

4 Netzgeführte Stromrichterschaltungen

In netzgeführten Stromrichtern wird die Wechselspannung des speisenden Netzes nicht nur zur Spannungsbildung auf der Ausgangsseite benutzt, sondern sie dient auch als treibende Kraft beim Wechsel der Stromführung (Kommutierung) innerhalb der Halbleiterventile. Beim Zünden eines Folgeventils mit höherer, positiver Sperrspannung setzt automatisch ein Kommutierungsvorgang ein, der das noch leitende Ventil stromlos macht. Da die Netzspannung für jedes einzelne Ventil nur während einer halben Periode als Triebkraft für die Kommutierung zur Verfügung steht, ist der Aussteuerbereich begrenzt. Als Halbleiterventile kommen in netzgeführten Stromrichterschaltungen Thyristoren und/oder Dioden zum Einsatz.

Netzgeführte Stromrichter sind die am häufigsten eingesetzte Stromrichtervariante, da sie direkt an das fast überall vorhandene Wechsel- bzw. Drehstromnetz angeschlossen werden. Sie speisen entweder direkt einen Gleich- oder Wechselstromverbraucher oder aber dienen als Versorgungsglied für weitere Stromrichterstufen, z. B. in Frequenzumformern. Ihr Leistungsspektrum reicht von einigen Watt in Netzteilen bis über 1 GW in der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Wegen der vielen positiven Eigenschaften werden heute praktisch nur noch Brückenschaltungen (B2, B6) ausgeführt. Die Mittelpunktschaltungen (M1, M3, M6) sind wegen des Erfordernisses eines Transformators für das moderne Energiemanagement nicht mehr von Interesse.

Je nach Ausführungsform können netzgeführte Stromrichterschaltungen die Umwandlungsmerkmale eines Gleichrichters (AC/DC), Wechselrichters (DC/AC) oder Umrichters (AC/AC) erfüllen. So entspricht z. B. eine einfache Diodenbrücke einem Gleichrichter mit fester Ausgangsspannung, eine halb gesteuerte Dioden-Thyristorbrücke einem Gleichrichter mit variabler Ausgangsspannung, eine voll gesteuerte Thyristorbrücke einem variablen Gleich- und Wechselrichter und schließlich eine voll gesteuerte Thyristor-Doppelbrücke einem Vierquadrantenstromrichter (Umkehrstromrichter) oder einem Wechselspannungsumrichter (Direktumrichter).

Bei der genaueren Betrachtung und Beschreibung netzgeführter Stromrichterschaltungen muss zwischen den idealen Eigenschaften und den Einflüssen durch den sog. Lück- und Kommutierungsbetrieb unterschieden werden. Insbesondere der Lückbetrieb drückt sich durch enorme Nichtlinearitäten in der Steuerfunktion des Stromrichters aus, da hierbei eine starke Kopplung zwischen der Ein- und Ausgangsseite auftritt. Da der Aufbau einer einphasigen Brückenschaltung (B2)

relativ einfach und übersichtlich ist, sollen die komplizierten Vorgänge beim Lücken und bei der Stromübergabe (Kommutieren) zunächst dafür berechnet und dann auf die dreiphasige Brückenschaltung übertragen werden.

4.1 Wechselstrom-Brückenschaltung (B2)

Die Bezeichnung B2-Stromrichter gibt an, dass es sich um eine zweipulsige Brückenschaltung handelt, die im unteren Leistungsbereich bis max. 3 kW in Netzteilen, Ladegeräten und Gleichstromantrieben eingesetzt wird. Die B2-Schaltung entspricht formal der Reihenschaltung zweier M2-Schaltungen. Da sie beide Gleichstromanschlüsse am Ausgang bildet, macht sie einen Stromrichtertransformator mit Mittenanzapfung auf der Netzseite überflüssig. Der Anschluss der Wechselstrom-Brückenschaltung erfolgt in der Regel zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter ($U_L = 230 \text{ V}$). In Ausnahmefällen können B2-Stromrichter zur Leistungssteigerung auch zwischen zwei Außenleitern ($U_L = 400 \text{ V}$) betrieben werden.

