwinkel von ungefähr 60° .

Die Thyristoren, welche verzögert um den Winkel α nach dem Nulldurchgang der Netzspannung gezündet werden, löschen, wenn der Strom Null wird. Das ist bei ohmscher Last beim nächsten Spannungs-Nulldurchgang der Fall.

Die mittlere Ausgangsspannung $U_{di\alpha}$ wird jetzt

$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_d d(\omega t) = U_{dio} \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}$$

Durch Verändern des Steuerwinkels α zwischen 0 und 180° kann die Ausgangsspannung zwischen U_{dio} und 0 variiert werden.

5.2.2 L-Glättung

Ist im Gleichstromkreis eine Drossel vorhanden, wird der Laststrom geglättet. Mit einer einigermaßen grossen Induktivität kann der Strom sogar als ideal geglättet angenommen werden. Man schreibt oft $L_d = \infty$, was aussagen soll, dass auch mit einer unendlich grossen Induktivität der Strom nicht noch besser geglättet würde. Oft hat die Last bereits eine so grosse Induktivität, dass der Fall der idealen L-Glättung auch ohne zusätzliche Drossel erreicht wird.

Auch bei L-Glättung wird der Gleichstrom mit positivem oder negativem Vorzeichen aufs Netz geschaltet. Bei idealer Kommutierung wechseln die Ströme schlagartig von einem Halbleiterpaar zum andern. Der Netzstrom wird daher rechteckförmig.

Ungesteuerte B2

Der ungesteuerte Fall, d.h. mit Dioden, ist in folgender Abb. 5-4 dargestellt. Der Wechsel des Stromes erfolgt bei 0° . Bei der Gleichspannung $u_d(t)$ ist zusätzlich der Mittelwert U_{di0} mit eingezeichnet.

Die schraffierten Flächen sind die Spannungszeitflächen, die über der Induktivität abfallen. Damit der Strom über die Netzperioden hinweg nicht zu- oder abnimmt, muss die positive und die negative Spannungszeitfläche gleich gross sein. Somit liegt der Mittelwert U_{di0} der Spannung $u_d(t)$ über dem Widerstand an. Die Spannung über dem Widerstand R beträgt im ungesteuerten Fall also auch bei L-Glättung U_{di0} . Der Mittelwert des Stromes $i_d(t)$ ergibt sich durch das ohmsche Gesetz.

$$U_{di0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi u_d \cdot d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_N = 0.900 U_N$$

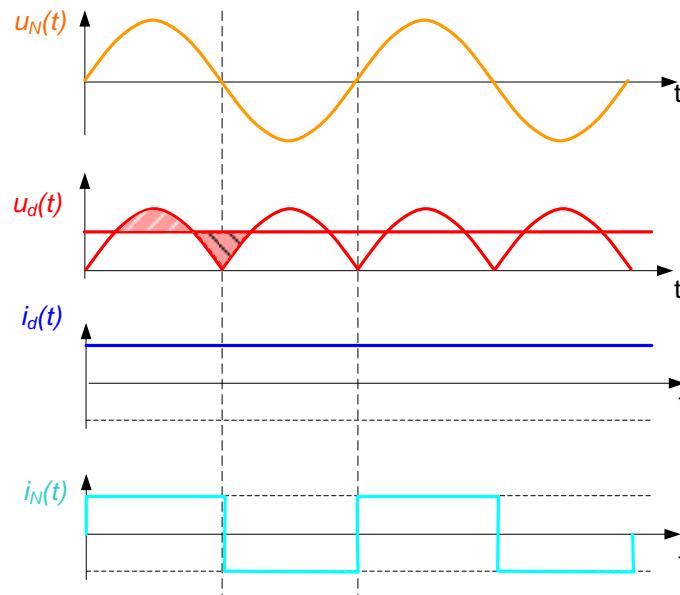
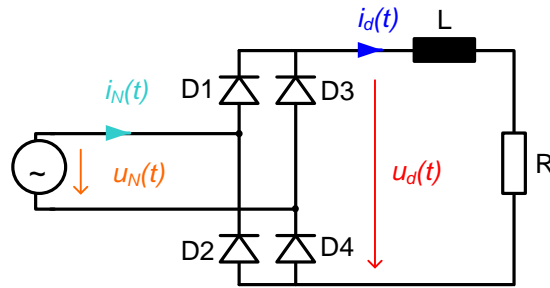


Abb. 5-4: Kurvenformen der ungesteuerten B2 mit idealer Stromglättung ($L_d = \infty$)

Gesteuerte B2

Thyristoren löschen erst, wenn ihr Strom null wird. Bedingt durch die Induktivität fließt der Strom auch weiter, wenn die Spannung den Nulldurchgang erreicht hat. Ein Thyristorpaar der Brückenschaltung mit L-Glättung löscht deshalb erst, wenn ihm der Strom vom andern Thyristorpaar, das gezündet wird, weggenommen wird. Die Leitdauer jedes Thyristorpaars beträgt 180° .

