HANSER

Leistungselektronik

Rainer Felderhoff

ISBN 3-446-40261-6

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
http://www.hanser.de/3-446-40261-6 sowie im Buchhandel

1 Grundlagen der Leistungselektronik

1.1 Einführung

Lernziele

Der Lernende …

- erläutert die Begriffe Schalten, Stellen, Umwandeln,
- begründet anhand der Vorteile der Leistungselektronik gegenüber der konventionellen Energietechnik die hohe Wirtschaftlichkeit von Stromrichteranlagen,
- erläutert die wesentlichen Stromrichtergrundfunktionen,
- begründet, weshalb in der Leistungselektronik Leistungshalbleiter ausschließlich im Schaltbetrieb gefahren werden,
- erläutert die Begriffe selbstgeführter und netzgeführter Stromrichter,
- beschreibt die in der Leistungselektronik gängigen Leistungssteuerverfahren und kann entsprechende Anwendungsbeispiele aus der Praxis zuordnen.

1.1.1 Energieübertragung mit Geräten bzw. Anlagen der Leistungselektronik

Die Leistungselektronik als Teilgebiet der Automatisierungstechnik umfasst das Gebiet der direkten Beeinflussung elektrischer Energieflüsse mittels elektronischer Bauelemente durch:

- Schalten
- Verstellen (Steuern)
- Umwandeln

Schalten

Hierbei wird durch die schaltende Einrichtung ein elektrischer Energiefluss ermöglicht oder unterbunden. Der Energiefluss wird durch die Schalteinrichtung nicht beeinflusst.

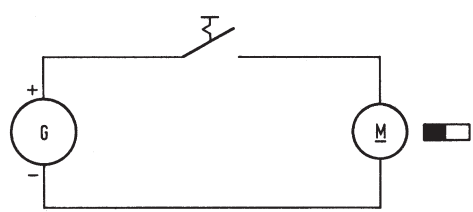


Bild 1.1–1

Verstellen

Hierbei wird durch die verstellende Einrichtung ein elektrischer Energiefluss durch Ändern von Strom und/oder Spannung beeinflusst, wobei wesentliche Systemgrößen wie Frequenz und/oder Phasenzahl nicht geändert werden.

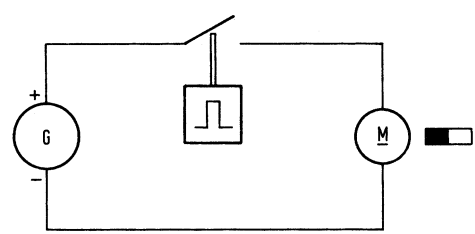


Bild 1.1–2

Umwandeln

Hierbei wird durch die umwandelnde Einrichtung ein elektrischer Energiefluss zwischen unterschiedlichen Systemen ermöglicht, die sich z. B. hinsichtlich Frequenz und/oder Phasenzahl unterscheiden.

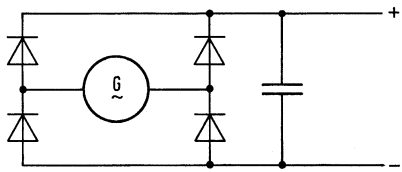


Bild 1.1–3

Eine klare Trennung dieser drei Funktionen kann nicht immer gegeben sein, Übergänge sind in Grenzfällen fließend. Weiterhin gehören zum Gebiet der Leistungselektronik Teile der Datenverarbeitung und Signalelektronik.

Die Vorteile der Leistungselektronik gegenüber anderen Baugruppen zum Schalten, Verstellen und Umwandeln sind:

Keine mechanisch bewegten Teile, kein Verschleiß, geringe Wartungs- und Unterhaltungskosten, hohe Lebensdauer, hohe Stellgeschwindigkeit, hierdurch die Möglichkeit der Lösung schwieriger Regelungsaufgaben, geringes Gewicht, kleiner Platzbedarf, guter Wirkungsgrad, geringe Verluste, hohes Potenzial für Energiesparmaßnahmen, kostengünstige Anlagen.

