

Motortechnologien für **mehr Effizienz** in Anwendungen

Überblick über Trends und Anwendungen.



Höchste Flexibilität

– kontrollieren
Sie alle gängigen
Motortechnologien
mit nur einem VLT®
Frequenzumrichter

Ein VLT® für alle!

Immer neue Drehstrommotortechnologien werben mit der jeweils höchsten Energieeffizienz in der industriellen und gewerblichen Anwendung. Die Broschüre gibt einen Überblick über die Technologien und deren Anwendung, sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Lösungen.

Angepasste Algorithmen maximieren Anlageneffizienz

Zum Erreichen von hohen Wirkungsgraden bei Elektromotoren in der industriellen und gewerblichen Anwendung arbeiten die Motorhersteller an unterschiedlichen Konzepten. Zwar bieten alle Motortechnologien mit der gleichen Effizienzklasse einen vergleichbaren Wirkungsgrad im Nennpunkt, aber sie besitzen auch viele Unterschiede, beispielsweise beim Anlaufverhalten oder im Teillastbetrieb. Für den Anwender bedeutet die Vielzahl der Motortechnologien vor allem erst mal eins: Er muss die „richtige“ Technologie für seine Anwendung finden, um die maximale Energieeffizienz und damit Einsparung zu realisieren.

Prinzipiell lassen sich fast alle Motoren mit einer fest programmierten Kurve antreiben, die die notwendige Spannung für eine Drehzahl bzw. Frequenz vorgibt, die sogenannte U/f-Kennlinie. Allerdings garantieren nur speziell auf die jeweilige Motortechnologie angepasste Regelalgorithmen die Effizienzvorteile der einzelnen Technologien. Denn erst mit diesen Algorithmen lässt sich in jedem Betriebspunkt der Betrieb auch bei wechselnden Lasten optimieren.

Einheitliche Systeme in der Anlage

Nahezu alle gängigen und in dieser Broschüre vorgestellten Motortechnologien benötigen eine Steuerelektronik oder lassen sich von ihr betreiben. Daraus ergibt sich allerdings auch ein Problem: Lassen sich alle Lösungen mit nur einem Reglertyp bedienen? Denn sonst läuft der Anwender und Bediener in Gefahr, eine sehr heterogene Systemlandschaft einsetzen zu müssen. Was in der Praxis einen erhöhten Schulungsaufwand für Konstrukteure, Bediener sowie Wartungspersonal bedeutet. Auch die Lagerhaltung für die unterschiedlichen Systeme treibt die Kosten.

Für den Anwender ist es daher vorteilhaft, alle Motortypen mit nur einem Frequenzumrichter ansteuern zu können. Denn dies reduziert den gerade beschriebenen Mehraufwand deutlich. Danfoss liefert als unabhängiger Hersteller von Frequenzumrichtern eine Lösung, die alle in der Industrie und Gebäudeautomation gängigen Standardmotoren ansteuern kann.

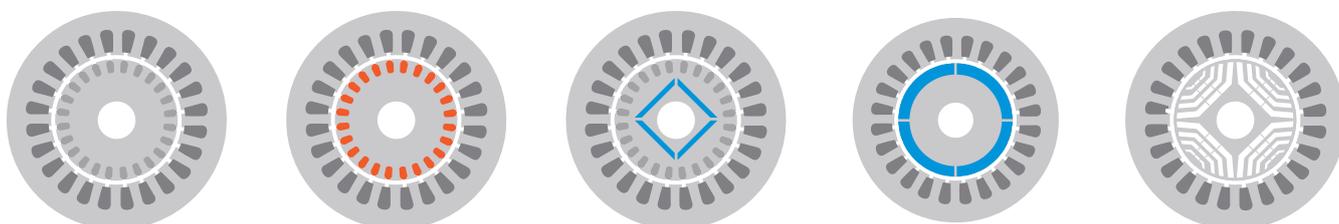
Im gesamten Leistungsbereich können Anlagenbetreiber damit auf eine einheitliche Bedienung, gleiche Schnittstellen, gleiche Erweiterungen und bewährte, zuverlässige Technik

vertrauen. Die Ersatzteilhaltung in ihren Anlagen vereinfacht sich, ebenso die Wartung, und der Schulungsaufwand sinkt.

Leichte Inbetriebnahme und Algorithmen für beste Effizienz

Als unabhängiger Hersteller von Antriebslösungen setzt auch Danfoss auf die Unterstützung aller gängigen Motoren und treibt die Entwicklung immer weiter voran.

Danfoss Frequenzumrichter bieten Steueralgorithmen für hohe Effizienz bereits für Standardasynchronmotoren und Permanentmagnet (PM)-Motoren. Neu hinzukommen jetzt auch Synchronreluktanzmotoren, beginnend mit dem VLT® AutomationDrive FC 302. Die VLT® Frequenzumrichter machen dazu die Inbetriebnahme so einfach wie bei einem Standardasynchronmotor. Denn sie bieten neben der einfachen Bedienung auch weitere hilfreiche Funktionen wie eine automatische Motoranpassung, die den Motor ausmisst und damit die Motorparameter optimiert. So arbeitet der Motor stets höchst energieeffizient und der Anwender spart so Energie und senkt seine Kosten.



Gründe für höhere Energieeffizienz

Knapper werdende fossile Energieträger, Klimawandel, Erderwärmung – die Beweggründe für eine deutliche Reduzierung des Energieverbrauchs sind vielfältig und ziehen politische Konsequenzen nach sich. So haben neben der EU weltweit viele Staaten Mindestwirkungsgradklassen für Motoren verabschiedet. Denn sie stellen das Bindeglied zwischen der elektrischen Energieversorgung und den mechanischen Prozessen in Industrie, Handel und Gewerbe dar, die einen hohen Teil der Energie benötigen.