Der Rechteckförmige Netzstrom $i_N(t)$ hat deshalb eine Phasenverschiebung gegenüber der Netzspannung $u_N(t)$, die dem Steuerwinkel α entspricht. Je größer α ist, desto größer wird demzufolge auch der Blindleistungsanteil werden.

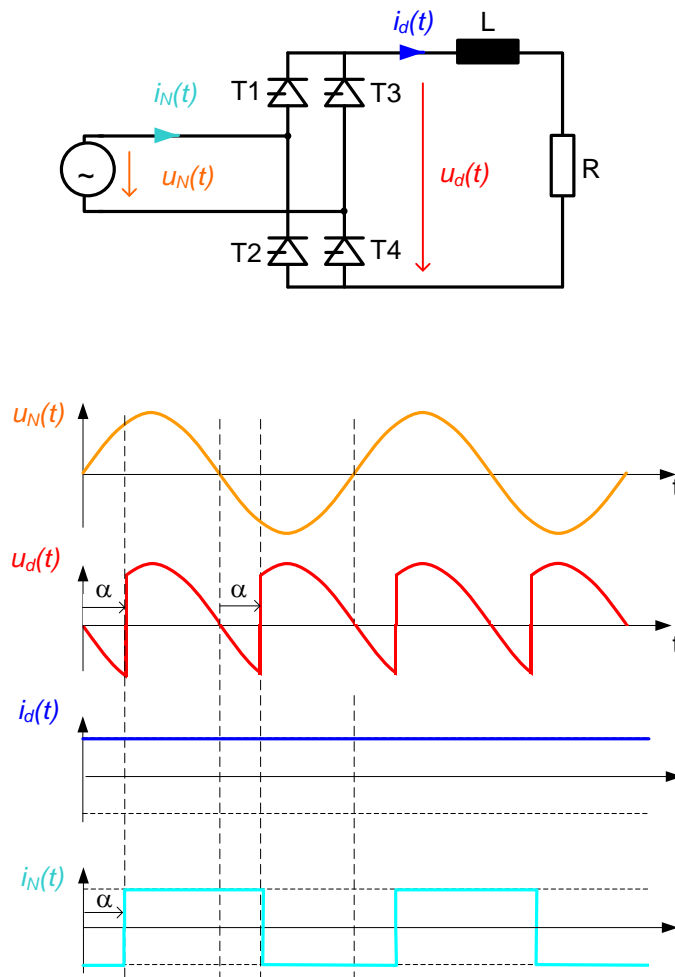


Abb. 5-5: Kurvenformen der gesteuerten B2 mit $L_d = \infty$ und α ungefähr 60°

Da der Strom im Spannungsnulldurchgang nicht null wird, wird der Momentanwert der Ausgangsspannung $u_d(t)$ zeitweise negativ. Der Mittelwert der Ausgangsspannung wird also kleiner als bei ohmscher Last und berechnet sich in Abhängigkeit des Zündwinkels α gemäss folgender Formel. Zur Berechnung ist der Wert von α in Radians einzusetzen:

$$U_{dia} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} u_d d(\omega t) = U_{di0} \cdot \cos \alpha$$

Bei einem Zündwinkel von 90° wird die mittlere Ausgangsspannung null. Für eine passive Last muss der Zündwinkel kleiner als 90° sein. Hat man hingegen eine aktive Last, ist auch ein Betrieb mit $\alpha > 90^\circ$ möglich, wobei der Mittelwert der Ausgangsspannung negativ wird. Man befindet sich nun im **Wechselrichterbetrieb**, d.h. Leistung wird von der Last ins Netz eingespeist. Dies setzt natürlich voraus, dass die Last Energie abgeben kann. In der Ersatzschaltung müsste dazu eine Quelle vorhanden sein (oder eine grosse Induktivität, die über kurze Zeit auch Energie abgeben kann).

Theoretisch sind Zündwinkel bis $\alpha = 180^\circ$ möglich, das heisst, bis $U_{di\alpha} = -U_{di0}$. Praktisch muss der Thyristor, der den Strom abgibt, bei $\omega t = 180^\circ$ seine volle Sperrfähigkeit erlangt haben, da dann die Spannung über diesem Thyristor wieder positiv wird. Anderenfalls würde er wieder zünden, was einem Betrieb mit $\alpha = 0^\circ$ entsprechen würde (bei aktiver Last Wechselrichterkippen). Der Zündwinkel darf maximal so gross sein, dass die Schonzeit grösser als die Freiwerdezeit t_f des Thyristors ist

$$\alpha_{max} < 180^\circ - \omega t_f$$

Damit ist die maximale negative Spannung immer kleiner als U_{di0} .