Neben den genannten Vorteilen muss jedoch der Nachteil der Netzrückwirkungen erwähnt werden. Rückwirkungen sollen möglichst gering sein. Stromrichter wirken meist in unerwünschter Weise auf ihre direkte Umgebung und auf das speisende Netz ein. Vor allem der typischerweise nichtsinusförmige Eingangsstrom I_1 stört den Betrieb des Netzes 1 und andere, am Netz 1 arbeitende Geräte (Netzrückwirkungen).

Ferner gehen von den Ein- und Ausgangsleitungen und vom Stromrichter selbst höherfrequente Felder aus, die nachrichtentechnische und messtechnische Einrichtungen stören können.

Man spricht hier von elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV).

Nach DIN VDE 0870 Teil I ist EMV die Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in ihrer Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne die Umgebung unzulässig zu beeinflussen.

Zukünftig müssen alle elektrischen Geräte diesen Anspruch erfüllen!

1.1.2 Stromrichtergrundfunktionen

1. Gleichrichter

Gleichrichter formen Wechselstromenergie in Gleichstromenergie um. Schaltungen mit ein- und dreiphasigem Eingang sind gebräuchlich. Wird der Gleichrichter mit Dioden aufgebaut, ist die Ausgangsspannung im Gleichrichter selbst nicht veränderbar und man erhält einen ungesteuerten Gleichrichter. Bei Verwendung von Thyristoren ist über die Anschnittsteuerung

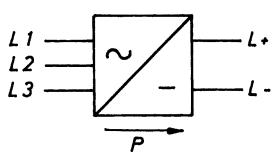


Bild 1.1–4

kontinuierliche Veränderung der Gleichspannung möglich (gesteuerter Gleichrichter).

2. Wechselrichter

Wechselrichter formen Gleichstromenergie in Wechselstromenergie um. Je nach Anwendung können die Ausgangsgrößen Spannung und Frequenz konstant oder veränderbar sein. Ein- und dreiphasige Ausgänge sind möglich.

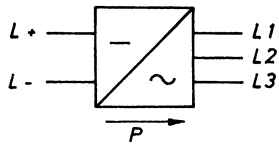


Bild 1.1–5

3. Gleichstromumrichter (Gleichstromsteller)

Gleichstromumrichter erzeugen aus Gleichstromquellen (Akkumulatoren, U-Bahn Fahrleitung) eine stufenlos stellbare Gleichspannung.

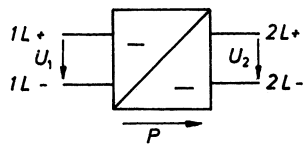


Bild 1.1–6

4. Wechselstromsteller (Drehstromsteller)

Wechselstromsteller (Drehstromsteller) erzeugen aus einer vorhandenen Wechsel-/Drehstromquelle eine stufenlos einstellbare Wechsel-/Drehspannung.

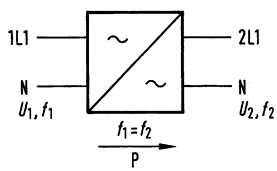


Bild 1.1–7

5. Wechselstromumrichter (Frequenzumrichter)

Der Sinn eines solchen Gerätes besteht meistens in der Frequenzumformung. Dazu wird oft mit einem Gleichrichter zunächst ein Gleichstromzwischenkreis gespeist, aus dem dann ein Wechselrichter die gewünschte Ausgangsspannung formt. Es gibt dabei die unter 1. und 2. erwähnten Möglichkeiten.

Wesentlich für alle diese Stromrichter ist, dass die Energieumformungen nahezu verlustlos geschehen, da es sich immer um die Umformung großer bis sehr großer Energien handelt.

