

Projektierung von Frequenzumrichter-Antrieben

H. Greiner, Aichwald

In vielen Anwendungsbereichen werden zunehmend Antriebe mit stufenlos verstellbarer Drehzahl gefordert. Die geeignetste Lösung ist heute der Drehstrom-Asynchronmotor mit Frequenzumrichter. Bei der Auswahl von Motor und Umrichter sind zahlreiche Parameter, wie Stellbereich, Lastkennlinie, Grenzdrehzahl, Geräuschgrenzen, zu beachten [1]. Zur Vereinfachung der Projektierung werden „Technische Listen“ angeboten [2]. Sie enthalten umfangreiche, nach vielen Parametern gegliederte Auswahltabellen. Einige Aspekte der Antriebsplanung werden im Folgenden erläutert.

1 Ausnutzung der Motorkennlinie im Umrichterbetrieb

Von der bekannten Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie des Drehstrom-Asynchronmotors am Netz

$M = f(n)$ bei 50 Hz (Bild 1)

wird im Umrichterbetrieb nur der gestrichelte Teil vom Drehmoment 0 bis zum Bemessungspunkt N genutzt. Dieser Kennlinienteil wird mit der variablen Frequenz VF über der Frequenzachse f bzw. der Drehzahlachse verschoben. Das Drehmoment ist als relatives Drehmoment

m (bezogen auf das Bemessungsdrehmoment) aufgetragen.

Bei Eigenbelüftung (IC411) muß das thermisch zulässige Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen reduziert werden. Bei Fremdbelüftung (IC416) steht es auch bei Frequenzen unter 50 Hz voll zur Verfügung. Wird bei Frequenzen zwischen 50 Hz und 87 Hz der Fluss durch

$$U/f = c$$

konstant gehalten, dann muss trotz der verbesserten Kühlung das Drehmoment wegen der mit der Frequenz erhöhten Eisenverluste aus thermischen Gründen reduziert werden. Häufig wird die maximale Ausgangsspannung (etwa gleich der Netzspannung) auf den 50-Hz-Punkt gelegt und im Bereich 50 Hz bis 87 Hz nicht weiter angehoben. Die dabei auftretende Feldschwächung bewirkt einen starken Abfall des vom Motor erzeugten Kippmoments.

Deshalb muss das zulässige Belastungsmoment entsprechend Kennlinienast $U = c$ im Bild 1 zurückgenommen werden.

Oberhalb einer von Größe und Auslegung abhängigen Grenzfrequenz f_G (im Beispiel 90 Hz) steht bei Feldschwächung noch weniger Drehmoment zur Verfügung ($f > f_G$), um eine Reserve zwischen benötigtem Drehmoment (Bemessungsmoment) und Kippmoment (Überlastbarkeit) zu behalten.

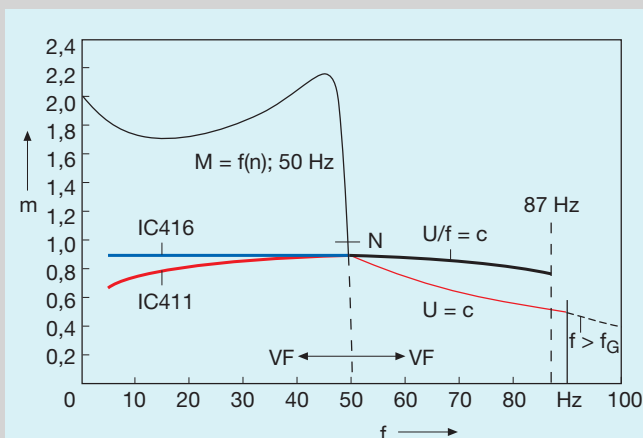
In den Abschnitten 2 bis 5 werden die Kennlinienäste genauer beschrieben.