Unter der Pulszahl p oder Pulsigkeit versteht man die Anzahl der periodischen Vorgänge in der Gleichspannung während einer Periode des Wechselstromnetzes. Um Verwechslungen bei einer Fourier-Zerlegung der Stromrichtergrößen zu vermeiden, muss man sich deshalb bei harmonischen Analysen entweder für die Netzfrequenz f oder für die Grundswingungsfrequenz f_1 auf der Gleichstromseite als Bezugfrequenz entscheiden. Dabei gelten für den B2-Stromrichter die Beziehungen:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= p\omega = 2\omega = 4\pi f && \text{Gleichstromkreis,} \\ \omega_1 &= \omega = 2\pi f && \text{Wechselstromkreis.} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Üblicherweise wählt man die Netzfrequenz als Bezugsgröße, d. h., $f_1 = 2f = 100 \text{ Hz}$ im Gleichstromkreis und $f_1 = f = 50 \text{ Hz}$ im Wechselstromkreis. Wegen des sinusförmigen Spannungsverlaufs auf der Netzseite, müssen bei Leistungsbetrachtungen nur die Oberschwingungsanteile des nichtsinusförmigen Netzstroms gemäß Kapitel 2.4.4.1 berücksichtigt werden. Dies lässt sich rechentechnisch noch leicht bewältigen und messtechnisch einfach nachvollziehen. Hingegen sind auf der Gleichstromseite Spannung und Strom verzerrt, sodass eine harmonische Analyse der Leistung einen hohen mathematischen Aufwand erforderlich macht (vgl. Kapitel 2.4.4.2).

Ausgehend vom idealen Verhalten einer ungesteuerten und einer voll gesteuerten B2-Schaltung, sollen im Folgenden die komplizierten, nichtlinearen Zusammenhänge des Lück- und Kommutierungsbetriebs abgeleitet und die daraus resultie-

renden Steuerfunktionen näher diskutiert werden. Da netzgeführte Stromrichter in der Regel Gleichstromverbraucher speisen, kommt bei diesem Stromrichtertyp dem arithmetischen Mittelwert besondere Bedeutung zu.

4.1.1 Ungesteuerter Betrieb

Der sog. ungesteuerte Betrieb eines netzgeführten Stromrichters liegt vor, wenn sämtliche Halbleiterventile als Leistungsdiode ausgeführt sind. Bild 4.1 zeigt das zugehörige Schaltbild sowie die Strom- und Spannungsverläufe unter der idealisierten Voraussetzung, dass ein vollkommen glatter Gleichstrom fließt. Wegen der hohen Welligkeit der Gleichspannung lässt sich dies nur theoretisch durch die Annahme einer unendlich großen Glättungsinduktivität im Gleichstromkreis erreichen. In den nachfolgenden Kapiteln wird diese vereinfachte Betrachtungsweise allerdings Schritt für Schritt der Realität angepasst.

Die Gleichspannungsbildung geschieht durch periodisches Durchschalten diagonalen Diodenpaare (D) in den Nulldurchgängen der Netzspannung. Das heißt, für die positiven Spannungshalbschwingungen werden D1, D2 leitend, und die negativen Halbschwingungen schalten D3, D4 aufgrund ihrer entgegengesetzten Schaltungsanordnung so durch, dass sie am Ausgang positiv erscheinen. Dieses sog. Umklappen ist ein wesentliches Merkmal der B2-Schaltung gegenüber der Wechselwegschaltung (W1).

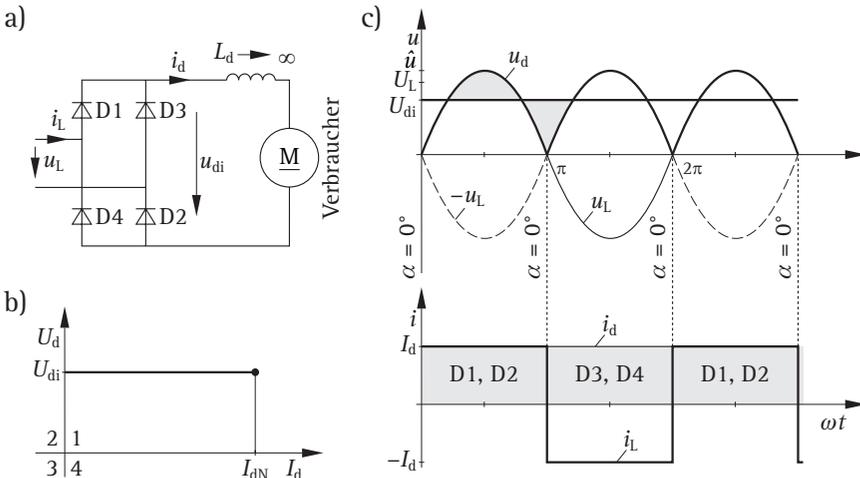


Bild 4.1 Ungesteuerte, ideale Wechselstrom-Brückenschaltung – a) Schaltbild, b) Belastungskennlinie, c) Verläufe

Dadurch ergibt sich eine Grundschwingungsfrequenz von 100 Hz im pulsierenden Gleichstromkreis. Für den arithmetischen Mittelwert der pulsierenden Gleichspannung folgt mit Gl. (2.10) der Ansatz:

$$U_{\text{di}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \hat{u} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2\hat{u}}{\pi}. \quad (4.2)$$

