

ET+A

Leistungselektronik und elektrische Antriebe

Kapitel 12 Frequenzumrichter

Adrian Omlin

Inhaltsverzeichnis Kapitel 12

12	UMRICHTER	3
12.1	Einführung Umrichter	3
12.1.1	Umrichter mit Spannungszwischenkreis	3
12.1.2	Umrichter mit Stromzwischenkreis	4
12.1.3	Direktumrichter	4
12.2	Grundbegriffe	5
12.2.1	Rückspeisefähigkeit	5
12.2.2	Harmonische	6
12.2.3	Leistungsfaktor und $\cos\varphi$	7
12.3	Umrichter mit Spannungszwischenkreis	8
12.3.1	Tabellarischer Vergleich	8
12.3.2	FU mit netzseitigem Diodengleichrichter	9
12.3.3	FU mit Diodengleichrichter und Brems-Chopper mit Bremswiderstand	9
12.3.4	FU mit netzseitigem Umkehrgleichrichter	9
12.3.5	FU mit netz- und maschinenseitigem Wechselrichter	10
12.4	Steuerung und Regelung	11
12.4.1	Regelung auf der Netzseite	11
12.4.2	Regelung auf der Maschinenseite	11
12.5	Weitere Bemerkungen	13
12.5.1	Wirkungsgrad	13
12.5.2	Taktfrequenz	14

12 Umrichter

12.1 Einführung Umrichter

Zur Speisung von drehzahlvariablen Drehfeldmaschinen werden Wechselspannungen und –ströme mit variabler Frequenz und Amplitude benötigt. Kombinationen von Stromrichtern, bei denen am Ein- und am Ausgang Wechselgrößen auftreten, werden als Frequenzumrichter oder Umrichter bezeichnet. Meistens bestehen sie aus einem netzseitigen Stromrichter, aus einem Zwischenkreis, der als Energiespeicher zur Entkoppelung der beiden Seiten dient, und aus einem maschinenseitigen Stromrichter.

12.1.1 Umrichter mit Spannungszwischenkreis

Ist der Energiespeicher zur Entkoppelung der beiden Seiten ein Kondensator, spricht man von einem Umrichter mit Spannungszwischenkreis (U-Umrichter), da der Kondensator die Spannung (mehr oder weniger) konstant hält.

Auf der Maschinenseite kommen selbstgeführte Stromrichter (Wechselrichter) zum Einsatz. Die Leistungshalbleiter müssen abschaltbar sein. Im höheren Leistungsbereich kommen dabei IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor), GTOs (Gate Turn Off Thyristor) oder die dem GTO verwandten IGCTs (Integrated Gate Commutated Thyristor) zum Einsatz. Die Leistungshalbleiter müssen auch rückwärtsleitend sein. Das wird durch eine externe oder eine im Halbleitergehäuse integrierte antiparallele Diode erreicht.

Auf der Netzseite können selbstgeführte oder fremdgeführte Stromrichter zum Einsatz kommen. Bei fremdgeführten Stromrichtern, hier als netzgeführt bezeichnet, können als Leistungshalbleiter Dioden oder Thyristoren zum Einsatz kommen. Man spricht dann von Dioden- oder Thyristorgleichrichtern. Werden Dioden eingesetzt, ist die Zwischenkreisspannung durch die netzseitige Wechselspannung vorgegeben. Ein Rückspeisen von Energie ins Netz ist nicht möglich. Werden Thyristoren eingesetzt, kann die Zwischenkreisspannung eingestellt werden. Wird der Thyristorgleichrichter durch eine zweite, antiparallele Brücke ergänzt, ist auch Energierückspeisung ins Netz möglich. Diese Schaltung wird als Umkehrgleichrichter bezeichnet.

Selbstgeführte Stromrichter (Wechselrichter, in diesem Zusammenhang auch als aktive Gleichrichter bezeichnet) sind aufwändiger, haben aber den Vorteil, dass sich über Pulsmuster und Schaltfrequenz die Harmonischen beeinflussen lassen. Auch lässt sich durch die Regelung der Leistungsfaktor einstellen. Energierückspeisung ins Netz ist möglich. Die folgenden zwei Bilder zeigen als Beispiel zwei Umrichter zur Speisung einer Asynchronmaschine.

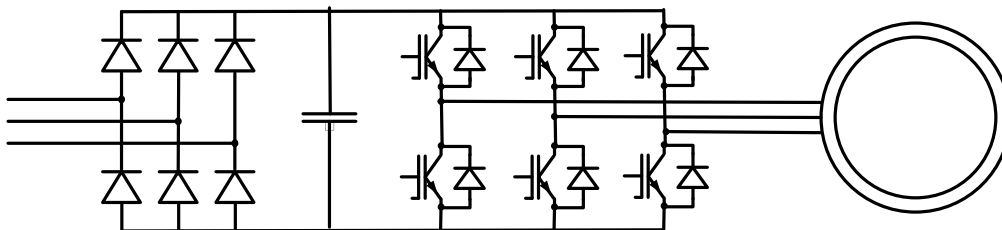


Abb. 12-1: U-Umrichter mit ASM; Netzseite fremdgeführt (Diodengleichrichter)