2 Zusätzliche Verluste durch Oberschwingungsgehalt

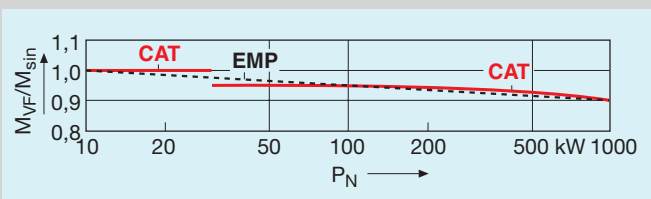
Physikalisch bedingt nimmt bei elektrischen Maschinen der Einfluss von Oberschwingen auf die Verlustleistung mit der Maschinengröße zu. Daher sind die thermisch zulässigen Drehmomente M_{VF} bei Speisung aus dem Umrichter gegenüber dem Moment M_{sin} bei Speisung mit sinusförmiger Netzspannung (50 Hz) bei Bemessungsleistungen P_N ab etwa 30 kW (4-polig) um 5 bis 10 % zu reduzieren. Die Auswahltabellen in [2] enthalten diese Korrektur. Im Bild 2 ist der thermisch bedingte Reduktionsfaktor für das Drehmoment in Abhängigkeit von der Bemessungsleistung dargestellt.

3 Verminderte Kühlwirkung bei niedriger Drehzahl

Um den Einfluß der verminderten Kühlwirkung des Eigenlüfters bei niedrigen Drehzahlen zu berücksichtigen, muss das



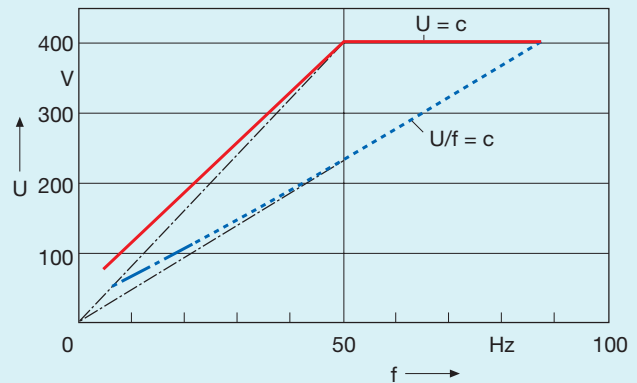
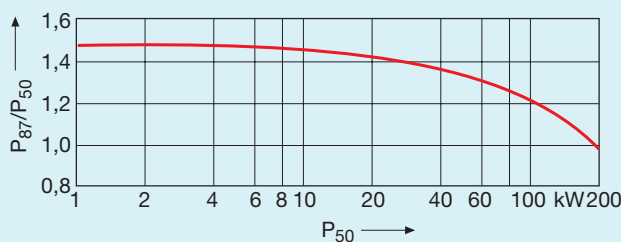
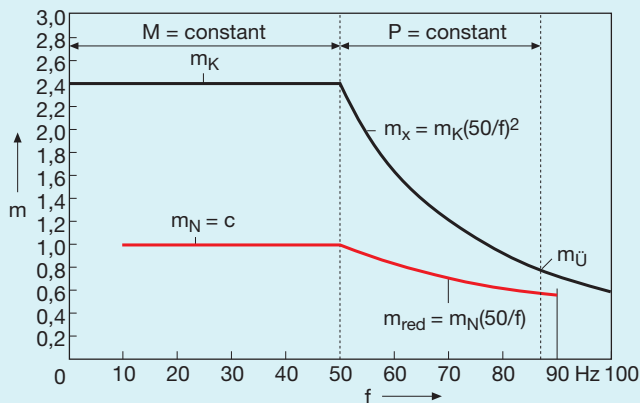
1 Ausnutzung der Motorkennlinie im Umrichterbetrieb
IC411 Eigenbelüftung; IC416 Fremdbelüftung; VF variable Frequenz



2 Thermisch bedingter Reduktionsfaktor für das Drehmoment bei Umrichterspeisung bezogen auf Betrieb bei sinusförmiger Netzspannung in Abhängigkeit von der Bemessungsleistung
CAT Katalogwerte; EMP berechneter Verlauf