Zwei Drittel des gesamten industriellen Energiebedarfs entsteht durch mit Elektromotoren angetriebene Maschinen. Allein in der deutschen Industrie, im Gewerbe und

in öffentlichen Einrichtungen ließen sich durch Austausch bereits seit Jahrzehnten laufender Altantriebe durch zeitgemäße Antriebstechnologien pro Jahr 38 Milliarden Kilowattstunden einsparen. Bezogen auf Europa könnte sich der Bedarf gar um 135 Milliarden Kilowattstunden senken, was gleichzeitig 69 Millionen Tonnen weniger CO₂ bedeuten würde (Quelle für alle Zahlen: ZVEI -Motoren und geregelte Antriebe).

In der EU legt die Verordnung (EG) Nr. 640/2009 Mindestwirkungsgrade für Elektromotoren fest. Die Verordnung (EU) Nr. 4/2014 weitet den Bereich der betroffenen Elektromotoren noch einmal weiter aus.

Motortechnologien zur Einhaltung neuer Wirkungsgradklassen

Die genannten Richtlinien brachten neue Wirkungsgradklassen, deren aktuellen Grenzwerte für IE1 (niedrigste Klasse) bis IE3 aus der EN 60034-30 übernommen wurden. Der Standard EN 60034-30-1 definiert die Grenzwerte für IE4, die aber nicht im Gesetz verankert sind. Um viele dieser Klassen mit ihren Mindestwirkungsgraden zu erreichen, waren Veränderungen bestehender Motortechnologien, aber auch neue bzw. wieder entdeckte Motortechnologien notwendig. So ist

der Anwender heute mit einer Vielzahl von Trends im Markt konfrontiert. Doch was verbirgt sich hinter den verschiedenen Begriffen und Technologien? Sind alle Motoren gleich gut für jede Anwendung geeignet?

Wirkungsgradklasse IE5

Der Standard EN 60034-30-1 erwähnt auch die Klasse IE5 und skizziert mögliche Grenzwerte für diese Klasse. Gleichzeitig verweist er aber auch darauf, dass eine Umsetzung technisch sehr schwierig ist.

Aus diesem Grund verzichtet die Broschüre bei der Betrachtung der einzelnen Technologien auf die Einbeziehung der Klasse IE5.

IES-Klassen für Motor und Umrichter-Kombinationen

Analog zu den Motoren sind IE-Klassen für Umrichter und IES-Klassen für die Umrichter-Motor-Kombinationen definiert. Detaillierte Informationen zur diesen Klassen finden Sie auf www.danfoss.com/vltenergyefficiency sowie in unserer Ecodesign Broschüre.

Schnelle Übersicht

Diese Broschüre soll dem Leser einen schnellen Überblick über die einzelnen Motortechnologien geben. Sie charakterisiert in überschaubarer Weise die Technologien mit ihren Eigenschaften, Einsatzgebieten, Vor- und Nachteilen. Sie bietet somit eine Hilfestellung beim Evaluieren geeigneter Motortechnologien und dabei, Herstellern wesentliche Fragen für seine Anwendung zu stellen. Im Einzelnen behandeln die Abschnitte folgende Motoren:

- Standardasynchronmotor
- Kupferläufermotor
- Permanentmagnetmotor (PM-Motor)
- Sonderfall EC-Motor
- Line Start-PM-Motor
- Synchron-Reluktanz-Motor

Dabei stellt die Reihenfolge keine Wertung dar.

Viele elektrische Motoren und Antriebe verschwenden Energie, weil sie nicht im optimalen Wirkungsbereich arbeiten. Daher achten Entwickler von Elektromotoren verstärkt darauf, die Umweltverträglichkeit der Systeme, speziell die Energieeffizienz, zu optimieren.





Die dargestellte Auswahl von gültigen und kommenden Mindestanforderung zeigt, dass die Effizienz von Elektromotoren ein weltweites Thema ist.

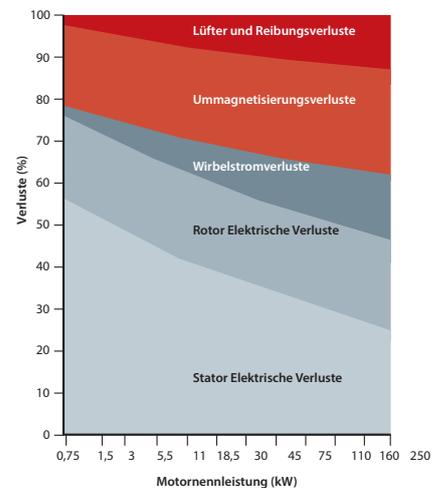
Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) gibt an, dass auf Elektromotoren und entsprechende Systeme 40 Prozent des weltweiten Stromverbrauchs entfallen und sie für 6 Milliarden Tonnen der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich sind, was 20 Prozent des gesamten Ausstoßes an Kohlendioxid entspricht.

Ein weiterer Faktor bei der Umweltverträglichkeit von Elektromotoren ist die Dimensionierung. Je kompakter ein Motor, desto weniger Material erfordert seine Herstellung und desto weniger aufwendig ist die Entsorgung. Derzeit sind viele Motoren aufgrund von "Angstzuschlägen" bei der Konstruktion und der Planung zu groß ausgelegt und laufen dann meist nur im Teillastbetrieb. Dabei arbeiten sie mit reduzierter Drehzahl und reduziertem Moment.

Mehr Effizienz bei Motoren

Die EU-Richtlinie 640/2009 veranlasst die Motorenhersteller, bis zu bestimmten Stichtagen die dann geforderten Effizienzklassen einzuhalten und entsprechende Motoren zu liefern (siehe auch Tabelle 1).

Doch wie lassen sich jetzt die Wirkungsgrade optimieren und damit höhere Effizienzklassen erreichen und einhalten? Ein Fokus der Hersteller liegt auf der Bemühung, die Verluste in Rotor und/oder Stator zu minimieren. Dazu können sie z. B. auf bessere Bleche für die Baugruppen setzen. Neben besseren magnetischen Leitern lassen sich aber auch bessere elektrische Leiter verwenden, beispielsweise Kupfer im Käfigläufer anstelle von günstigerem Aluminium. Allerdings ändert sich dadurch auch die Stromaufnahme, falls der Hersteller keine geeigneten weiteren Maßnahmen trifft. Im Einzelnen muss der Anwender daher prüfen, ob – beispielsweise bei einem Austausch von Motoren – andere Lösungen zum Einsatz kommen können.