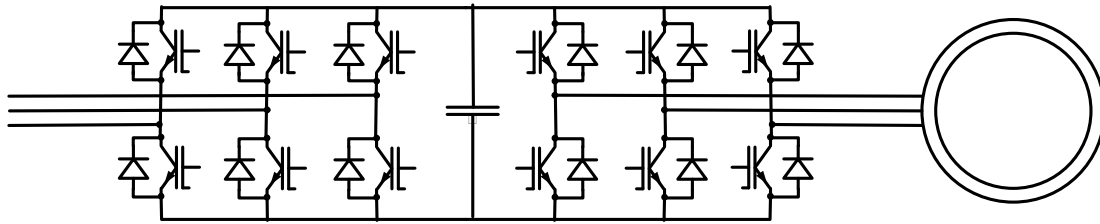


Abb. 12-2: U-Umrichter mit ASM; Netzseite selbstgeführt (aktiver Wechselrichter)

12.1.2 Umrichter mit Stromzwischenkreis

Ist der Energiespeicher zur Entkoppelung zwischen dem netzseitigen und dem maschinenseitigen Stromrichter eine Induktivität, spricht man von einem Umrichter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter), da die Induktivität den Strom (mehr oder weniger) konstant hält.

I-Umrichter werden meist in Kombination mit zwei Thyristorstromrichtern zur Speisung eines Synchronmotors eingesetzt. Dieser Antrieb wird als Stromrichter Synchronmotor bezeichnet.

Da sich durch Serie- und Parallelschaltung von Thyristoren Umrichter fast ohne Leistungsgrenze realisieren lassen, wird dieser Antriebstyp vor allem im obersten Leistungsbereich eingesetzt.

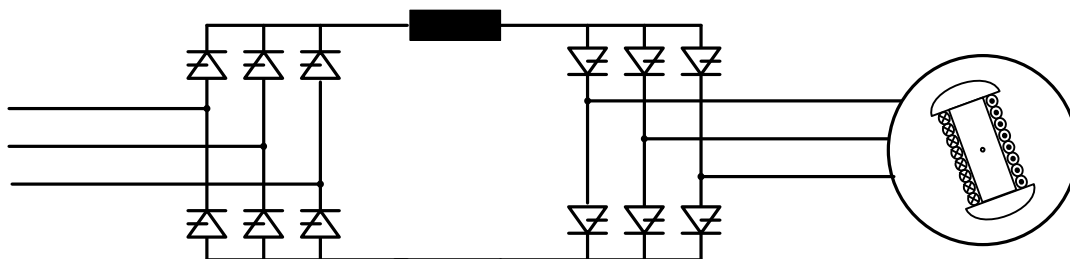


Abb. 12-3: I-Umrichter mit SM (Stromrichter-Synchronmotor)

12.1.3 Direktumrichter

Direktumrichter haben keinen Energiespeicher (L oder C), mit dem die Ein- und Ausgansseite entkoppelt wird. Sie werden seltener eingesetzt.

Im Folgenden wird vertieft auf den am meisten verbreiteten Umrichter mit Spannungszwischenkreis eingegangen.

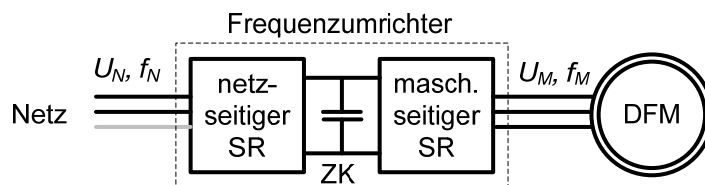
12.2 Grundbegriffe

Wie eingangs erwähnt, gibt es auch den Umrichter mit Stromzwischenkreis und Direktumrichter. Da beide selten sind, liegt hier der Fokus auf dem weitaus am häufigsten eingesetzten Umrichter mit Spannungszwischenkreis.

Ein Frequenzumrichter (FU) besteht aus drei Hauptbaugruppen: maschinenseitiger Stromrichter (SR), netzseitiger Stromrichter und Zwischenkreis (ZK). Der Zwischenkreis besteht im Wesentlichen aus einem Kondensator, der die Zwischenkreis-Gleichspannung glättet und so den maschinen- und netzseitigen Teil entkoppelt.

Der maschinenseitige Stromrichter ist ein Wechselrichter. Er macht aus der Gleichspannung im Zwischenkreis eine dreiphasige Wechselspannung einstellbarer Amplitude und Frequenz entsprechend der gewünschten Drehzahl der Maschine.

Der netzseitige Stromrichter hat die Aufgabe, aus der ein- oder dreiphasigen Wechselspannung des speisenden Netzes die Zwischenkreis-Gleichspannung zu bilden. Dafür kommen verschiedene Technologien zur Anwendung.