5.2.3 C-Glättung

Am Ausgang eines fremdgeführten Gleichrichters kann auch direkt ein Kondensator angeschlossen werden. Man spricht dann von C-Glättung. Das ist oft der Fall, wenn der Zwischenkreis eines U-Umrichters mit einer Diodenbrücke gespeist wird. Wird das C nicht belastet, lädt es sich auf den Scheitelwert der Netzspannung auf. Man spricht von Spitzenwertgleichrichtung. Bei Belastung wird das C zwischen den Maxima der Netzspannung entladen und der Mittelwert der Gleichspannung nimmt ab. In der Praxis wird als Mittelwert oft auch der für Gleichrichter mit L-Glättung berechnete Wert U_{di0} verwendet.

Die Dioden werden leitend, sobald die Netzspannung grösser als u_d wird. Der Kondensator wird dann mit einem Strompuls nachgeladen. Bei C-Glättung ist der Netzstrom deshalb pulsformig. Dadurch steigt bei gleicher Wirkleistung in der Last der Effektivwert des Netzstromes und des Stromes in den Halbleitern an. Da die Stromform stark von den Schaltungsparametern abhängt, ist im Folgenden als Beispiel eine Simulation gezeigt.

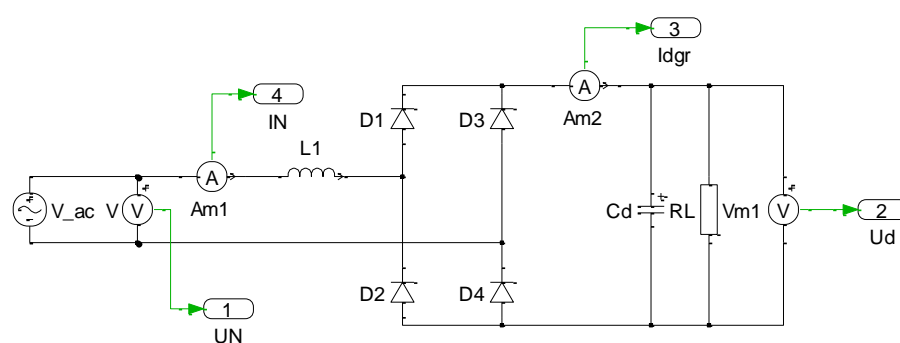


Abb. 5-6: Simulationsmodell einer B2 mit C-Glättung

Als Parameter wurden verwendet:

$U_N = 230\text{ V}$ $L_K = 200\text{ }\mu\text{H}$ $C_d = 5\text{ mF}$ $R_L = 20\text{ Ohm}$ (damit I_L ca. 15 A)

Damit ergeben sich die folgenden, typischen Kurvenverläufe:

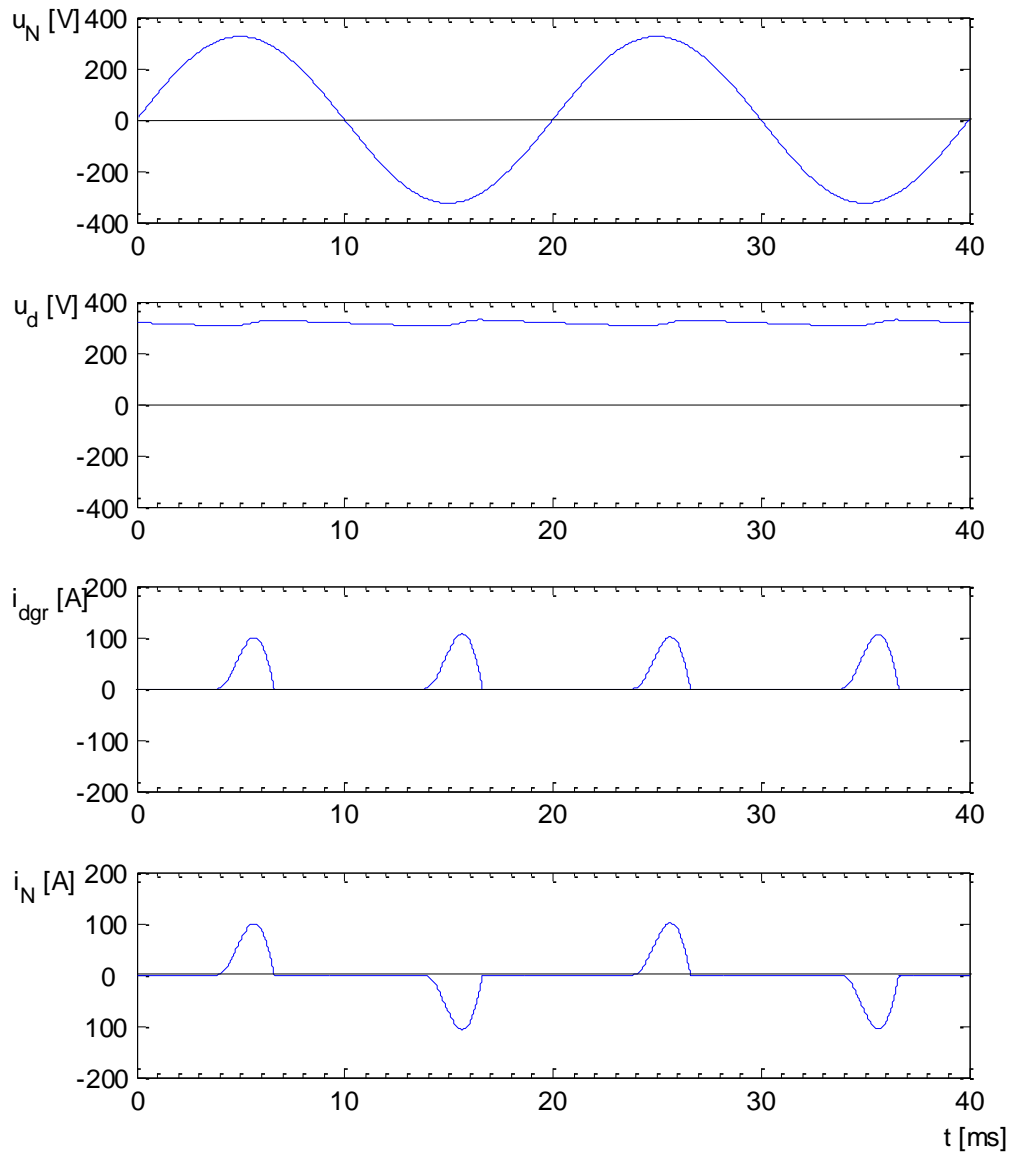


Abb. 5-7: Strom- und Spannungsverläufe einer B2 mit C-Glättung

Thyristorgleichrichter für grössere Leistungen werden nicht mit reiner C-Last eingesetzt, da ein Spannungssprung über einem C einen sehr grossen Strom zur Folge hat.

5.2.4 Steuerkennlinien

Die Steuerkennlinie liefert die Beziehung zwischen Steuerwinkel und Ausgangsspannung, das heisst sie stellt die Funktion $U_{di\alpha} = f(\alpha)$ dar.

Abb. 5-8 zeigt die Steuerkennlinie für die drei Lastfälle:

a.) R-Last:

$$U_{di\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_d d(\omega t) = U_{dio} \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}$$

b.) L-Glättung:

$$U_{di\alpha} = U_{dio} \cos(\alpha) \quad (0^\circ < \alpha < 180^\circ)$$

Bei Betrieb mit $\alpha > 90^\circ$ Wechselrichterbetrieb, der eine „aktive Last“ bedingt, z.B. Generatorbetrieb einer GM.

c.) C-Last (Spitzenwertgleichrichtung):

$$U_{di\alpha} = \sqrt{2} \cdot U_1 \quad (0^\circ < \alpha < 90^\circ)$$

$$U_{di\alpha} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin \alpha \quad (90^\circ < \alpha < 180^\circ) \text{ (selten)}$$

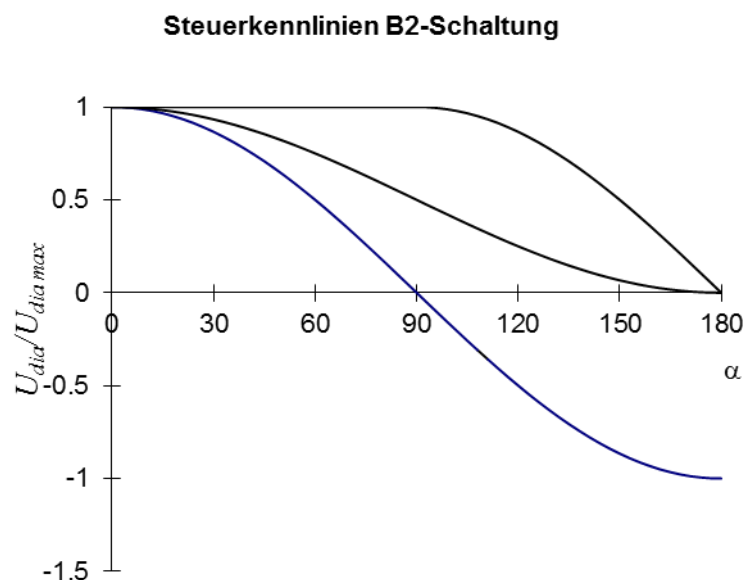


Abb. 5-8: Steuerkennlinien der B2-Schaltung

5.2.5 Leistungen bei L-Glättung

Hier wird nur der Fall der idealen Glättung des Gleichstroms I_d betrachtet.

Da die ganze Schaltung verlustfrei angenommen wird, ist die Wirkleistung am Ein- und Ausgang der Schaltung gleich.