Quelle: "Normen für Effizienzbetrachtung elektrischer Motoren – Permanentregte Synchronmotor Technologie", 2011. De Almeida, Ferreira and Fong.

Schrittweise Erhöhung der Anforderungen

Stichtag	MEPS in Europa	Produkt	Leistung
16.06.2011	IE2	Motoren	0,75-375 kW
	IE2	Motoren	0,75-7,5 kW
01.01.2015	IE3 oder IE2 + Frequenzumrichter	Motoren	7,5-375 kW
	IE3 oder IE2 + Frequenzumrichter	Motoren	0,75-7,5 kW
2018	IE1 (geplant)	Frequenzumrichter	

Mindestanforderungen an Motoreffizienz (MEPS=Minimum Efficiency Performance Standards)

Standarddrehstromasynchronmotor – das Arbeitspferd der Industrie

Auch heute noch ist die bereits 1889 von AEG entwickelte Drehstromasynchronmaschine das Arbeitspferd in der Industrie, da sie für viele Anwendungen geeignet ist. Weiter verstärkt hat den Trend zu Drehstromasynchronmaschinen die Entwicklung von Softstartern und Frequenzumrichtern. Der Softstarter verringert deutlich den Anlaufstrom und übergibt den Motor nach dem Startvorgang üblicherweise ans Netz. Der Umrichter ermöglicht zudem eine genaue und energieeffiziente Drehzahlregelung. Dies machte die Maschine für eine Prozessoptimierung geeignet.

Technologie

Die Maschine funktioniert nach dem Prinzip der Lorentzkraft, die dafür verantwortlich ist, eine elektrische Ladung in einem magnetischen Feld in Bewegung zu versetzen. Durch die Bildung von Magnetfeldern im Stator (fest stehender Teil des Motors) und des Rotors (beweglicher Teil des Motors), der auch als Läufer bezeichnet wird, entsteht eine Wechselwirkung und dadurch eine Drehbewegung.

Die Statorwicklung ist mit Kupfer ausgeführt, während der Rotor als Kurzschlussläufer mit einer Wicklung aus Aluminium(stäben) realisiert wird.

Erreichbare IE-Klassen

Der Standard EN 60034-30-1 geht davon aus, dass die Wirkungsgradklasse IE4 mit einer direkt am Netz betriebenen Drehstromasynchronmaschine möglich ist.

IEC-Baugrößen

Für eine Verbesserung des Wirkungsgrads η setzen Hersteller oft besseres Material oder mehr Bleche für den Aufbau von Ständer und Rotor ein. Dies führt in der Praxis teilweise zu einer Vergrößerung der Motoren. Allerdings sind alle Hersteller bemüht, die IEC-Anschlussmaße einzuhalten, um eine die Kompatibilität mit den weit verbreiteten Motoren in älteren Anlagen zu gewährleisten. Daher sind die Anschlussmaße (Fußabstand, Wellenhöhe, Wellendurchmesser) in der Regel gleich, nur der Statordurchmesser fällt teilweise größer aus.

Frequenzumrichterbetrieb

Ein reibungsloser Betrieb und eine optimale Drehzahlregelung mit Frequenzumrichtern ist gewährleistet. In der Praxis kommt es üblicherweise nur zu Problemen, wenn das Isolationssystem des Motors nicht für die gepulste Spannung des Umrichters geeignet ist.

Besonders zu beachten

Anwender sollten vor Austausch eines Motors für die Verbesserung der Energieeffizienz prüfen, ob dies überhaupt notwendig ist. Denn eine 10 Jahre alte Asynchronmaschine muss nicht zwangsläufig einen schlechten Wirkungsgrad haben. So hat beispielsweise der Danfoss VLT® Drive Motor FCM300 in vielen Leistungsgrößen schon bei der Einführung vor über 10 Jahren Wirkungsgrade der heutigen Klasse IE2 eingehalten, was auch nach 2017 noch den gesetzlichen Forderungen entspricht. Ist aber ein Austausch von Motoren notwendig oder bei Serienmaschinen der Motor zu wechseln, sollte der Anwender prüfen, ob die IEC-Anschlussmaße bei effizienteren Motoren eingehalten sind, oder ob konstruktive Änderungen notwendig werden!



Drehstromasynchronmotor

Kupferläufermotor – besserer Wirkungsgrad für Standardasynchronmotoren

Technologie

Eine Variante des Standardasynchronmotors ist der Kupferläufermotor. Er verfügt über den gleichen Aufbau und das gleiche Funktionsprinzip, unterscheidet sich aber im Läufer: Die Käfigwicklung im Rotor besteht nicht aus Aluminium, sondern aus Kupfer. Dieses hat einen niedrigeren Widerstand als das Aluminium und reduziert damit die Verluste im Läufer. Erkauft werden diese Vorteile durch Nachteile bei der Fertigung. Die hohe Schmelztemperatur des Kupfers (ca. 1100 °C) im Vergleich zum Aluminium (ca. 660 °C) führt zu einem schnelleren Verschleiß der Werkzeuge. Außerdem ist Kupfer deutlich teurer als Aluminium.

Erreichbare IE-Klassen

Der Motor erreicht typischerweise Wirkungsgradklasse IE3 oder IE4.

IEC-Baugrößen

Seine Bauform kann bis zur Klasse IE4 den IEC-Standard einhalten. Oft sind sogar Ausführungen in einer kleineren Baugröße verfügbar.