U_N : Netzspannung, ein- oder dreiphasig, mit konstanter Frequenz f_N

U_M : Maschinenspannung mit einstellbarer Frequenz f_M

SR: Stromrichter

DFM: Drehfeldmaschine: Asynchron- oder Synchronmaschine

ZK: Zwischenkreis

Abbildung 1: Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis und Drehfeldmaschine

Die Wahl der Technologie des netzseitigen Stromrichters bestimmt im Wesentlichen das Verhalten des FUs in Bezug auf die Netzurückwirkungen (Harmonische, $\cos\varphi$) und in Bezug auf die Einsatzmöglichkeiten (z.B. Rückspeisefähigkeit). Die verschiedenen Technologien werden im Folgenden erklärt und verglichen. Beim Vergleich wird vor allem auf die Rückspeisefähigkeit, die Harmonischen und den Leistungsfaktor bzw. $\cos\varphi$ eingegangen. Diese Begriffe werden in den folgenden Unterkapiteln kurz erklärt.

12.2.1 Rückspeisefähigkeit

Eine elektrische Maschine kann grundsätzlich in beide Richtungen drehen und als Motor oder Generator arbeiten, d.h. antreiben oder bremsen. Man spricht dabei auch von Vierquadranten-Betrieb (Abbildung 2). Der maschinenseitige Wechselrichter kann ebenfalls Energie in beide Richtungen führen. Ob Bremsbetrieb mit einem FU

effektiv möglich ist, hängt von der Bauform des netzseitigen Stromrichters ab: sie bestimmt, ob die Bremsenergie ins Netz zurückgespeist werden kann, ob die Bremsenergie in einem Widerstand verheizt wird oder ob gar kein elektrisches Bremsen möglich ist.

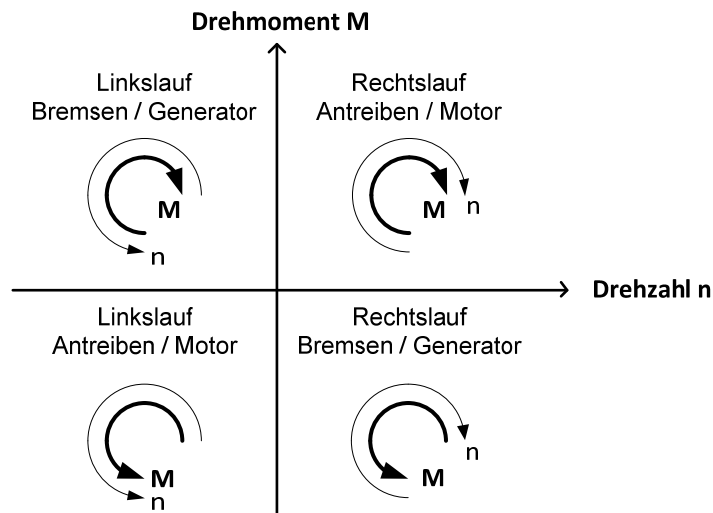


Abbildung 2: Vierquadranten Betrieb einer elektrischen Maschine

Rückspeisen ist insbesondere dann sinnvoll, wenn viel gebremst wird. Das ist unter anderem der Fall bei

- Fahrzeugen (Strasse und Bahn)
- Seilbahnen
- Kranen (Senken der Last)
- Aufzügen
- Zentrifugen, die schnell abgebremst werden
- Prüfständen (bremsende Belastungsmaschine)

Rückspeisen steigert die Effizienz und es entsteht beim Bremsen keine Wärme, die abgeführt werden muss.

Da Umrichter, die ins Netz zurückspeisen können, geringfügig höhere Verluste machen und mehr Kosten verursachen, ist eine Rückspeisefähigkeit nicht in jedem Fall sinnvoll. Beispielsweise bei Lüftern, die nur bei einem Notstopp elektrisch gebremst werden, lohnt sich die Investition finanziell und energietechnisch nicht.

12.2.2 Harmonische

In den Ein- und Ausgangströmen eines Frequenzumrichters sind neben der gewünschten Grundschwingung auch Harmonische vorhanden. Sie werden oft als Oberschwingungen oder Oberwellen bezeichnet. Eine Harmonische ist eine

sinusförmige Schwingung mit einer Frequenz, die ein Vielfaches der Grundswingungsfrequenz ist.

Harmonische im Netzstrom sind unerwünscht: sie verursachen Verzerrungen in der Netzspannung und führen zu erhöhten Verlusten im Netz und in den Transformatoren. Welche Harmonische im Netzstrom eines FUs zu finden sind, ist in erster Linie davon abhängig, wie die Netzseite des Umrichters realisiert wird.

12.2.3 Leistungsfaktor und $\cos\varphi$

Der Leistungsfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen Wirk- und Scheinleistung. Der $\cos\varphi$ (sprich: Cosinus phi) beschreibt das Verhältnis zwischen Wirk- und Scheinleistung der Grundschiwingung. Dieses Verhältnis entspricht gerade dem Cosinus der Phasenverschiebung φ zwischen der Grundschiwingung der Netzspannung und der Grundschiwingung des Netzstromes. Manchmal wird es deshalb auch als $\cos\varphi_1$ bezeichnet (der Index 1 bezeichnet die Grundschiwingung). Sind keine Harmonischen im Spiel, sind Leistungsfaktor und $\cos\varphi$ gleich. Mit Harmonischen ist der Leistungsfaktor tiefer als der $\cos\varphi$.

Meist wird der $\cos\varphi$ angegeben. Die Harmonischen werden separat berücksichtigt.