3 Reduktion des Drehmoments bei Umrichterspeisung mit Frequenzen < 50 Hz durch verminderte Kühlwirkung



6 Typische U/f-Kennlinien bei einem Netz 400 V/50 Hz

- $U = c$ Feldschwächung im Bereich 50 Hz bis 87 Hz
- $U/f = c$ konstanter Fluss im Bereich 50 Hz bis 87 Hz

4 Reduzierte Überlastbarkeit und Belastbarkeit im Feldschwächbetrieb 50 Hz bis 87 Hz

5 Faktor für die thermisch dauernd zulässige Leistungserhöhung bei 87 Hz für $U/f = c$ in Abhängigkeit von der Typenleistung

Drehmoment M bei niedrigen Umrichterfrequenzen f gegenüber dem Bemessungsmoment M_{50} bei 50-Hz-Betrieb vermindert werden.

Je größer der Verstellbereich, je niedriger die untere Grenzfrequenz, umso stärker muss das Moment bei Dauerbetrieb S1 reduziert werden. Es können deshalb Motorkosten gespart werden, wenn der verlangte Verstellbereich nicht unnötig hoch geplant wird. Ein Beispiel für diesen Reduktionsfaktor zeigt Bild 3.

Die Reduzierung des Drehmoments und der Motorleistung ist nur dann erforderlich, wenn der Motor dauernd bzw. über lange Zeit bei niedriger Drehzahl betrieben werden soll. Für Kurzzeitbetrieb (einige Minuten) steht das volle Moment zur Verfügung. Die Liste UN 03 [2] gibt detaillierte Formeln für die thermische Bewertung periodisch wiederkehrender Überlastungen an. Die kurzzeitige Überlastbarkeit ist auch bei Antrieben mit einem erhöhten Losbrechmoment von Bedeutung. Da der Anlauf in der Regel von kurzer Dauer ist, braucht man das erhöhte Losbrechmoment aus thermischen Gründen nicht zu berücksichtigen. Allerdings erfordert das höhere Drehmoment vom Umrichter einen höheren Strom.

4 Betrieb mit Feldschwächung

Wenn der Motor über die Bemessungsfrequenz (z. B. 50 Hz) hinaus mit konstanter Spannung betrieben wird, nimmt

seine Überlastungsfähigkeit (Kippmoment) gegenüber dem Wert m_K bei Bemessungsfrequenz quadratisch mit der Frequenz ab:

$$m_x = m_K \left(\frac{50 \text{ Hz}}{f} \right)^2$$

Bild 4 zeigt diesen Verlauf. Um auch bei oberer Grenzfrequenz (z. B. 87 Hz) noch eine gewisse Überlastungsfähigkeit m_U zur Verfügung zu stellen, muss das Bemessungsmoment reduziert werden, z. B. auf

$$m_{red} = m_N \left(\frac{50 \text{ Hz}}{f} \right)$$

Da die Drehzahl proportional mit der Frequenz steigt, bleibt die mechanische Leistung in diesem Bereich konstant.

Während also z. B. im Bereich von 10 Hz bis 50 Hz ein **konstantes Moment**

$$m_N = c$$

zur Verfügung steht, kann im Bereich 50 Hz bis 87 Hz nur mit **konstanter Leistung** belastet werden.

Die Grenzfrequenz (im Beispiel 90 Hz) ist von der Auslegung und dem bei 50 Hz zur Verfügung stehenden relativen Kippmoment (im Beispiel $m_K = 2,4$) abhängig. Die listenmäßig festgelegte Grenze von 87 Hz ergibt sich aus dem Faktor 1,73.

Für diese praxisgerechte und häufig benötigte Variante stehen in [2] Auswahltabellen zur Verfügung.