Frequenzumrichterbetrieb

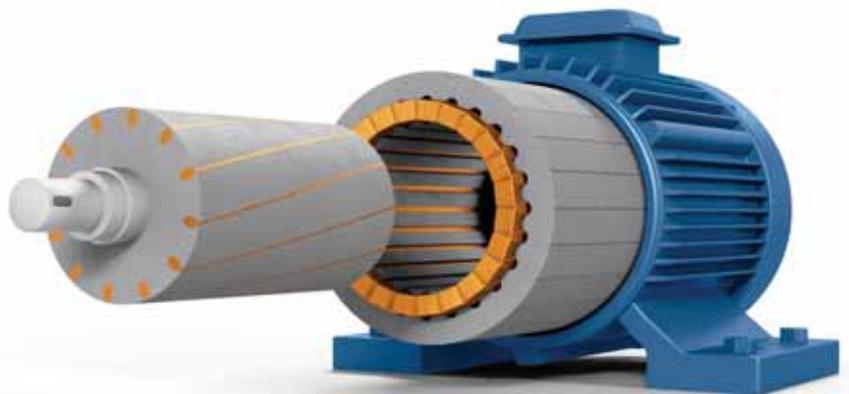
Ebenso wie der Standardasynchronmotor läuft der Kupferläufermotor am Frequenzumrichter. Und ebenso wie beim Standardasynchronmotor kommt es nur zu Problemen, wenn das Isolationssystem des Motors nicht für die gepulste Spannung des Umrichters geeignet ist.

Besonders zu beachten

Im Betrieb muss der Anwender darauf achten, dass Kupferläufermotoren aufgrund des niedrigeren Widerstands oft einen höheren Anlaufstrom besitzen. Dies ist bei der Auslegung und beim

Austausch älterer Drehstrom-asynchronmaschinen zu beachten. In der Praxis ist es dabei schon vorgekommen, dass das unterschiedliche Anlaufmomente bzw. Stöße beim Anlaufen zu Schäden geführt haben.

Weiterhin reduziert sich aufgrund der niedrigen Verluste der Schlupf des Motors. Dies bedeutet, dass die Nenndrehzahl und somit die Drehzahl der Lastmaschine steigt. Anwendungsabhängig kann es passieren, dass die Last nicht mehr in ihrem Wirkungsgradoptimum betrieben wird.



Drehstromasynchronmotor mit Kupferläufer



Motoren mit Permanent Magneten (PM-Motor)

Immer mehr Beachtung finden sogenannte Permanentmotor (PM)-Motoren. Die Technik ist bereits seit langem beispielsweise als Servomotor bekannt und im Einsatz. Neu ist aber – aufgrund des höheren Wirkungsgrads – die Bauform als IEC-Normmotor.

Technologie

Im Vergleich zur Drehstromasynchronmaschine besitzt der PM-Motor, wie der Name schon sagt, keine Läuferwicklung, sondern entsprechende Permanentmagnete, die entweder auf dem Rotor aufgebracht oder in ihm „vergraben“ sind. Im einfachsten Fall ist der Stator analog zur Asynchronmaschine aufgebaut. Alternativ arbeiten die Motorenhersteller an optimierten Designs.

Beim PM-Motor handelt es sich um einen Synchronmotor, d. h. es gibt keinen Schlupf zwischen Rotor- und Statorfeld wie bei der Drehstromasynchronmaschine. Die Permanentmagnete sorgen für die notwendige Magnetisierung des Rotors, was verlustlos geschieht. Damit sinken die Rotorverluste und der Wirkungsgrad des Motors steigt. Gegenüber dem Asynchronmotor weist er einen deutlich besseren Wirkungsgrad bei Betrieb mit reduzierter Drehzahl auf.

Erreichbare IE-Klassen

In der Praxis erreichen die aktuellen PM-Motoren Wirkungsgradklassen von IE3 und IE4.

IEC-Baugrößen

Im Vergleich zu Asynchronmotoren mit ähnlichen Wirkungsgraden (z. B. IE3) können PM-Motoren deutlich kleiner gebaut werden.

Frequenzumrichterbetrieb

Die Motoren laufen problemlos am Frequenzumrichter. Sie benötigen in der Regel für den Betrieb sogar einen elektronischen Regler.

Besonders zu beachten

Ein wesentlicher Nachteil der PM-Motoren ist die Notwendigkeit eines Frequenzumrichters oder Reglers für den Betrieb. Zudem muss dieser wiederum eine Positionsrückmeldung bekommen, um das Magnetfeld optimal an die Position der Permanentmagnete anzupassen und die Rotation zu erzeugen. Daher besitzen solche Systeme häufig einen Geber. Allerdings gibt es auch Hersteller, wie beispielsweise Danfoss, die PM-Motoren geberlos betreiben können.

Zwei weitere Nachteile der Motoren sind zum einen die Gefahr der Entmagnetisierung bei hohem Strom und hoher Temperatur, was in der Praxis eher selten auftritt, sowie die Wartung der Motoren: Durch die starken Magnete im Rotor lässt sich dieser nur sehr schwer und mit Spezialwerkzeug aus dem Stator entfernen.

Preisentwicklung bei PM-Motoren

Für die Herstellung der Magnete werden seltene Erden benötigt, deren Preis kurzzeitig aufgrund einer stark erhöhten Nachfrage und einer Verknappung in der Verfügbarkeit stark gestiegen war. Allerdings sind in den letzten 2 Jahren die Preise deutlich gefallen. Einer der Gründe dafür ist die Erschließung neuer Minen für diese Rohstoffe.



PM-Motor mit vergrabenen Magneten



PM-Motor mit oberflächenmontierten Magneten

Line Start-PM-Motor

Technologie

Der Line Start-PM-Motor ist eine Hybrid-Lösung aus Drehstromasynchron- und PM-Motor. Er besitzt einen Käfigläufer, gleichzeitig aber auch darunter noch vergrabene Magnete. Dies resultiert in einer sehr aufwendigen Konstruktion des Läufers, was den Motor teurer macht. Allerdings hat er dabei gegenüber einem „normalen“ PM-Motor einen wesentlichen Vorteil: Er läuft direkt am Netz, ohne Regler. Während des Anlaufs ist die Käfigwicklung aktiv. Wenn der Motor auf die durch die Netzfrequenz vorgegebene Drehzahl beschleunigt hat, fällt er in Synchronität und hat den hohen Wirkungsgrad des PM-Motors.