Ideal ist ein $\cos\varphi$ von eins, da so das Netz nicht mit (Grundschiwingungs-)Blindleistung belastet wird.

12.3 Umrichter mit Spannungszwischenkreis

12.3.1 Tabellarischer Vergleich

Folgende Tabelle zeigt eine zusammenfassende Übersicht über die verschiedenen FUs mit Spannungszwischenkreis. Der Vergleich bezieht sich auf die Netzseite des Umrichters und gilt unabhängig davon, ob eine Synchron- oder Asynchronmaschine eingesetzt wird.

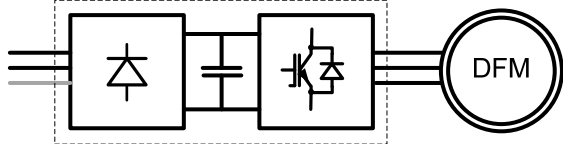
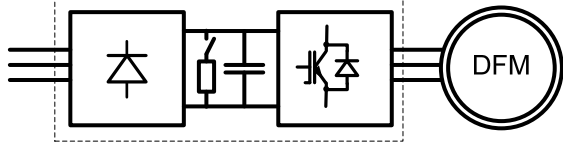
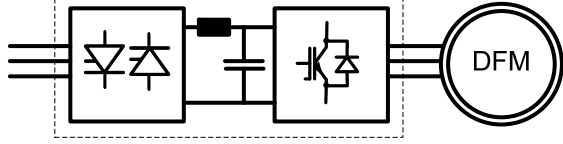
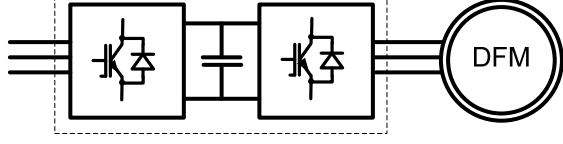
FU mit	Elektrisches Bremsen	$\cos\varphi$	Harmonische im Netzstrom
Diodengleichrichter 	Nein	Sehr gut	Alle Ungeraden. Dreiphasig fehlen die Vielfachen von drei.
Diodengleichrichter mit Brems-Chopper 	Ja, Bremsenergie wird im Bremswiderstand des Brems-Choppers verheizt	Sehr gut	Wie oben
Umkehrgleichrichter 	Ja, mit Rückspeisen der Bremsenergie ins Netz	Gut	Ähnlich wie oben. Bedingt durch die Glättungsinduktivität im ZK etwas kleiner
Aktiver Netzseite mit Wechselrichter 	Ja, mit Rückspeisen der Bremsenergie ins Netz	Sehr gut, einstellbar, sogar Kompensation möglich	Je höher die Taktfrequenz, desto kleiner

Abbildung 3: Vergleich der verschiedenen FUs in Bezug auf ihr Netzverhalten

Zur Reduktion von Harmonischen ist der Einsatz von Filtern möglich.

Werden mehrere FUs bzw. FUs mit mehreren Eingangsstromrichtern über Transformatoren mit phasenverschobenen Sekundärspannungen ans Netz angeschlossen, entstehen so genannte höherpulsige Schaltungen. Mit dieser Technologie lassen sich einzelne Harmonische eliminieren oder zumindest reduzieren.

Zur Verbesserung des $\cos\varphi$ können aktive und passive Kompensatoren eingesetzt werden. Wie Filter verursachen aber auch diese Kosten und Verluste.

Die in der Tabelle aufgeführten FU-Varianten und ihr Verhalten werden im Folgenden näher beschrieben.

12.3.2 FU mit netzseitigem Diodengleichrichter

Die Netzseite eines FUs kann mit einem Diodengleichrichter realisiert werden. Diese Lösung hat den Vorteil, dass sie einfach, robust und kostengünstig ist.

Ein Rückspeisen von Bremsenergie des Motors ins Netz ist nicht möglich.

Bei Leistungen unter 2 kW ist die Diodenbrücke oft einphasig, bei grösseren Leistungen wird sie dreiphasig ausgeführt.

12.3.2.1 Harmonische:

Der Diodengleichrichter zeigt eine charakteristische Stromform mit typischen Harmonischen. Bei der einphasigen Brücke kommen im Netzstrom alle ungeraden Harmonischen vor. Bei der dreiphasigen Brücke sind es ebenfalls die Ungeraden, aber die Vielfachen von drei fehlen. Ein dreiphasiger Diodengleichrichter hat also neben der Grundschiwingung eine 5., 7., 11., 13., 17. etc. Harmonische im Netzstrom. Die Amplituden der einzelnen Harmonischen nehmen mit zunehmender Ordnungszahl ab.

Bei höherpulsigen Schaltungen werden einzelne Harmonische eliminiert.

12.3.2.2 Leistungsfaktor und $\cos\varphi$

Beim Diodengleichrichter beträgt der $\cos\varphi$ praktisch eins. Bei sehr grossen Anlagen kann er einige Prozent darunter liegen, da die Kommutierung eine kleine Phasenverschiebung zwischen den Grundschiwingungen von Strom und Spannung hervorruft. Der Leistungsfaktor ist bedingt durch die Harmonischen tiefer als der $\cos\varphi$.