5 Betrieb mit konstantem Fluss bis 87 Hz

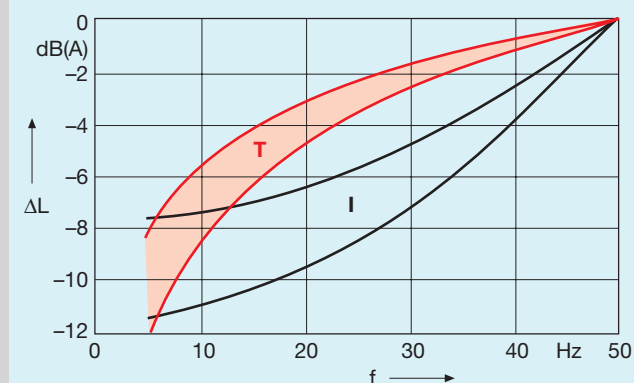
Wenn auch im Bereich über 50 Hz hinaus die Spannung mit der Frequenz gemäß

$$U/f = c$$

angehoben wird, dann bleiben Fluss und Kippmoment etwa konstant; die Überlastungsfähigkeit wäre also auch gegenüber einem unverminderten Bemessungsmoment gewährleistet. Die mögliche Leistungserhöhung an der oberen Grenzfrequenz wäre also $87/50 = 1,7$ -fach. Aus den im Abschnitt 1 geschilderten Gründen kann die Leistung bei Ausnutzung der Wärmeklasse B jedoch nur maximal um den Faktor 1,45 angehoben werden. Physikalisch bedingt nimmt der Faktor P_{87}/P_{50} mit zunehmender Motorgröße ab. Bild 5 zeigt seinen gemittelten Verlauf. Der Faktor ist in die Auswahltabellen nach [2] eingearbeitet. Kurzzeitig stehen weit höhere Leistungen zur Verfügung, falls der Umrichter den entsprechenden Strom liefern kann.

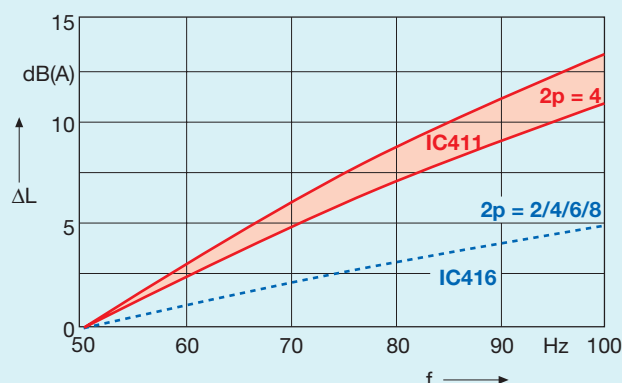
6 Typische U/f-Kennlinien

Für die beiden zuvor beschriebenen Auslegungsarten sind typische Kennlinien für das Verhältnis von Spannung zu Frequenz üblich (Bild 6). Die Zuordnung des „Eckpunktes“ bei Netzfrequenz (im Beispiel 50 Hz) hängt von der Netzspannung ab. Sie kann in gewissen Grenzen an das jeweilige Netz angepasst werden.



7 Abnahme des Schalldruckpegels von 4-poligen Motoren beim Betrieb mit Frequenzen < 50 Hz

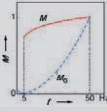
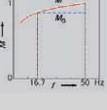
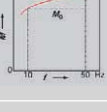
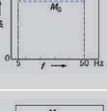
T am PWM-Umrichter der Reihe Dynavert T
I am I-Umrichter der Reihe Dynavert I



8 Zunahme des Schalldruckpegels ΔL bei Betrieb mit Frequenzen > 50 Hz

IC411 4-polig mit drehzahlabhängiger Eigenbelüftung
IC416 2-, 4-, 6- oder 8-polig mit drehzahlunabhängiger Fremdbelüftung

Tafel 1 Ausschnitt aus einer Auswahltabelle der „Technischen Liste“ [2]