Erreichbare IE-Klassen

Bei Netzbetrieb erreichen die Line Start-PM-Motoren die Wirkungsgradklassen IE3 oder IE4.

IEC-Baugrößen

Die erhältlichen Bauformen entsprechen der IEC-Norm. Kleinere Bauformen sind möglich.

Frequenzumrichterbetrieb

Grundsätzlich kann der Line Start-PM-Motor auch am Frequenzumrichter laufen. Allerdings ist zu beachten, dass bei Umrichterbetrieb die Wirkungsgrade häufig sinken. Sie können 5..10 % niedriger liegen, als beim Netzbetrieb. Grund dafür ist die Käfigwicklung, die als Dämpferwicklung wirkt.

Besonders zu beachten

Zunächst ergibt sich beim Anlauf ein Nachteil: Der Motor kann beim Start auch mal kurz rückwärts laufen. Dieses Anfahr-Wechselmoment gibt es auch beim Asynchronmotor am Netz. Allerdings ist es beim Line Start-PM-

Motor wesentlich ausgeprägter. Dies Wechselmoment resultiert wiederum in Momentenspitzen, die das 7..17-fache Nennmoment erreichen können. Dennoch beherrscht er keinen Schweranlauf und verfügt nicht über eine hohe Dynamik. Unterspannungen und Laststöße können dazu führen, dass der Motor aus der Synchronität fällt und somit mit einem schlechteren Wirkungsgrad läuft.

Bei Betrieb am Netz läuft der Motor mit Synchrondrehzahl, was zu einer Verschiebung der Arbeitsdrehzahl der Last führt.

Auch bei diesem Motor treten die Einflüsse der Seltenen Erden auf, da auch hier Permanentmagnete zum Einsatz kommen.



Line Start-PM-Motor mit vergrabenen Magneten und Käfigläuferwicklung

Synchron-Reluktanzmotor

Beim Synchron-Reluktanzmotor handelt es sich um eine seit langem bekannte Technologie. Wurde sie in der Vergangenheit auf Drehmoment oder Baugröße optimiert, liegt heute der Fokus auf einem energieeffizienten Design.

Technologie

Die Motoren nutzen die Reluktanzkraft, die aus einer Änderung des magnetischen Widerstands resultiert. Neue, spezielle Rotorschnitte führen die Magnetlinien im Innern des Rotors und erzeugen so ein Reluktanzmoment bei hoher Energieeffizienz.

Varianten von Synchron-Reluktanzmotoren, die direkt am Netz anlaufen können, sind inzwischen auch auf dem Markt verfügbar. Analog zum Line Start-PM-Motor wird dabei zusätzlich eine Kurzschlusswicklung eingebracht. Der Wirkungsgrad der Motoren ist sehr gut. Allerdings reduziert sich dieser bei Umrichterbetrieb wie beim Line Start-PM-Motor aufgrund der Dämpfungswirkung der Wicklung um 5..10%.

Erreichbare IE-Klassen

In der Praxis liegen die Wirkungsgrade bis ca. 11..15 kW, auch bei neuem Design, in dem Bereich IE2..IE4 (herstellerabhängig). Danach erreichen sie üblicherweise die Wirkungsgradklasse IE4. Ab diesem Leistungsspektrum weisen sie auch ein sehr gutes Verhalten bei kleineren Drehzahlen auf.

IEC-Baugrößen

Die erhältlichen Bauformen entsprechen der IEC-Norm. Kleinere Bauformen sind ebenfalls verfügbar.

Frequenzumrichterbetrieb

Für den Betrieb benötigen auch Synchron-Reluktanzmotoren einen Frequenzumrichter. Ausnahme bildet die DOL (Direct-On-Line)-Variante, die direkt am Netz anlaufen kann.

Variante für direkten Anlauf am Netz

Wie auch beim Line Start-PM-Motor kombiniert hier der Hersteller das Prinzip des Käfigläufers mit dem der Asynchronmaschine. Dazu füllt er offene Stellen im Rotorblech mit Aluminium aus und schließt diese Aluminiumstäbe an den Enden kurz. Er läuft am Netz an und gleichzeitig liefert er dann einen besseren $\cos \phi$.

Nachteil ist aber auch hier, dass die zusätzliche Dämpfung der Käfigwicklung wieder höhere Verluste bei Umrichterbetrieb erzeugt.

Besonders zu beachten

Bauartbedingt sorgen die Aussparungen in den Rotorblechen für einen schlechteren $\cos \phi$ -Wert, was je nach Umrichtertyp zu einer Überdimensionierung um 1 bis 2 Leistungsgrößen höher führt. Instabilitäten aufgrund der Rotorkonstruktion sind aktuell nicht bekannt.

Die beschriebenen leistungsabhängigen Einschränkungen im Wirkungsgrad und bei Teillast sind zu beachten.



Synchron-Reluktanzmotor

EC-Motoren

Der EC-Motor tritt in der Praxis in vielen unterschiedlichen Varianten auf. So kommt er beispielsweise als kleiner Stellmotor mit wenigen Watt zum Einsatz, aber ebenso im Bereich der Gebäudeautomation. Er hat den Ruf, einen extrem hohen Wirkungsgrad zu haben. Vor allem bei den Kleinstantrieben, dem ursprünglichen Einsatzgebiet dieser Motoren, trifft dies voll und ganz zu, wo der EC-Motor z. B. dem Universal- oder Spaltpolmotor (η ca. 30 %) deutlich überlegen ist.

Technologie

Ähnlich den PM-Motoren ist der Rotor mit Magneten bestückt und der Stator trägt die Wicklung. Im ursprünglichen Konzept arbeitet der EC-Motor mit einer DC-Spannung, die immer nur zwischen zwei Strängen angelegt und dann weiter geschaltet wurde. Daher rührt auch die Bezeichnung BLDC (Brushless-DC-Motoren) oder ECM (Electronically Commutated Motor).

Technologisch gehört der BLDC zu den AC-Motoren. Daraus folgt, dass die Bezeichnung BLDC leicht irreführend sein kann.