Somit beträgt die Wirkleistung auf der Wechsel- und auf der Gleichspannungsseite:

$$P_N = P_{di\alpha} = I_d \cdot U_{di\alpha} = I_d \cdot U_{di0} \cos(\alpha) = P_{di0} \cos(\alpha)$$

Der Netzstrom, bzw. der Strom in der Transformator-Sekundärwicklung, ist rechteckförmig mit der Amplitude I_d . Der Effektivwert beträgt also

$$I_{N_rms} = I_d$$

Damit berechnet sich die Scheinleistung zu:

$$S_N = U_{N_rms} \cdot I_{N_rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{di0} \cdot I_d = P_{di0} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \cdot P_{di0}$$

Der Transformator muss also bei $\alpha = 0^\circ$ auf das 1.11-fache der übertragenen Wirkleistung ausgelegt werden. Wenn α grösser wird, sinkt (bei gleichem Strom und damit gleich bleibender Scheinleistung) die Wirkleistung noch weiter ab.

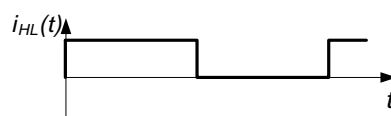
Der Leistungsfaktor beträgt:

$$\lambda = \frac{P_N}{S_N} = \frac{P_{di\alpha}}{1.11 \cdot P_{di0}} = \frac{\cos \alpha}{1.11} = 0.9 \cos \alpha$$

Auch bei $\alpha = 0^\circ$ ist der Leistungsfaktor nicht 1, obwohl es in diesem Fall keine Phasenverschiebung zwischen Netzstrom und -spannung gibt, weil der Strom verzerrt ist. Er enthält damit Komponenten, die zwar zum Effektivwert und damit zur Scheinleistung, nicht aber zur Wirkleistung beitragen (Verzerrungsblindleistung).

5.2.6 Belastung der Halbleiter bei L-Glättung

Der Strom in einem der vier Halbleiter hat folgenden zeitlichen Verlauf (zweiphasiger Gleichrichter, ideal geglätteter Gleichstrom):



Daraus ergibt sich folgender Effektivwert (rms = root mean square) und Mittelwert (avg = average):

$$i_{HL_rms} = \sqrt{\frac{1}{2}} I_d \quad (5-1)$$

$$i_{HL_avg} = \frac{1}{2} I_d \quad (5-2)$$

Mit Effektiv- und Mittelwert des Stromes lassen sich die Verluste im Halbleiter einfach bestimmen.

5.2.7 Netzurückwirkungen, Welligkeit der Ausgangsspannung

Auch hier wird wieder nur der Fall der L-Glättung betrachtet.

Die Fourieranalyse des rechteckförmigen Netzstromes ergibt

$$i_N(t) = \frac{4}{\pi} I_d \left\{ \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right\}$$

Der Netzstrom enthält nur ungerade Harmonische. Wie stark der Netzstrom von der Grundschiwingung abweicht, kann mit dem Grundschiwingungsgehalt quantifiziert werden:

$$v = \frac{I_{L1}}{I_L} = 0.9$$

Neben einer Verschlechterung des Leistungsfaktors können die Oberschwingungen des Netzstromes auch zu Störungen führen.

Da das reale Netz einen endlichen Innenwiderstand hat, bewirkt der nichtsinusförmige Strom Verzerrungen der Netzspannung. Da das Netz selber ein schwingfähiges System ist, können Resonanzerscheinungen im Netz angeregt werden.

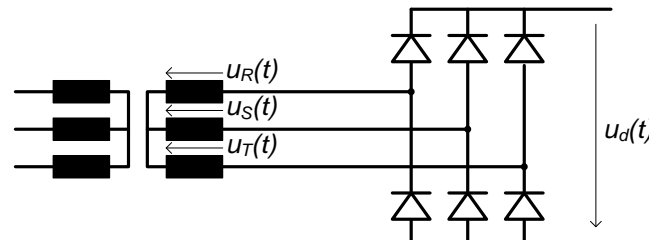
Störungen können auch drahtlos via elektromagnetische Wellen übertragen werden (EMV-Probleme). Das betrifft einerseits die Steuerelektronik des Stromrichters selbst, andererseits können sich die Oberschwingungen zum Beispiel auch in Kommunikationseinrichtungen (Telefon, Netzleittechnik) auswirken.

Bei der Ausgangsspannung ist das Idealziel eine reine Gleichspannung. Die Abweichung von dieser Idealform wird durch die Welligkeit definiert.

Im Fourierspektrum der Ausgangsspannung kommen nur geradzahlige Harmonische vor. Ihre Amplitude hängt vom Steuerwinkel ab. Bei $\alpha = 0^\circ$ sind die Harmonischen und damit die Verzerrungen am kleinsten, bei $\alpha = 90^\circ$ sind sie am grössten.

5.3 Der dreiphasige Stromrichter

Wird der B2 noch ein dritter Doppelzweig hinzugefügt, kann der Gleichrichter dreiphasig ans Netz angeschlossen werden. In der folgenden Abbildung ist ein dreiphasiger Gleichrichter, der über einen Transformator gespeist wird, gezeigt.