			IP55		EEx d		6ph	
			F/B	F/F	F/B	F/F	F/B	
M/n-Kennl.	V	2p	P _x (kW)	P _x (kW)	P _x (kW)	P _x (kW)	P _x (kW)	
	1:10 EB	2 4 6 8	0,18 ... 800 0,12 ... 1000 0,18 ... 1000 0,09 ... 800	0,20 ... 900 0,13 ... 1120 0,19 ... 1120 0,10 ... 900	0,18 ... 500 0,12 ... 560 0,25 ... 450 0,12 ... 400	0,20 ... 560 0,13 ... 630 0,27 ... 500 0,13 ... 450	330 ... 820 325 ... 1020 260 ... 1020 205 ... 820	
	1:3 EB	2 4 6 8	0,19 ... 690 0,11 ... 920 0,17 ... 920 0,09 ... 730	0,19 ... 780 0,12 ... 970 0,18 ... 970 0,09 ... 780	0,17 ... 455 0,11 ... 520 0,23 ... 410 0,11 ... 360	0,19 ... 485 0,12 ... 550 0,25 ... 435 0,12 ... 390	285 ... 730 300 ... 940 235 ... 940 184 ... 760	
	1:5 EB	2 4 6 8	0,16 ... 660 0,09 ... 900 0,13 ... 900 0,07 ... 720	0,17 ... 750 0,10 ... 1120 0,14 ... 950 0,07 ... 770	0,16 ... 440 0,09 ... 500 0,19 ... 400 0,09 ... 360	0,17 ... 475 0,10 ... 540 0,20 ... 425 0,10 ... 380	270 ... 700 295 ... 930 230 ... 930 182 ... 750	
	1:10 EB	2 4 6 8	0,14 ... 620 0,08 ... 840 0,12 ... 840 0,06 ... 680	0,16 ... 700 0,08 ... 900 0,13 ... 900 0,06 ... 720	0,14 ... 420 0,08 ... 475 0,16 ... 375 0,08 ... 335	0,16 ... 450 0,08 ... 500 0,17 ... 400 0,08 ... 360	255 ... 650 275 ... 870 220 ... 870 166 ... 700	
	1:10 FB	2 4 6 8	1,5 ... 800 1,1 ... 1000 0,75 ... 1000 0,37 ... 800	1,65 ... 850 1,17 ... 1000 0,80 ... 1060 0,40 ... 860	4,0 ... 500 4,0 ... 560 2,2 ... 450 1,5 ... 400	4,4 ... 560 4,3 ... 630 2,35 ... 500 1,61 ... 450	325 ... 820 325 ... 1020 260 ... 1020 205 ... 820	

IP55 Normmotoren ohne Explosionsschutz (auch nach VIK und für Zone 2); Reihe „A“

EEx d Explosionsschutzte Drehstrommotoren in Zündschutzart „druckfeste Kapselung“; Reihe „D“

6ph 6-Phasen-Drehstrommotoren ab Achshöhe 355 für 12-pulsige I-Umrichter

F/B Isolierung nach Wärmeklasse F/Ausnutzung nach Wärmeklasse B

F/F Isolierung nach Wärmeklasse F/Ausnutzung nach Wärmeklasse F

P_x Bereich der in der jeweiligen Auswahltabelle angebotenen Leistungen bei Umrichterbetrieb

V Drehzahl- und Frequenz-Stellbereich
2p Polzahl der Wicklung

EB/FB Kühlart Eigenbelüftung/Fremdbelüftung

M Zulässiges Drehmoment des Motors

M_G Verlangtes Gegenmoment der Last
f Frequenz

Im Antrieb nach Bild 6 wird durch eine Spannungsanhebung im unteren Frequenzbereich („boosting“) der Spannungsfall im Motor ausgeglichen.