Zur Kompensation der Nachteile des BLDC-Konzepts, wie einen höheren Phasenstrom und Momenten-Rippel, entwickelten Hersteller bessere Verfahren zur Steuerung. So sind aktuell auch sensorlose Verfahren erhältlich. In der Gebäudeautomation unterscheiden sich EC-Motoren von den vorher beschriebenen PM-Motoren hauptsächlich durch die Konstruktion als Außenläufer, beispielsweise als Lüfter/Ventilatoren.

Erreichbare IE-Klassen

Heute liegen die Wirkungsgrade der aktuellen EC-Motoren je nach Ausführung zwischen IE2 und IE4.

IEC-Baugrößen

Die Bezeichnung EC für Elektromotoren in IEC-Ausführung ist eher unüblich. In für EC-Motoren höheren Leistungen (> ein paar hundert Watt) sind die Motoren hauptsächlich in Lüftern zu finden.

Frequenzumrichterbetrieb

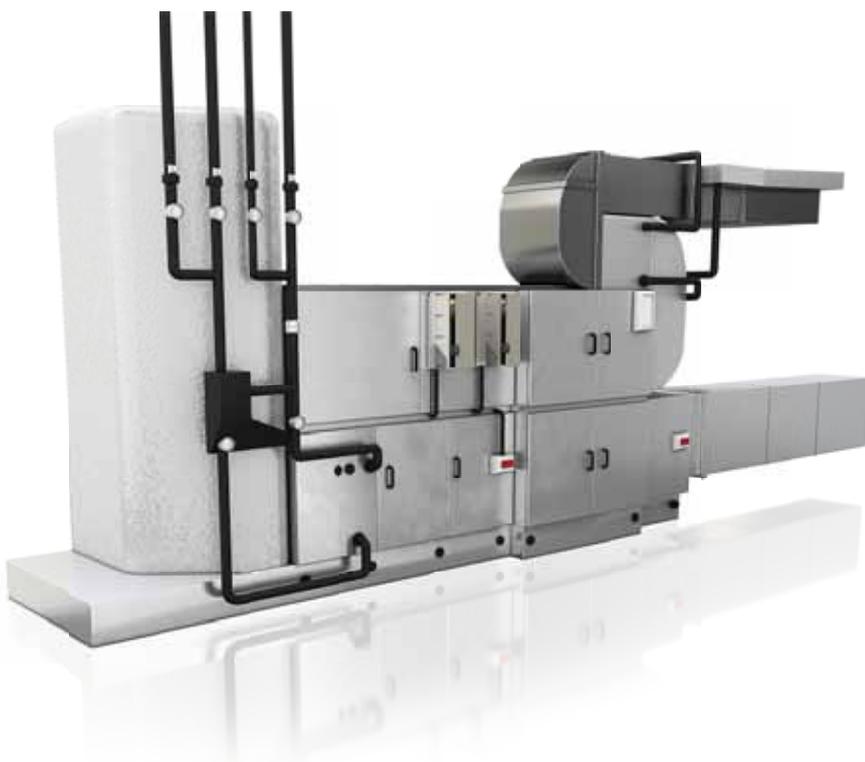
Der EC-Motor benötigt grundsätzlich eine Regelelektronik, gleichgültig, ob er nach dem ursprünglichen oder optimierten Konzept arbeitet.

Typische Anwendungen

Der EC-Motor kommt häufig als Lüfter in der Gebäudetechnik, meist als Außenläufer ausgeführt, sowie bei kleineren Leistungen als Stellmotor zum Einsatz.

Besonders zu beachten

Der Begriff EC-Motor wird oft für unterschiedliche Konzepte verwendet. Daher besteht für den Anwender natürlich die Problematik, zu unterscheiden, ob er es z. B. mit einem originalen BLDC oder mit einem verbesserten, PM-Motor ähnlichen Konzept und so mit einem besseren Wirkungsgrad zu tun hat. Aufgrund der Permanentmagnete ergeben sich die gleichen Einflussfaktoren bezüglich der seltenen Erden wie beim PM-Motor.



Systemoptimierung: Betrachtung des Gesamtsystems mit Potenzialen

Laut ZVEI lässt sich im Antriebssystem ungefähr 10% des erreichbaren Einsparpotenzials durch die Verwendung effizienter Motoren erreichen. Der drehzahlgeregelte Betrieb ergibt ein Einsparpotenzial von ca. 30%. Die größten Einsparmöglichkeiten von ca. 60% liegen aber in der Optimierung des gesamten Systems. Bei allen Maßnahmen sollte der Betreiber deshalb immer die Auswirkung auf das gesamte System beachten und prüfen, ob sich verschiedene Ansätze zur Energieeinsparung miteinander kombinieren lassen. Hierzu gehört optimierte Rohrleitungsführung bei Umbauarbeiten ebenso, wie die Möglichkeit, Softwarefunktionen in modernen Frequenzumrichtern zu nutzen.