Die Gleichspannung $u_d(t)$ weist sechs Maxima pro Netzperiode auf und diese Schaltung wird deshalb als B6 bezeichnet.

Dreiphasige Gleichrichter sind u.a. bezüglich Netzbelastung, Transformatorausnutzung und Welligkeit der Gleichspannung wesentlich günstiger als einphasige.

Der dreiphasige Stromrichter wird in der Vertiefungsvorlesung genauer behandelt. Ebenso werden dort die Kommutierung und ihre Auswirkungen behandelt

5.3.1 L-Glättung

Bei L-Glättung ist jeweils ein Halbleiter der oberen drei und einer der untern drei leitend. Es leitet jeweils das Halbleiterpaar, an dem auf der Netzseite die höchste momentane verkettete Spannung anliegt. Die Gleichspannung setzt sich also aus den Kuppen der drei verketteten Spannungen zusammen. Jede der verketteten Spannungen wird während 60° mit positivem Vorzeichen und während 60° mit negativem Vorzeichen mit der dc-Seite verbunden. Dazwischen sind Pausen mit je 120° Länge, in denen die Gleichspannung von den andern beiden verketteten Spannungen bestimmt wird. Die so entstehende Gleichspannung ist sechspulsig, weist also sechs Spannungsmaxima pro Netzperiode auf. Stellvertretend für die sechs Zustände ist im folgenden Bild für zwei Zustände gezeigt, welche Dioden leiten. Beim ersten gilt $u_d(t) = U_{RT} = -U_{TR}$, da in diesem Zeitabschnitt diese verkettete Spannung am grössten ist. Im zweiten Abschnitt ist U_{ST} am grössten und der Strom wechselt oben von der ersten auf die mittlere Diode. Es gilt $u_d(t) = U_{ST}$

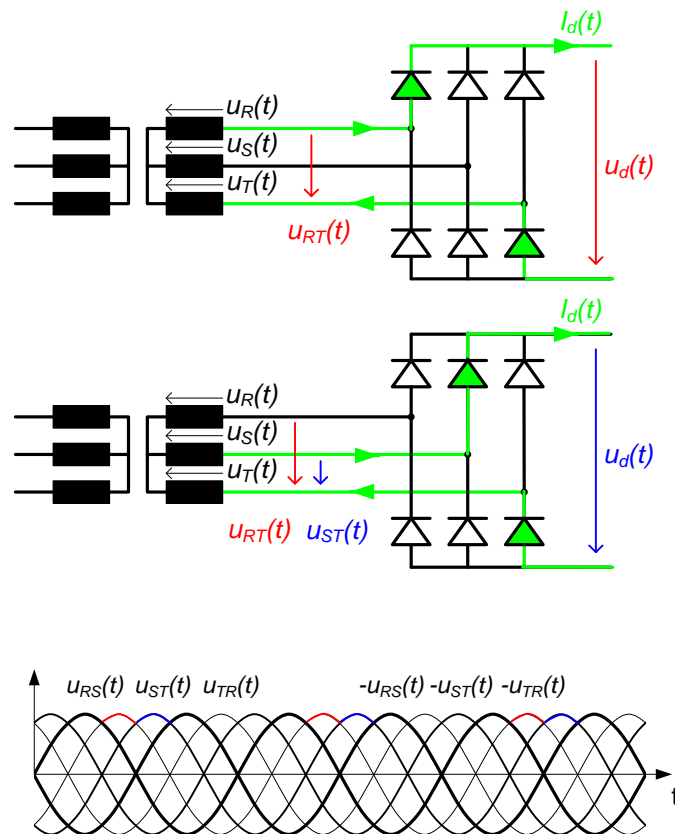


Abb. 5-9: Ausgangsspannung einer B6

Werden Dioden eingesetzt, folgt die Ausgangsspannung dem Maximalwert der verketteten Spannungen.

Die idealisierte DC-Spannung (Mittelwert) bei dreiphasiger Speisung beträgt somit:

$$U_{di0} = U_{Netz_eff} \cdot \frac{3\sqrt{2}}{\pi} = 1.35 U_{Netz_eff} \quad (5-3)$$

Im dreiphasigen Fall ist für U_{Netz_eff} die verkettete Netzspannung einzusetzen.

Die Indizes bedeuten:

d: Gleichspannung („direct“)

i: idealisiert (Spannungsabfall durch Kommutierung und Verluste vernachlässigt)

0: Zündwinkel $\alpha = 0^\circ$, was bei Dioden immer der Fall ist.

Bei realen Verhältnissen sinkt die DC-Spannung bei Belastung leicht ab.

Netzstrom:

In der folgenden Abbildung sind die drei Phasenströme bei idealer L-Glättung dargestellt. Die Nummern neben den Halbleitern zeigen die Kommutierungsreihenfolge der Halbleiter.