7 Geräusch/Lautstärke

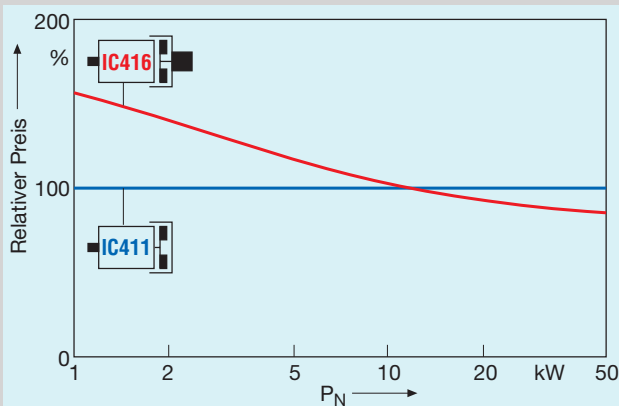
Die Geräuschzunahme aufgrund nicht sinusförmiger Spannungen und Ströme ist relativ gering. Sie beträgt bei Bemessungsfrequenz durchschnittlich bis zu 3 dB(A) sowohl bei I-Umrichtern als auch bei PWM-Umrichtern (Pulsweitenmodulation). Die Abhängigkeit der Lüftergeräusche von der Drehzahl ist dagegen erheblich. Die Diagramme in den Bildern 7 und 8 geben Richtwerte der Änderungen gegenüber den Schalldruckpegeln bei Abgabe der Bemessungsleistung und Speisung aus dem 50-Hz-Netz wieder.

Die Technische Liste [2] enthält ausführliche Geräuschangaben für 2- bis 8-polige Motoren ohne Explosionsschutz und für druckfest gekapselte Motoren in der Zündschutzart EEx d.

8 Wirkung/Wirtschaftlichkeit der Fremdbelüftung

Bei Verwendung eines am Netz betriebenen Fremdlüfters, der unabhängig vom Umrichter mit gleichbleibender Drehzahl und Kühlwirkung arbeitet, muss das thermisch zulässige Bemessungsdrehmoment im unteren Frequenzbereich nicht reduziert werden. Bei der Planung ist also zu entscheiden zwischen:

- einem eigenbelüfteten Motor, dessen Typenleistung zum Ausgleich der



9 Relativer Preis eines fremdbelüfteten Umrichtermotors (IC416) im Vergleich zum vergrößerten eigenbelüfteten Typ der gleichen Schutzart (IC411 = 100 %), bezogen auf gleiche Leistungsabgabe P_N bei 50 Hz; konstantes Moment im Bereich 5 Hz bis 50 Hz

kühlungsbedingten Drehmomentreduzierung vergrößert ist oder

- einem fremdgekühlten Motor mit günstiger Baugröße, aber zusätzlichem Aufwand für den getrennten Lüfter und dessen Netzanschluss.

Bei vielen Anwendungsfällen kann die geringere Geräuschentwicklung des fremdbelüfteten Motors bei Frequenzen über 50 Hz entscheidend sein.

Als Orientierungshilfe zeigt Bild 9, dass sich die Schere zwischen „eigenbelüftet“ (IC411) und „fremdbelüftet“ (IC416) im Bereich der Baugröße 132 bis 160 (Bemessungsleistung bei 50 Hz etwa 7,5 bis 15 kW) schließt. Im Allgemeinen ist bei den kleinen Baugrößen bis etwa 132 durch die Verwendung eines Fremdlüfters kein Kostenvorteil zu erwarten. Bei Bemessungsleistungen über etwa 10 kW sollte die Preisrelation im Einzelfall überprüft werden, da die Typensprünge eine unstetige Preistendenz ergeben.

Tafel 1 zeigt abschließend den schematische Aufbau einer Auswahltable, wie sie in der „Technischen Liste“ [2] enthalten ist. Zusätzlich umfasst diese Projektierungsunterlage detaillierte Formeln, weitergehende Informationen und Hinweise zur Planung von drehzahlverstellbaren Antrieben mit Drehstrommaschinen.

Literatur

- [1] Stupin, P.: Beanspruchung und Auswahl von Drehstrom-Asynchronmotoren bei Umrichterspeisung. Elektropraktiker, Berlin 53(1999)7, S. 622-625.
- [2] Technische Liste UN 03. Drehstrommaschinen für drehzahlverstellbare Antriebe – Drehstrommotoren mit Käfigläufer für Betrieb am Frequenzumrichter. LOHER AG, D-94095 Ruhstorf.
- [3] DIN EN 60 034-1 (VDE 0530 Teil 1) Drehende elektrische Maschinen; Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten. ■