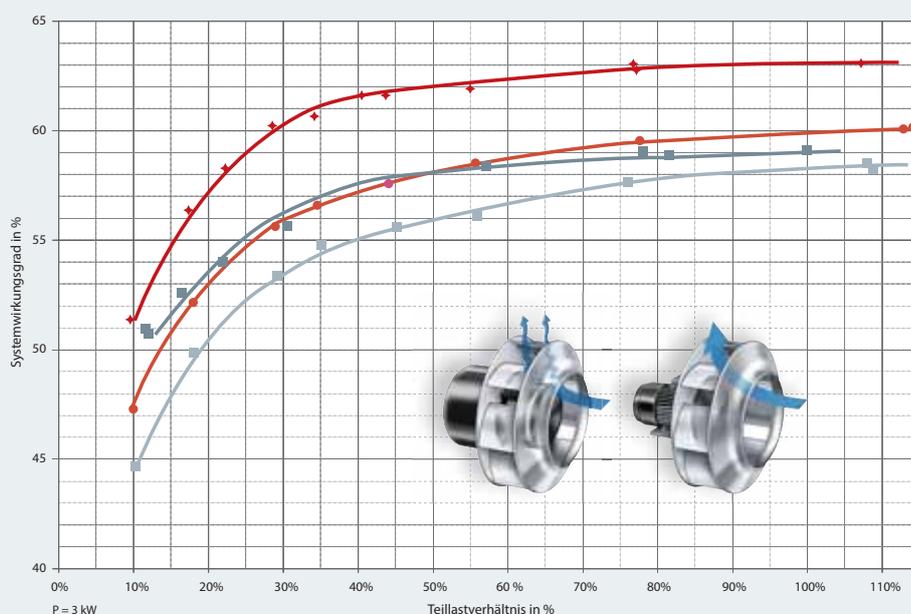
Je nach Wirtschaftszweig unterscheiden sich die Einsparpotenziale bei den verwendeten Energieträgern deutlich. Beispielsweise besteht in der Industrie häufig ein deutlich höherer Bedarf an Prozesswärme, als im Handel. Meistens bietet sich im Bereich mit dem größten Verbrauch auch das höchste Einsparpotential. So entstehen ca. 43% des Stromverbrauchs in der Industrie aber „nur“ 23% in Handel, Gewerbe und im Dienstleistungssektor.

Für die Bestimmung des Einsparpotenzials in den unterschiedlichen Bereichen sind genaue Anlagen- und Fachkenntnisse unerlässlich. Nur mit einem solchen Wissen ist es möglich, Einschätzungen zu treffen, ob und

welche Maßnahme auch wirtschaftlich sinnvoll ist.

Unabhängig davon, ob es sich um neue oder bestehende Anlagen bzw. Maschinen handelt, sollte der Betreiber des gesamten Systems analysieren, bevor er Maßnahmen zur Energieeinsparung ergreift. Dies ermöglicht ihm eine bessere Identifizierung von Lösungsansätzen und erlaubt die spätere Verifizierung, ob durchgeführte Maßnahmen auch wirksam sind und die gewünschten Einsparungen erreichen.

Wirkungsgrad des Gesamtsystems – die Kombination macht es



Wie Messungen am Institut für Lüftung und Kältetechnik belegen: Der maximale Wirkungsgrad des Gesamtsystems ist nur durch Kombination der bestmöglichen Einzelkomponenten zu erreichen. So verringert das Danfoss EC+ System durch die Kombination optimaler Komponenten Motor, Frequenzumrichter und Laufrad die Verluste in einem Ventilatorsystem um bis zu 11%. Der EC-Lüfter verspielt aufgrund der ungünstigeren Geometrie des Lüfterrads seinen sehr guten Motorwirkungsgrad, was zu einem 3...5% schlechteren Systemwirkungsgrad führt.

- + EC+ Ventilatorsystem mit PM-Motor
- EC Ventilatorsystem
- Ventilatorsystem mit Standardmotor (IE3)
- Ventilatorsystem mit Standardmotor (IE2)

Zusammenfassung

Wie die Betrachtung der verschiedenen Motortypen zeigt, hat die gesetzliche und wirtschaftliche Forderung nach hoher Energieeffizienz den Markt für Motoren sehr angeregt. Viele Varianten, traditionelle, aber auch neue Technologien, drängen auf den Markt und werben um die Gunst der Anwender. Es wird sehr spannend sein, zu sehen, welche Technologie oder welche Technologien sich auf Dauer durchsetzen werden.

Und die Entwicklung ist noch lange nicht am Ende. Schon prüfen Hersteller beispielsweise, ob möglicherweise Ferrite anstelle von Magneten einzusetzen sind. Erste Tests sehen vielversprechend aus.

Für den Anwender gilt es, genau zu schauen, wann ein Einsatz hocheffizienter Motoren sinnvoll ist. So ist IE4 nicht unbedingt immer sinnvoll, wegen der damit verbundenen hohen Kosten oder bei vielen Lastspielen, dann aufgrund höherer Trägheitsmomente.

Zuletzt gilt es zu bedenken, dass einige der beschriebenen Nachteile bei den verschiedenen Motoren sich durch Optimierungen abschwächen lassen, so z. B. das Anlaufverhalten bei den Line Start-PM-Motoren. Allerdings können solche Maßnahmen ggf. wieder andere Nachteile hervorrufen.

Ziel dieser Broschüre ist es, dem Anwender die Diskussion mit dem Hersteller zu erleichtern, um gemeinsam die beste Antriebslösung für die jeweilige Applikation zu suchen und/oder zu entwickeln.

Motor	Erreichbarer Wirkungsgrad	IEC-Bauform	Umrichterbetrieb	Anwendungen	Kommentar
DASM	IE3/IE4	Teilweise ab IE3 problematisch	Unproblematisch	Fast alle Anwendungen.	Halten bei IE3/IE4 ggfs. IEC-Anschlussmaße nicht ein.
DASM mit Kupferrotor	IE3/IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner bauen.	Unproblematisch	Fast alle Anwendungen.	Höherer Anlaufstrom und andere Anlaufmomente im Vergleich zum DASM. Muss bei Anlagendesign und bei Retro-fit beachtet werden.
PM	IE3/IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner bauen.	Benötigt immer Regler. Einige Umrichter benötigen Positionsrückführung. Besserer Wirkungsgrad bei niedrigeren Drehzahlen als DASM.	Fast alle Anwendungen.	Zeitweise hohe Preise für benötigte Seltene Erden. Aktuell sinkende Preise.
LSPM	IE3/IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner bauen.	Möglich. Wirkungsgrad ca. 5-10% schlechter als am Netz	Kein Schweranlauf, keine hohe Dynamik, Probleme bei schwachen Netzen und Laststößen.	Motor mit sehr gutem Wirkungsgrad, wenn die Einschränkungen in der Applikation akzeptabel sind. Problematik der Seltenen Erden analog zum PM Motor.
EC	IE3/IE4	Nein	Benötigt immer Regler	Kleine Leistung, EC-Ventilatoren, Stellmotoren	Gerade bei kleineren Leistung (<0,75 kW) im Vergleich zu anderen Technologien hoher Wirkungsgrad. Konstruktion in Zentrifugalventilatoren als Lüfternabe ist oft nachteilig für Systemwirkungsgrad. Problematik der Seltenen Erden analog zum PM-Motor.
SynRM	IE2-IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner bauen.	Benötigt immer Regler. Bei Leistungen ab ca. 11/15 kW besserer Wirkungsgrad bei niedrigeren Drehzahlen auf PM-Niveau. Benötigt oft größeren FU wegen schlechten cos Phi.	Z. Zt. hauptsächlich Pumpen und Lüfteranwendungen ab ca. 11/15 kW.	Motoren sind noch relativ neu auf dem Markt. Vorteile liegen aktuell eher im Bereich ab 11/15 kW.