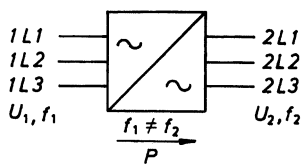


Bild 1.1–8

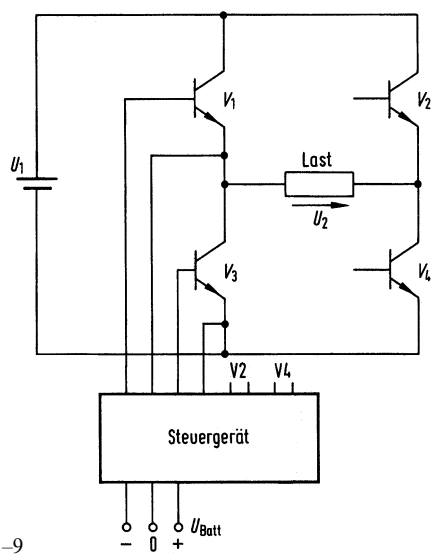


Bild 1.1–9

Übung 1.1–1

Konstruieren Sie zu Bild 1.1–9 unter Berücksichtigung von Bild 1.1–10 $U_2(t)$.

Welchen Wert nimmt $\hat{u}_2$ an?

Welcher Grundfunktion ist diese Stromrichterschaltung zuzuordnen?

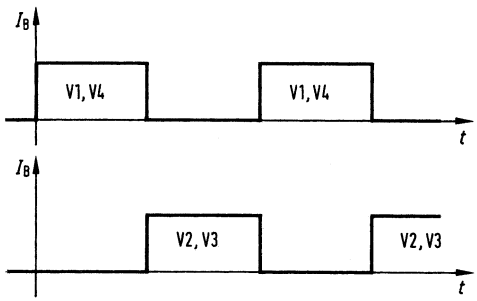


Bild 1.1–10 $I_B \triangleq$ Basisstrom

1.1.3 Schaltbetrieb

In 1.1 ist schon klar geworden, dass der Schaltbetrieb begriffsbestimmend und sehr wichtig für die Leistungselektronik ist. Nur so sind die großen bis sehr großen Leistungen mit den Stromrichtergeräten und -anlagen zu beherrschen. Beispiel 1.1–1 soll dies verdeutlichen.

Beispiel 1.1–1

Bild 1.1–11 zeigt drei Möglichkeiten zur Drehzahlsteuerung eines Gleichstrommotors:

1. auf klassische Weise mit einem Vorwiderstand,
2. mit einem analog angesteuerten Transistor,
3. mit einem im Schaltbetrieb arbeitenden Transistor.

In jedem Falle soll die Spannung am Motor 60 V und der Motorstrom 30 A betragen. In 3. wird der Spannungsabfall am leitenden Transistor mit 0,3 V angenommen.

Es sind die Verluste und Wirkungsgrade der Drehzahl-Steuerschaltungen zu ermitteln.

Zur Vereinfachung sollen nur die Durchlassverluste des Transistors berücksichtigt werden.

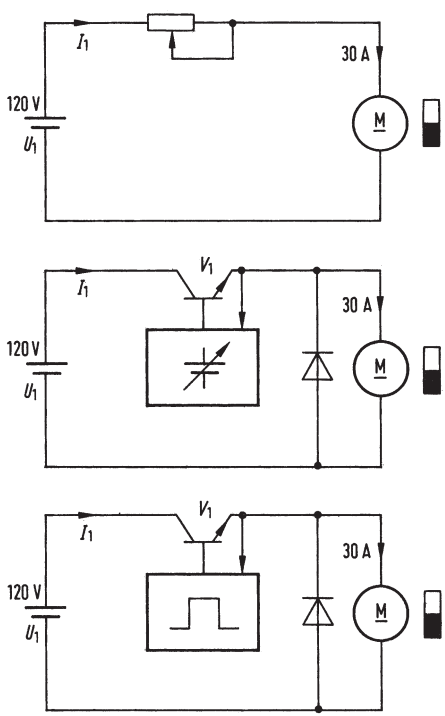


Bild 1.1–11

Lösung:

zu 1.