12.3.3 FU mit Diodengleichrichter und Brems-Chopper mit Bremswiderstand

Oft wird, da die Diodenbrücke nicht rückspeisefähig ist, zusätzlich ein so genannter Brems-Chopper mit Bremswiderstand eingebaut. Damit kann der Motor elektrisch gebremst werden. Die anfallende Energie wird im Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Harmonische und $\cos\varphi$ im Motorbetrieb sind gleich wie beim Diodengleichrichter ohne Brems-Chopper.

12.3.4 FU mit netzseitigem Umkehrgleichrichter

Ein Umkehrgleichrichter besteht aus zwei Thyristorbrücken. Eine Brücke ist aktiv, wenn Energie vom Netz zum Zwischenkreis fliesst, die zweite ist für die umgekehrte Energierichtung zuständig. Mit dieser Konfiguration ist also Bremsbetrieb mit Rückspeisung der Energie ins Netz möglich.

12.3.4.1 Harmonische

Die Harmonischen im Netzstrom eines Umkehrgleichrichters sind denjenigen eines Diodengleichrichters sehr ähnlich. Da hier zwischen der DC-Seite der Stromrichters und dem Kondensator zwingend eine Glättungsdrossel installiert werden muss, wird der Netzstrom rechteckförmiger und die Amplitude der v -ten Harmonischen liegt ungefähr bei $1/v$. Die 5. Harmonische des Netzstromes (250 Hz im 50-Hz-Netz) hat also eine Amplitude von ungefähr $1/5 = 20\%$ des Grundschrwingungsstromes, die 7. etwa $1/7 = 14\%$.

12.3.4.2 Leistungsfaktor und $\cos\varphi$

Typische Werte für den $\cos\varphi$ liegen im Nennbetrieb zwischen 0.8 und 0.9. Wird aus Effizienzgründen die Zwischenkreisspannung bei niedriger Drehzahl der Maschine abgesenkt, liegt er deutlich tiefer.

12.3.5 FU mit netz- und maschinenseitigem Wechselrichter

Auf der Netzseite kann ein Wechselrichter eingesetzt werden. Dieser wird auch als „active front end“, aktiver Gleichrichter oder als aktive Einspeisung bezeichnet. Schaltungstechnisch ist es ein Wechselrichter, wie er auf der Maschinenseite eingesetzt wird. Wie dort kann er Energie in beide Richtungen führen. Es ist also Bremsbetrieb mit Rückspeisen der Energie in Netz möglich.

12.3.5.1 Harmonische

Die Harmonischen, die ein Wechselrichter erzeugt, sind abhängig vom Modulationsverfahren und der Taktfrequenz. Die Taktfrequenz sagt aus, wie häufig die einzelnen Halbleiter ein- und ausgeschaltet werden. Bei hoher Taktfrequenz haben die Harmonischen im Netzstrom eine höhere Frequenz und ihre Amplituden sind kleiner. Die Schaltverluste im Wechselrichter nehmen dafür zu (siehe Kapitel 12.5.2). Das Modulationsverfahren beschreibt, wie die Schaltbefehle für die einzelnen Halbleiter erzeugt werden. Bei der am meistens eingesetzten Pulsweitenmodulation (PWM) treten neben der Grundschrwingung Harmonische im Bereich der Taktfrequenz und der Vielfachen davon auf.

Es werden auch andere Taktverfahren eingesetzt. Sie zeigen bei vergleichbarer Taktfrequenz punkto Netzstrom und Harmonischen ein sehr ähnliches Bild.

12.3.5.2 Leistungsfaktor und $\cos\varphi$

Beim Wechselrichter lässt sich zusätzlich zur Wirkleistung auch die Blindleistung einstellen. Meistens wird sie auf null geregelt, damit der $\cos\varphi$ eins beträgt. Es ist aber auch Blindleistungsbezug oder Blindleistungsabgabe, also Kompensation, möglich.

12.4 Steuerung und Regelung

12.4.1 Regelung auf der Netzseite

Beim Umrichter mit Spannungszwischenkreis hat die Regelung der Netzseite die Aufgabe, die Zwischenkreisspannung auf dem gewünschten Wert zu halten.

Beim Diodengleichrichter ist die Zwischenkreisspannung proportional zur Netzspannung und muss nicht geregelt werden. Einzig beim Einschalten verhindert eine logische Schaltung zu grosse Einschaltströme.

Der Umkehrgleichrichter braucht eine Regelung. Diese regelt die Zwischenkreisspannung auf den gewünschten Wert, indem sie die Zündimpulse zum Einschalten der Thyristoren zeitlich richtig setzt.

Beim Einsatz eines aktiven Wechselrichters braucht es eine Regelung, die über die Wirkleistungsaufnahme oder -abgabe die Zwischenkreisspannung auf den gewünschten Wert regelt. Zusätzlich kann die Regelung auch die Blindleistungsaufnahme oder -abgabe auf einen gewünschten Wert, meistens null, regeln. Die Leistung wird über den Netzstrom geregelt. Als Stromregler wird meist eine Vektorregelung (Vector Control) eingesetzt. Dieser Begriff meint, dass die dreiphasigen Ströme in einen Zeiger (Vektor) umgewandelt wird. Die Zeigerkomponenten sind stationär Gleichgrößen, die sich einfacher und genauer regeln lassen.