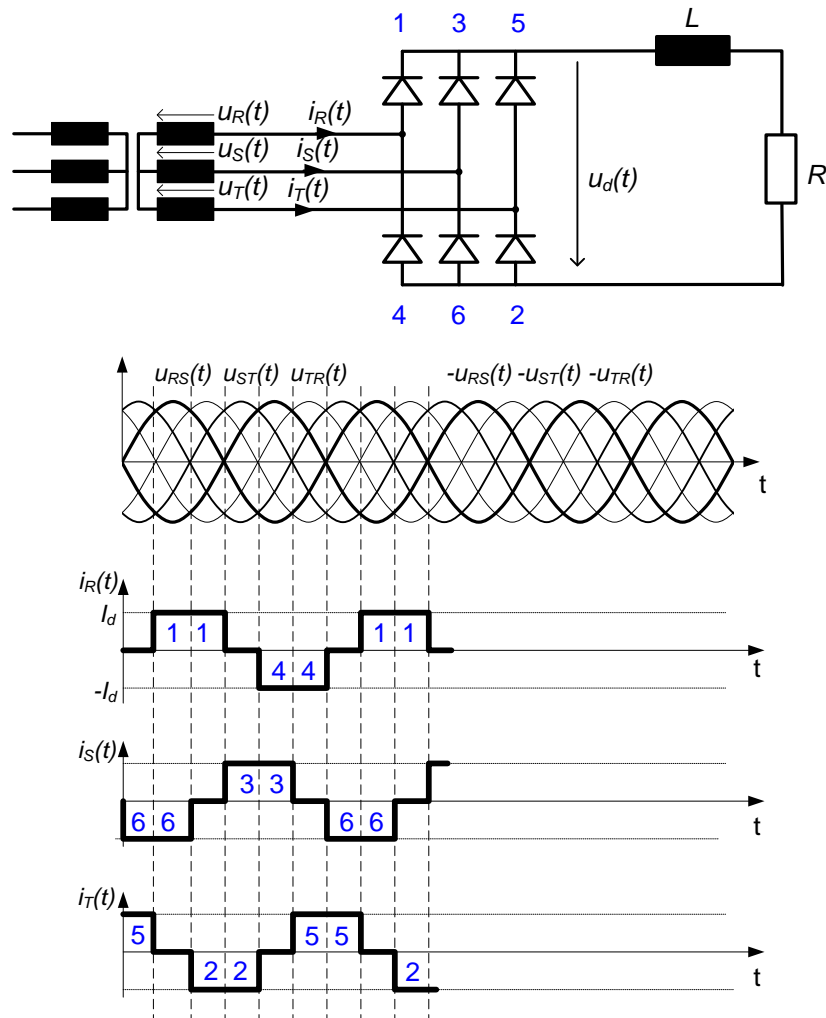
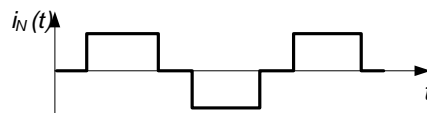


Abb. 5-10: Stromform der B6 mit idealer Stromglättung ($L_d = \infty$)

Netzgeführte Stromrichter, die eine induktive Last (z.B. Ankerkreis einer Gleichstrommaschine, Glättungsdrossel im Zwischenkreis eines I-Umrichters) speisen, zeigen einen rechteckförmigen Netzstrom, der sich aus Blöcken des dc-seitigen Gleichstromes zusammensetzt.

Der Netzstrom einer Phase eines dreiphasigen Gleichrichters mit konstantem, ideal geglättetem Gleichstrom I_d , hat folgenden zeitlichen Verlauf:

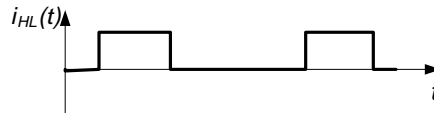


Der Effektivwert des Netzstromes beträgt somit

$$i_{N_eff} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (5-4)$$

Strom im Halbleiter:

Der Strom in einem der sechs Halbleiter hat folgenden zeitlichen Verlauf (dreiphasiger Gleichrichter, ideal geglätteter Gleichstrom):



Daraus ergibt sich folgender Effektiv- und Mittelwert (avg = average):

$$i_{HL_eff} = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d \quad (5-5)$$

$$i_{HL_avg} = \frac{1}{3} I_d \quad (5-6)$$

Mit Effektiv- und Mittelwert des Stromes lassen sich die Verluste im Halbleiter einfach bestimmen.

Gesteuerte Gleichrichterbrücke

Mit Thyristoren lässt sich wie bei der B2 die Gleichspannung mit dem Zündwinkel α einstellen. Die Phasenlage zwischen Netzstrom und Netzspannung und damit der Leistungsfaktor wird auch hier (bei Vernachlässigung der Kommutierung) durch den Zündwinkel bestimmt.

$$U_d = U_{dio} \cos \alpha \quad (5-7)$$

Bei Belastung nimmt auch bei einem realen gesteuerten Gleichrichter die DC-Spannung leicht ab.