abgegebene Leistung

$$P_{ab} = U_{Mot} \cdot I_{Mot}$$
$$= 60\,V \cdot 30\,A$$
$$\underline{P_{ab} = 1\,800\,W}$$

zugeführte Leistung

$$P_{zu} = U_1 \cdot I_1$$
$$P_{zu} = 120\,V \cdot 30\,A$$
$$\underline{P_{zu} = 3\,600\,W}$$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$
$$\underline{\underline{\eta = 0{,}5}}$$

Verluste im Vorwiderstand

$$P_v = U_{R1} \cdot I$$
$$P_v = 60\,V \cdot 30\,A$$
$$\underline{\underline{P_v = 1\,800\,W}}$$

zu 2.

Der Transistor wird mit Hilfe des analog veränderlichen Basisstromes als steuerbarer Widerstand eingesetzt.

Es ergeben sich prinzipiell die gleichen Ergebnisse wie unter 1.

zu 3.

Der Transistor ist während der Einschaltzeit $T/2$ leitend und während der Ausschaltzeit $T/2$ nichtleitend. Im Mittel beträgt also die Spannung am Motor, wie gefordert, 60 V.

Abgegebene Leistung während der Leitphase von V1

$$P_{ab1} = 120\,V \cdot 30\,A$$
$$\underline{P_{ab1} = 3\,600\,W}$$

Abgegebene Leistung während der Sperrphase von V1

$$\underline{P_{ab2} = 0}$$

Durchschnittliche abgegebene Leistung

$$\underline{P_{ab} = 1\,800\,W}$$

Verlustleitung im Transistor während der Leitphase

$$P_{v1} = 0{,}3\,V \cdot 30\,A$$
$$\underline{P_{v1} = 9\,W}$$

Verlustleistung im Transistor während der Sperrphase

$$\underline{P_{v2} = 0}$$

(laut Aufgabenstellung)

Durchschnittliche Verlustleistung im Transistor

$$P_v = 4{,}5\ \text{W}$$

Wirkungsgrad der Steuerschaltung

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_v}$$

$$\eta = \frac{1800\ \text{W}}{1804{,}5\ \text{W}}$$

$$\eta = 99{,}75\,\%$$

Wenn auch weitere Verluste im Transistor und in der gesamten Schaltung vernachlässigt wurden, bleibt als qualitatives Ergebnis:

Durch den Schaltbetrieb sind die Verluste in Stromrichtern gering bzw. die Wirkungsgrade sehr groß.

In der Praxis sind Wirkungsgrade von 98 bis 99 % durchaus realistisch.

1.1.4 Aufbau einer Stromrichteranlage

Bild 1.1–12 zeigt den Aufbau einer Stromrichteranlage am Beispiel eines geregelten Gleichstromantriebs. Sie besteht aus einem Stromrichtertransformator, einer Brückenschaltung mit vier Thyristoren (Stromrichtersatz), Glättungsdrossel L_d, Steuersatz zum Schalten (Zünden) der Thyristoren. Als Zubehör gehören auch Strom- und Drehzahl-Istwerterfassung, Sollwertgeber und Regler dazu.