Der Stromregler bestimmt den Sollwert der Wechselrichter-Ausgangsspannung und führt diese dem so genannten Modulator zu. Dieser generiert die Schaltbefehle für die Leistungshalbleiter. Ein PLL (phase locked loop) synchronisiert den Wechselrichter mit der Netzspannung.

12.4.2 Regelung auf der Maschinenseite

Auf der Maschinenseite werden je nach Einsatzgebiet verschiedene Regelverfahren eingesetzt.

12.4.2.1 U/f-Kennlinien-Verfahren

Die Ausgangsfrequenz des Wechselrichters wird entsprechend der gewünschten Drehzahl der Maschine eingestellt. Da die Magnetisierung der Maschine durch das Verhältnis von Spannung und Frequenz bestimmt wird, muss die Wechselrichter-Ausgangsspannung proportional zur Frequenz verstellt werden. So wird sichergestellt, dass die Maschine über den ganzen Drehzahlbereich mit Nennfluss betrieben wird. Wird die Frequenz über die Nennfrequenz hinaus erhöht und darf oder kann die Spannung nicht mehr weiter erhöht werden, tritt Feldschwächung ein.

Da die Wechselrichter-Ausgangsspannung in Funktion der gewünschten Ausgangsfrequenz eingestellt wird (linear bis zur Nennfrequenz und Nennspannung), spricht man vom U/f-Kennlinien-Verfahren. In Abbildung 4 ist der Spannungsverlauf in Funktion der Frequenz dargestellt. Ebenfalls dargestellt ist das bei Nennstrom erreichbare Drehmoment. Über der Nennfrequenz nimmt dieses mit $1/f$ ab, da das magnetische Feld mit $1/f$ abnimmt (Feldschwächung).

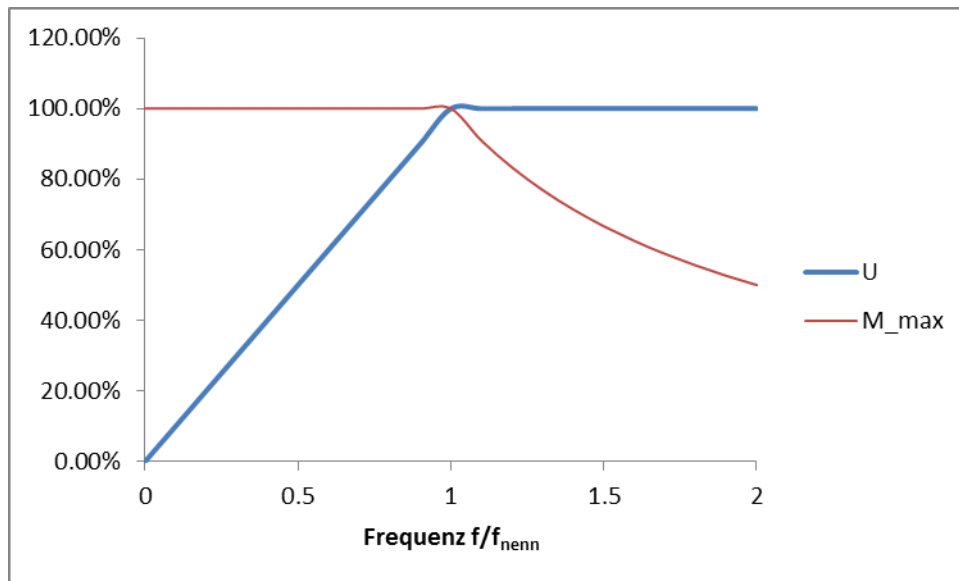


Abbildung 4: U/f-Kennlinie und maximales Drehmoment M_{max}

Die Maschine verhält sich dabei wie eine Maschine am Netz, nur dass hier durch die veränderliche Frequenz die Drehzahl eingestellt werden kann. Das Verfahren ist eigentlich eine Steuerung. Zur genauen Einhaltung einer gewünschten Drehzahl kann es mit einer Drehzahlregelung ergänzt werden.

Dieses einfache Verfahren ist geeignet für nicht hochdynamische Anwendungen wie Lüfter oder Pumpen. Es ist sehr robust und funktioniert auch, wenn die Maschinenparameter nicht genau bekannt sind.

12.4.2.2 Feldorientierte Regelung / Vector Control

Bei höheren dynamischen Anforderungen wird oft eine Zeigerregelung (Vector Control) eingesetzt. Wird das Koordinatensystem für die Zeiger auf das rotierende magnetische Feld der Maschine ausgerichtet, spricht man von Feldorientierter Regelung. Über den Strom werden Fluss und Drehmoment der Maschine geregelt. Mit einer dem Drehmoment überlagerten Drehzahlregelung kann die Drehzahl exakt auf den gewünschten Wert geregelt werden. Dazu gibt es Verfahren mit oder ohne Drehzahlsensor.

Damit die Feldorientierte Regelung einwandfrei funktioniert, müssen die Maschinenparameter bekannt sein. Das gilt noch mehr bei sensorlosem Betrieb. Viele moderne Umrichter sind aber in der Lage, die Maschine bei der Inbetriebnahme automatisch auszumessen.