Diesen höchsten, arithmetischen Mittelwert, den ein netzgeführter B2-Stromrichter im Idealfall an seinen Klemmen abgeben kann, bezeichnet man als ideale Leerlaufgleichspannung:

$$U_{\text{di}} = \frac{2\hat{u}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_L = 0,9 \cdot U_L. \quad (4.3)$$

Am 230-V-Wechselstromnetz errechnet sich die ideale Leerlaufgleichspannung zu 207 V. Um den Formfaktor und die Welligkeit der pulsierenden Gleichspannung angeben zu können, muss zunächst deren Effektivwert nach Gl. (2.18) ermittelt werden:

$$U_{\text{d,eff}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (\hat{u} \sin \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = U_L. \quad (4.4)$$

Dieses Ergebnis zeigt, dass der Effektivwert einer Größe nur von den Zeitflächen und nicht von deren Vorzeichen abhängt. Das Verhältnis von gesamtem Effektivwert zum arithmetischen Mittelwert (Gleichanteil) ergibt gemäß Gl. (2.17) den Formfaktor der pulsierenden Gleichspannung:

$$F_u = \frac{U_{\text{d,eff}}}{U_{\text{di}}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 = 111 \% \quad \text{Formfaktor.} \quad (4.5)$$

Aus dem Formfaktor wiederum lässt sich sofort der zugehörige Wert für die Welligkeit mithilfe von Gl. (2.19) berechnen:

$$w_u = \sqrt{F_u^2 - 1} = 0,48 = 48 \% \quad \text{Welligkeit.} \quad (4.6)$$

Der Vollständigkeit halber sei noch einmal daran erinnert, dass der Formfaktor bei einer vollkommen glatten Gleichgröße eins und die Welligkeit null betragen. Da die pulsierende Gleichspannung eine Mischgröße mit Gleich- und Wechselanteil ist, lassen sich über eine Fourier-Reihendarstellung auch die Effektivwerte der Harmonischen mathematisch ableiten. Für die Fourier-Koeffizienten folgt:

$$a_m = \frac{2\hat{u}}{\pi} \left(\frac{1}{2m+1} - \frac{1}{2m-1} \right), \quad \text{für } m = 2, 4, 6, 8, \dots, \infty, \quad (4.7)$$

$$b_m = 0,$$

wobei b_m generell und a_m für ungerade Ordnungszahlen nicht existieren. Über Gl. (2.11) folgt schließlich für die Effektivwerte der Harmonischen:

$$U_{d,m} = \frac{4\hat{u}}{\sqrt{2} \pi (2m-1)(2m+1)}, \quad \text{für } m = 2, 4, 6, 8, \dots, \infty. \quad (4.8)$$

Da der ideale Gleichstrom nur aus einem Gleichanteil I_d besteht, entfällt eine harmonische Zerlegung nach *Fourier*.

Auf der Wechselstromseite ist die Spannung ideal sinusförmig, weshalb nur der blockförmige Wechselstrom einer harmonischen Analyse unterzogen werden muss. Dazu kann Gl. (2.22) verwendet werden, wenn die Blocklänge auf $\lambda = \pi$ gesetzt wird:

$$I_{L,m} = \frac{2\sqrt{2} I_d}{m\pi} = \frac{I_{L1}}{m}, \quad \text{für } m = 1, 3, 5, 7, \dots, \infty. \quad (4.9)$$

Während die geradzahigen Harmonischen im Netzstrom nicht enthalten sind, nehmen die ungeradzahigen Harmonischen umgekehrt proportional zur Ordnungszahl ab. Dieser hohe Oberschwingungsanteil schlägt sich in einem schlechten Grundschwingungsgehalt nieder, der über Gl. (2.23) errechnet werden kann:

$$g_i = \frac{I_{L1}}{I_{L,\text{eff}}} = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_d}{I_d} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9. \quad (4.10)$$

Wegen der Einschaltzeitpunkte der Dioden in den Nulldurchgängen der Netzspannung ist der Verschiebungsfaktor der Grundschwingung $\cos\varphi_1$ immer eins, sodass in ungesteuerten Brücken mit rechteckförmigem Netzstrom der Leistungsfaktor λ immer gleich dem Grundschwingungsgehalt g_i ist. Für den Fall einer Gegenspannung im Gleichstromkreis oder eines welligen Gleichstroms ändern sich diese Zahlenverhältnisse.

Die Belastungskennlinie des idealen, ungesteuerten B2-Gleichrichters besteht gemäß Bild 4.1 aus einer Waagerechten, weshalb die Einsatzmöglichkeiten dieses Stromrichtertyps sehr beschränkt sind. In der Regel finden Netzgleichrichter in sog. Netzgeräten, Feldgleichrichtern von Gleichstrommaschinen ($U_f = 200 \text{ V}$) sowie als Eingangsgleichrichter in Frequenzumformern Verwendung.