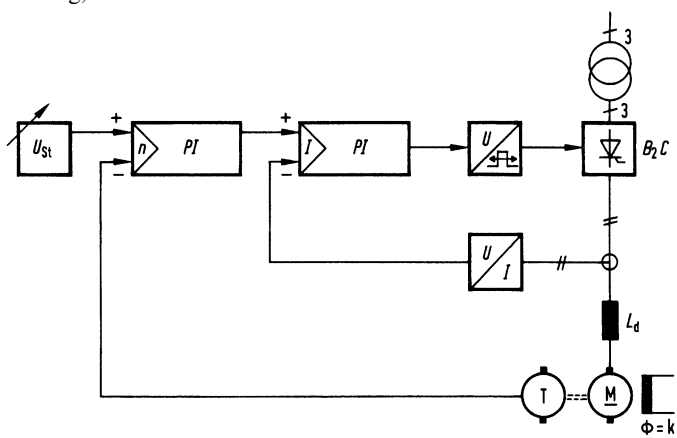


Bild 1.1–12

1.1.5 Innere Wirkungsweise der Stromrichter

Darunter versteht man unter anderem die Führung des Stromrichters, d. h. die Frage, wie der Laststrom im Falle mehrerer Stromwege von einem Stromweg auf den nächsten wechselt. Diesen Vorgang nennt man Kommutierung.

Schaltung 1.1–13 hat zum Beispiel zwei Stromwege, über die abwechselnd der Laststrom fließt. Stromweg I vom Transformator (oben) über V1 – Drossel – Motor – V4 zurück zum Transformator, Stromweg II vom Transformator (unten) über V2 – Drossel – Motor – V3 zurück zum Transformator. Zum Übergang sind die Eingangswechselspannung und vor allem deren Polaritätswechsel nötig. Man spricht in diesem Falle von Netzführung oder netzgeführtem Stromrichter.

Daneben existieren Stromrichter, bei denen der Stromwegewechsel durch die Lastwechselspannung bewirkt wird (lastgeführte Stromrichter).

Netzgeführte und lastgeführte Stromrichter bilden die Gruppe der fremdgeführten Stromrichter. Bei ihnen kommt die Kommutierungsspannung von außerhalb des Stromrichters.

In Schaltung 1.1–9 schalten die Transistoren nicht durch eine äußere Kommutierungsspannung, sondern allein durch die vom Steuergerät vorgegebene Folge der Basisströme. Die Transistoren können über die Basis ein- und ausgeschaltet werden.

Da das Steuergerät Teil des Stromrichters ist, spricht man vom selbstgeführten Stromrichter.

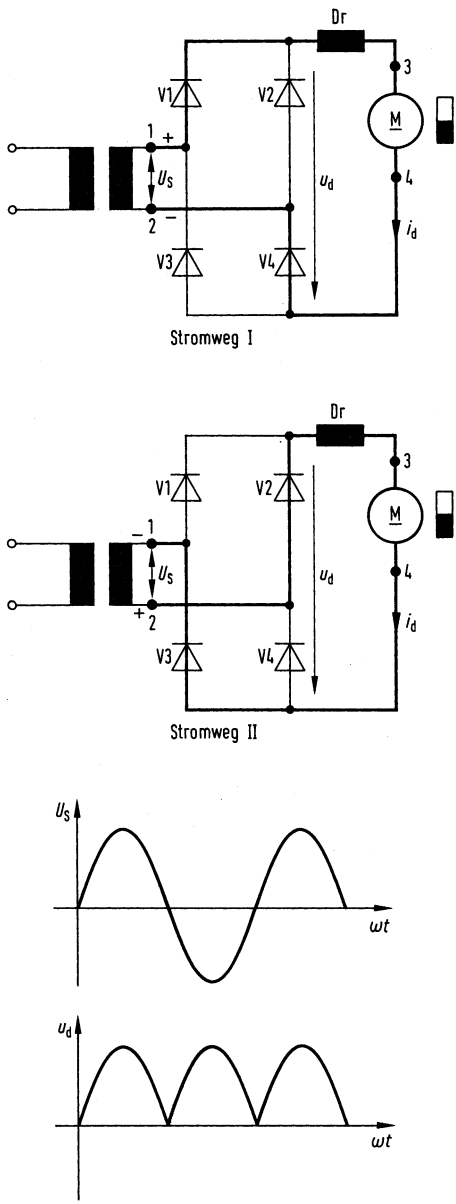


Bild 1.1–13 Stromwege und Spannungsbildung einer Einphasenbrücke (B_2U)

1.1.6 Leistungssteuerverfahren

Bei der Helligkeitssteuerung von Glühlampen wird z. B. die so genannte Anschnittsteuerung angewendet. Diese Leistungssteuerung geschieht durch das zeitlich verzögerte Einschalten des Halbleiters in jeder Halbwelle. Durch Änderung des Anschnittwinkels ist die Verbraucherleistung stufenlos verstellbar (Bild 1.1–14).