12.4.2.3 Direkte Drehmomentregelung

Ein weiteres Verfahren ist die direkte Drehmomentregelung (DTC, direct torque control). Hier bestimmt die Regelung aus den Soll-Istwert-Abweichungen vom Drehmoment und Fluss direkt die Schaltsignale für den Wechselrichter. Regelung und Modulator sind zusammengefasst. Dieses Verfahren zeigt bezüglich Dynamik, Harmonischen und $\cos\phi$ ein vergleichbares Verhalten wie die Feldorientierte Regelung mit PWM.

12.5 Weitere Bemerkungen

12.5.1 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von Frequenzumrichtern und elektrischen Maschinen ist im Nennbetrieb sehr hoch. Fällt die Leistung weit unter den Nennbetriebspunkt, nimmt der Wirkungsgrad stark ab. Wichtig ist also eine auf die geforderte Antriebsleistung richtig abgestimmte Frequenzumrichter- und Maschinennennleistung. Abbildung 5 zeigt einen typischen Wirkungsgradverlauf in Abhängigkeit vom Drehmoment M . 100% entspricht Nennmoment. Die vier Kurven zeigen den Verlauf für verschiedene Drehzahlen. 100% entspricht der Nenndrehzahl.

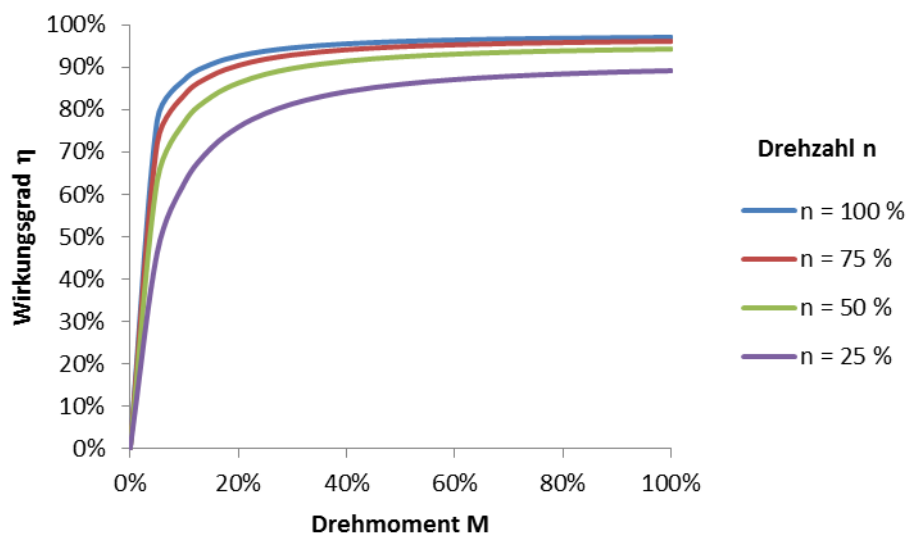


Abbildung 5: Typischer Wirkungsgrad eines FUs

Abbildung 6 zeigt Linien, die die Punkte mit gleichem Wirkungsgrad verbinden. Dieser Darstellung liegen die gleichen Daten zugrunde wie in Abbildung 5. Mit dieser Darstellungsart ist noch deutlicher ersichtlich, wie der Wirkungsgrad mit abnehmender Drehzahl und abnehmendem Drehmoment abnimmt.

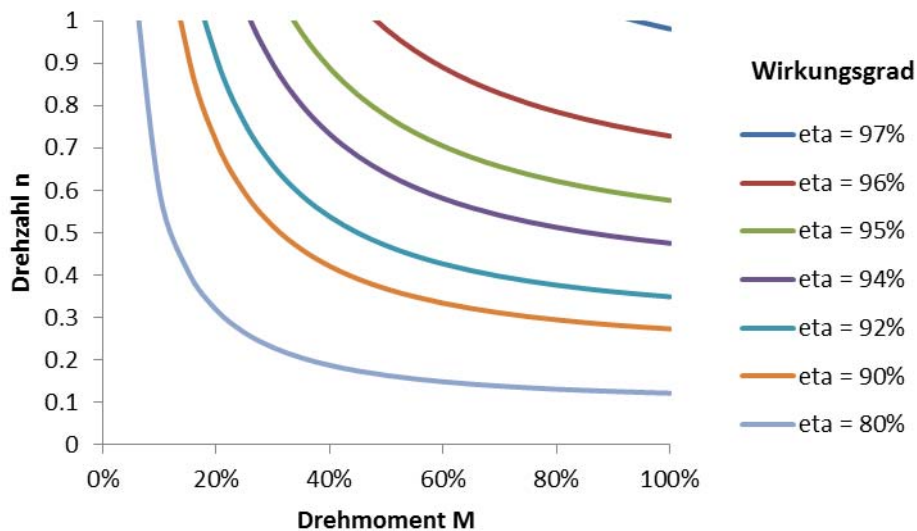


Abbildung 6: Typischer Wirkungsgrad eines FUs

Die genauen Zahlenwerte des Wirkungsgrads eines FUs sind natürlich davon abhängig, wie der FU aufgebaut ist. Generell kann gesagt werden, dass ein FU mit Diodengleichrichter auf der Netzseite kleinere Verluste und somit den besseren Wirkungsgrad hat als ein vergleichbarer FU, bei dem auf der Netzseite ein Wechselrichter zum Einsatz kommt. Der Unterschied beträgt typischerweise ein bis zwei Prozentpunkte. Ein FU mit Umkehrgleichrichter liegt wirkungsgradmässig dazwischen, ist aber näher beim FU mit Diodengleichrichter.