Das folgende Bild zeigt die Gleichspannung mit ihrem Mittelwert für einen Zündwinkel von $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$. Eingezeichnet ist auch der Netzstrom, der bei L-Glättung immer noch rechteckförmig ist. Zu beachten ist die Phasenverschiebung des Stromes zur Netzspannung, die bei idealer Kommutierung dem Zündwinkel α entspricht. Dies führt zu zusätzlichem Blindleistungsbezug vom Netz.

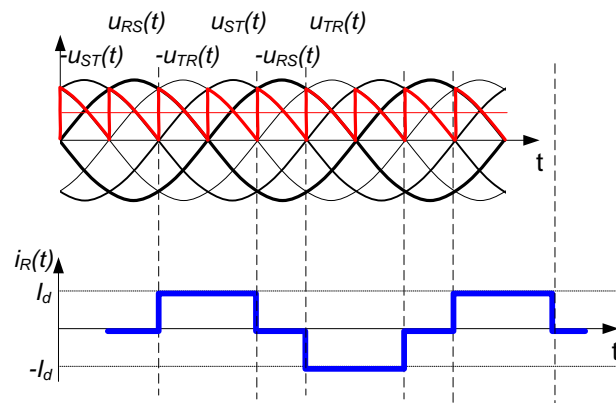
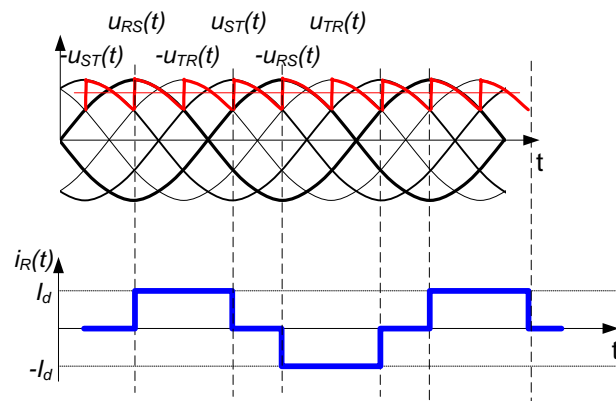
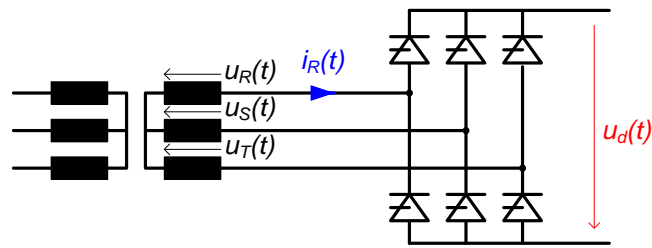


Abb. 5-11: Kurvenformen der gesteuerten B6 mit idealer Stromglättung ($L_d = \infty$)

5.4 Anwendungen

5.4.1 Einsatz zur Speisung von Gleichstrommaschinen

Die behandelten gesteuerten Stromrichter erlauben einen Betrieb in zwei Quadranten (eine Stromrichtung, beide Spannungspolaritäten). Wird der Ankerkreis einer Gleichstrommaschine (GM) damit gespeist, ist demzufolge in einer Drehrichtung Motorbetrieb, und in der anderen Generatorbetrieb möglich. Um auch die anderen beiden Quadranten benutzen zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- die Erregung der GM kann umgeschaltet werden
- der Ankerkreis kann nach dem Stromrichter umgepolt werden
- zwei Stromrichtereinheiten werden zu einem Vierquadrantenstromrichter zusammengefügt werden

Zum Betrieb von Gleichstrommaschinen werden in der Regel dreiphasige Gleichrichter eingesetzt, ausser bei kleinen Leistungen oder bei Bahnanwendungen.

Gleichrichter zur Speisung des Anker- und des Erregerkreises von Gleichstrommaschinen sind in grosser Stückzahl im Einsatz.

5.4.2 Weitere Anwendungen

Je ein Umkehrstromrichter pro Phase kann zur Speisung einer langsamlaufenden Synchronmaschine eingesetzt werden. Die Ausgangsspannung wird dabei langsam, aber kontinuierlich, sinusförmig verändert. Man spricht dabei vom Direktumrichter (DUR).

Zwei Thyristorstromrichter, einer auf der Netz- und einer auf der Maschinenseite, die gleichstromseitig über eine Drossel zusammengeschaltet werden, können zur Speisung einer Synchronmaschine eingesetzt werden. Diese Anwendung wird als Stromrichter Synchronmotor bezeichnet.

Eine häufige Anwendung ist die Speisung des Zwischenkreises eines U-Umrichters (Umrichter mit Spannungszwischenkreis).

Gleichrichter werden zur Speisung von DC-Lasten bis in höchste Leistungsbereiche realisiert (z.B. Elektrolyse, siehe Bild in Kapitel 5.1) .