Man spricht von Phasenabschnittsteuerung, wenn nach jedem Nulldurchgang der Leistungshalbleiter automatisch leitend wird und während der Leitendphase zu jedem Zeitpunkt in der betreffenden Halbwelle gesperrt werden kann.

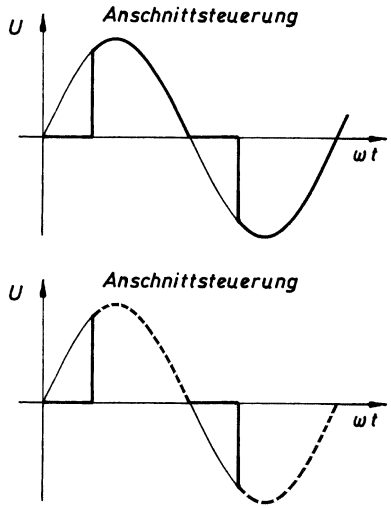


Bild 1.1–14

In Temperaturregelschaltungen findet man oft die Schwingungspaketsteuerung (Periodengruppensteuerung). Dabei werden jeweils nur ganze Sinusschwingungen in unterschiedlicher Anzahl an den Heizwiderstand gelegt (Bild 1.1–15)

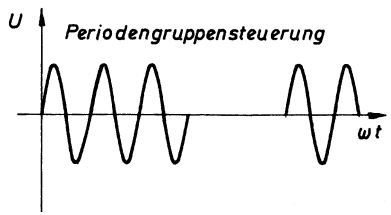


Bild 1.1–15

Bild 1.1–16 zeigt das Prinzip der Leistungssteuerung durch eine Pulsbreitenmodulation (pulse width modulation, PWM), wie sie bei Gleichstromumrichtern verwendet wird. Die Leistung wird durch Veränderung des Einschaltverhältnisses T_2/T gesteuert (siehe auch Schaltung 1.1–11, 3. Möglichkeit).

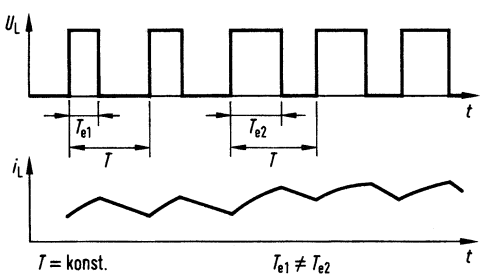


Bild 1.1–16 Leistungssteuerung durch PWM

1.1.7 Anwendungen

Ungesteuerte Gleichrichter werden z. B. in Elektrolyseanlagen zur Aluminium-, Kupfer-, Zink-, Chlor-, Wasserstoffgewinnung usw. eingesetzt. Bei Ausgangsgleichspannungen bis 1 kV (Leerlaufspannung) werden Gleichströme bis 150 kA erzeugt (Al-Gewinnung).

Eine weitere Anwendung ungesteuerter Gleichrichter ist die Speisung von Gleichstromnetzen vor allem für Straßen-, U- und Vollbahnen.

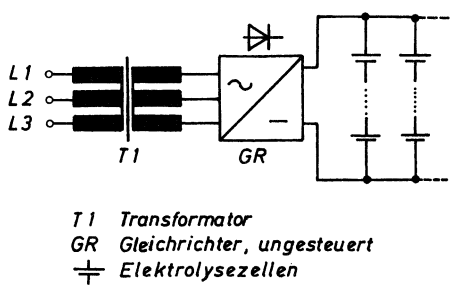


Bild 1.1–17

Der Spannungsbereich solcher Netze liegt zwischen 400 V und 3 kV; die Strecken werden unterwegs mehrmals über so genannte Unterwerke eingespeist, deren Leistungen bis zu mehreren MW betragen.