Je nach Anwendung ist es für die Energieeffizienz eines Antriebssystems entscheidend, ob im Bremsbetrieb Energie ins Netz zurückgespeist werden kann oder nicht (siehe einleitende Bemerkung zum Thema Rückspeisen).

Wird der Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems berücksichtigt, müssen auch die Verluste in allfälligen Filterkomponenten berücksichtigt werden.

In vielen Fällen kann ein FU den Gesamtwirkungsgrad eines Systems (FU, Motor, Prozess) deutlich verbessern. Wichtig ist eine gute Dimensionierung, da im Teillastbereich der Wirkungsgrad sinkt.

Auch beim häufigen Anfahren kann ein FU die Effizienz verbessern: eine Maschine, die direkt ans Netz geschaltet wird, macht beim Anlaufen die höheren Verluste als wenn die Drehzahl mit einem FU rampenförmig erhöht wird.

12.5.2 Taktfrequenz

Die Taktfrequenz, d.h. die Frequenz, mit der die Halbleiter eines Wechselrichters geschaltet werden, hat ebenfalls einen Einfluss auf den Wirkungsgrad.

Je höher die Taktfrequenz des maschinenseiteigen Wechselrichters ist,

- desto höher sind die Schaltverluste in den Halbleitern
- desto kleiner sind die Harmonischen im Maschinenstrom
- desto kleiner sind die Verluste durch die Harmonischen in der Maschine.

Je höher die Taktfrequenz des netzseiteigen Wechselrichters - falls ein solcher eingesetzt wird - ist,

- desto höher sind die Schaltverluste in den Halbleitern
- desto kleiner sind die Harmonischen im Netzstrom
- desto kleiner sind die Verluste in Transformator und Netz.

Die Wahl der Taktfrequenz ist also ein Kompromiss zwischen den Verlusten im FU und den Verlusten in Netz und Maschine, die durch die Oberschwingungen verursacht werden. Abbildung 7 soll das veranschaulichen. Bei 1 liegt die optimale Taktfrequenz F . In der Regel wird vom FU-Hersteller eine vernünftige Taktfrequenz vorgegeben. Bei gewissen FUs kann sie mit den oben beschriebenen Konsequenzen über einen Parameter eingestellt werden. Durch die maximal zulässigen Schaltverluste sind der Taktfrequenz nach oben Grenzen gesetzt.

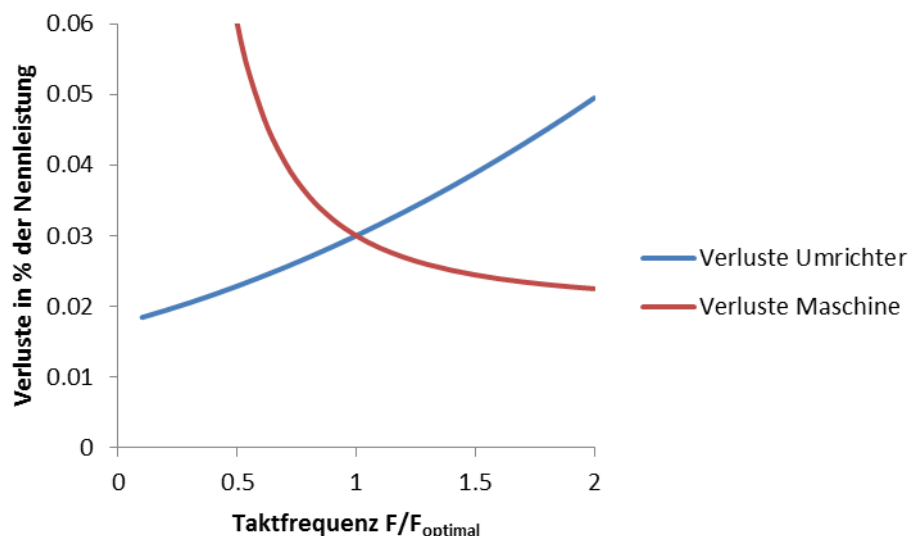


Abbildung 7: Einfluss der Taktfrequenz F auf die Verluste in FU und Maschine

Die Taktfrequenz ist auch massgebend für die Geräuscentwicklung einer Maschine. Bei Antrieben im kW-Bereich werden deshalb Taktfrequenzen im Bereich von 20 kHz verwendet, damit die durch die Harmonischen im Strom verursachten Geräusche oberhalb des hörbaren Bereichs liegen. Je grösser die Leistung eines Umrichters, desto tiefer die mögliche Taktfrequenz. Umrichter um ein MW takten typischerweise mit 2 kHz, Umrichter für mehrere MW mit wenigen hundert Hertz.