Größte Leistungen müssen bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) beherrscht werden. Beispielgebend ist die HGÜ Sambesi – Johannesburg. Dort wird in Wasserkraftgeneratoren Drehstrom erzeugt; über einen Transformator wird ein Gleichrichter gespeist, der wiederum die Fernleitung einspeist. Am Ende der Übertragungsstrecke wird über Wechselrichter und Transformator das Verbrauchernetz angeschlossen. Der Vorteil liegt im Wegfall der Leitungsblindwiderstände und der Stromverdrängung. Der Stromrichteraufwand lohnt sich natürlich nur bei langen Strecken (ab ca. 1 500 km).

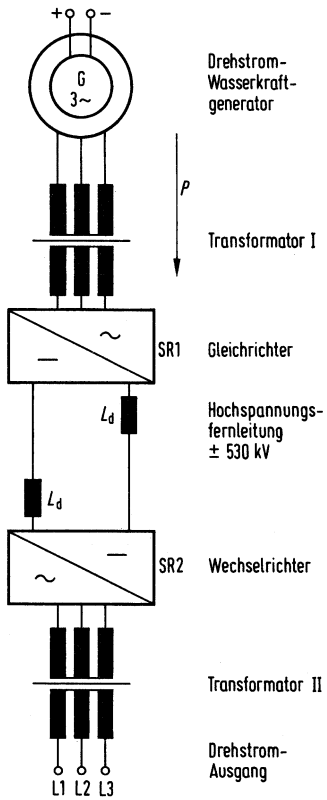


Bild 1.1–18

Da die beiden Stromrichter (SR1 und SR2) völlig identisch aufgebaut sind, lässt sich der Energieaustausch auch in beiden Richtungen durchführen. Man benutzt diese Art der HGÜ als Gleichstromkurzkupplung zwischen zwei asynchronen Netzen. In den letzten Jahren wurden drei Kurzkupplungen in Betrieb genommen, die das westeuropäische Verbundnetz mit dem osteuropäischen verbinden. 1993 wurde im oberpfälzischen Etzenricht eine 600-MW-Kurzkupplung in Betrieb genommen.

Gesteuerte Gleichrichter haben ihre Bedeutung in der Antriebstechnik mit Gleichstrommaschinen bis zu mehreren hundert kW; diese können über Veränderung der Ankerspannung stufenlos in ihrer Drehzahl gesteuert werden. Es können drehzahl- oder momentengeregelte Antriebe realisiert werden.

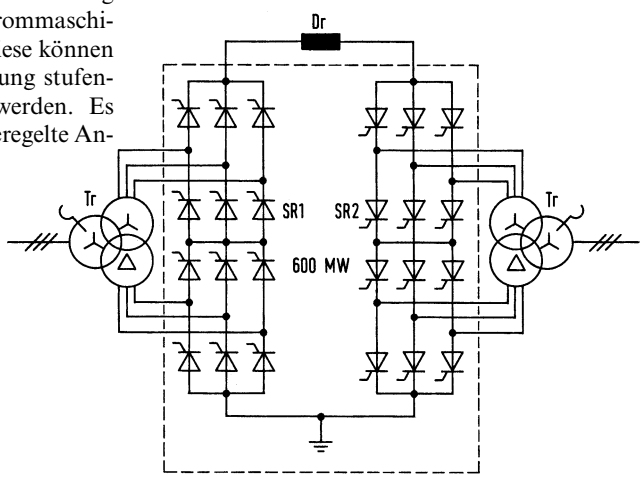
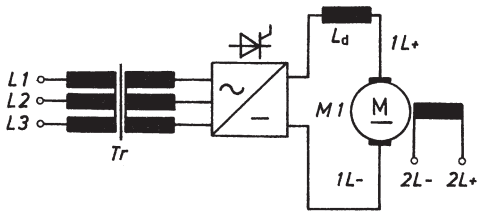


Bild 1.1–19 Stromrichterschaltung des 600-MW-Zwischenkreisumrichters in Etzenricht

Die Schaltung nach Bild 1.1–20 gestattet auch eine Energieumkehr. Soll z. B. ein Kran die Last in kontrollierter Weise absenken, so wird die Gleichstrommaschine als Generator betrieben. Antriebskraft ist dabei die sinkende Hakenlast. Der erzeugte Gleichstom wird durch netzsynchrones Schalten der Thyristoren in Drehstrom umgeformt. Da so mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird, die ins Netz zurückgespeist wird, handelt es sich um eine Nutzbremsung. Das netzsynchrone Schalten der Thyristoren geschieht dabei durch die weiterhin anliegenden Spannungen des Drehstromnetzes und das netzsynchron arbeitende Impulssteuergerät. Deshalb spricht man von einem netzgeführten Wechselrichter.



Tr Transformator
GR Gleichrichter, gesteuert
L_d Glättungsdrossel
M1 Gleichstrommotor

Bild 1.1–20

Dagegen geschieht das Schalten der Thyristoren in einem selbstgeführten Wechselrichter unabhängig von der Netzspannung. Es sind eine Reihe verschiedener Schaltungen mit Dreh- und Wechselstromausgang bekannt. Anwendungen sind vor allem Notstromanlagen und drehzahlgeregelte Antriebe mit Drehstrommaschinen. Es kommen Synchron- und Asynchronmaschinen zur Anwendung.

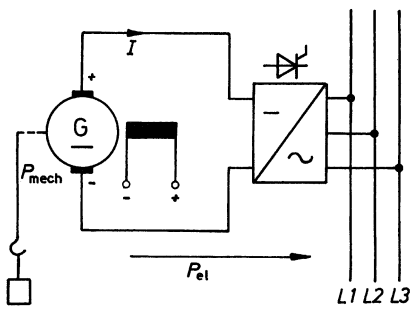


Bild 1.1–21

Wegen der Einfachheit, Betriebssicherheit und Preiswürdigkeit des DS-Motors gegenüber dem G-Motor finden solche Antriebe in zunehmendem Maße dort Anwendung, wo bislang G-Motoren verwendet wurden. Dies ist möglich durch die Entwicklung moderner Leistungshalbleiter, wie IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) oder MOSFETs. Frequenzumrichter mit geringen Abmessungen (70×130×141!), mikrokontrollergesteuert, in der Leistungsklasse 0,18 bis 0,75 kW sind bereits unter 280 € erhältlich. Die Miniaturisierung geht bereits so weit, dass Umwälzpumpen für Heizungsanlagen einen Frequenzumrichter im Motorgehäuse integriert haben. Es lässt sich über die Frequenz die Drehzahl und somit die Warmwassermenge steuern bzw. regeln.

Ein weiteres Anwendungsgebiet, das auch unter die Leistungselektronik fällt, ist der Mikroantrieb. Bürstenlose Gleichstrommotoren mit einem Durchmesser von 1,9 mm und 5,5 mm Länge werden mit der entsprechenden Elektronik in vielen Bereichen der Medizintechnik, in der Optik und der Prozessautomation eingesetzt.

- *Durchmesser Motor:* 1,9 mm
- *Durchmesser Welle:* 0,24 mm
- *Länge:* 5,5 mm
- *Drehmoment bis:* 7,5 µNm
- *max. Drehzahl:* 100 000 rpm

Bild 1.1–22 Bürstenloser Gleichstrommotor (Prinzip Synchronmotor) der Fa. Faulhaber