DASM Drehstromasynchronmotor
 PM Permanent Magnet
 LSPM Line Start PM
 EC Electronically commutated
 SynRM Synchron-Reluktanz

Motorbetrieb am Umrichter Eignung, Effizienz, Optimierung

Warum Umrichter einsetzen?

Die Nutzung höher effizienter Motoren fügt der Nutzung von Umrichtern einen weiteren, neuen Aspekt hinzu. Zum einen bietet die Drehzahlreglung, die ihren Einsatz ermöglicht, ein enormes Einsparpotential bei Energieverbrauch und -kosten, zum anderen lassen sich einige der Motortechnologien überhaupt erst durch diese Technik nutzen.

Welche Motoren sind für den Umrichterbetrieb geeignet?

Die größte Belastung des Motors tritt durch die gepulste Ausgangsspannung des Umrichters auf, die dieser zur Modellierung der Ausgangsspannung verwendet. Die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit der Ausgangspulse belastet das Isolationssystem des Motors. Durch die Nutzung moderner Isolationswerkstoffe stellt diese Belastung aber seit ca. 10-15 Jahren in der Regel kein Problem mehr da. Bei der Nutzung älterer Motoren kann die Belastung der Wicklung ohne Verwendung geeigneter Ausgangsfilter am Umrichter allerdings zum Ausfall führen. Dann empfehlen sich du/dt- oder Sinusfilter zur Reduzierung der Spannungsspitzen und zum Schutz der Isolierung.

Thermische Beanspruchung

Durch eine angepasste Ansteuerung sind viele moderne Umrichter, zu denen alle Danfoss Geräte gehören, in der Lage, die eingespeiste Eingangsspannung auch am Ausgang zur Verfügung zu stellen. Die Motorerwärmung liegt dann bei Normmotoren (bis Baugröße 315) im Bereich der Zusatzwärmerung durch Netztoleranzen und ist somit zu vernachlässigen. Bei Umrichtern, z. B. mit schlankem Zwischenkreis, die nicht in der Lage sind, die volle Netzspannung bei der Netzennfre-

quenz zu erzeugen, empfiehlt sich die Ausführung der Motorisolation in der Wärmeklasse F, da die Motortemperatur sich um bis zu 10 K erhöhen kann.

Lagerbelastung

Unter ungünstigen Umständen (Netzspannung, Erdung, Schirmung,...), kann es vorkommen, dass frequenzgeregelte Motoren (üblicherweise erst ab Bauform 132) mit Lagerschäden durch Lagerströme ausfallen. Eine Ursache können beispielsweise Entladeströme im Schmierfilm des Lagers sein, die impulsartig auftreten und über einen längeren Zeitraum das Lager schädigen. Einfache Maßnahmen (gute Erdverbindung, geschirmte Motorkabel, isolierte Lager, spezielle Lagerfette...) reduzieren die Lagerströme und somit das Risiko eines Ausfalls.

Auslegung des Antriebssystems

Bei der Zusammenstellung von Umrichter und Motor dient die Leistungsangabe in kW der ersten Orientierung. Zur Feinabstimmung sind aber die benötigten Ströme bzw. Scheinleistungen (besonders beim Synchron-Reluktanzmotor zu beachten!) abzugleichen. Wichtig ist, dass der Umrichter die in der Anwendung benötigte Überlast zur Verfügung stellen kann. Typischerweise liegt diese bei Lüftern und Pumpen in der Regel bei 110%, bei Fließbändern oder Hebern bei 160%.

Optimierung

Kommt in der Anwendung ein Umrichter eine Größe höher zum Einsatz, als eigentlich benötigt, z. B. um eine höhere Überlast zu ermöglichen, wirkt sich dies aufgrund der hohen Wirkungsgrade energetisch nicht nachteilig aus. Anders beim Motor, wo die Überdimensionierung einen deutlich

höheren Einfluss hat. Abhängig von der Motorauslegung und -konstruktion kann der Wirkungsgrad bei der Wahl eines größeren Motors beim Betriebspunkt der Anlage sogar besser sein, als bei Volllast.

Umrichter mit an die Motortechnologie angepassten Regelverfahren sorgen im Betrieb für die optimale Magnetisierung, auch bei Teillast. Dies gilt auch bei (stark) wechselnden Lasten. So arbeiten die Danfoss Umrichter beispielsweise bei PM-Motoren nach dem MTPA (Maximum Torque per Ampere = Maximales Drehmoment pro Ampere)-Konzept, das bei jeder Motorkonstruktion die bestmögliche Energieeffizienz ermöglicht.

Weiterführende Informationen

Die Mehrzahl der auf dem Markt verfügbaren Standarddrehstrommotoren lässt sich problemlos an modernen Umrichtern betreiben. Anwender sollten die jeweiligen Besonderheiten der verschiedenen Technologien bei Auswahl und Installation beachten, stellen aber Fachleute vor keine großen Herausforderungen. Einen kurzen Überblick zu der Thematik gaben die vorherigen Abschnitte. Weiterführende Informationen können Sie beispielsweise den praxisorientierten Planerfibeln von Danfoss zur sicheren und energieeffizienten Auslegung von Antriebslösungen entnehmen.

Die Vision hinter VLT®

Danfoss ist einer der Marktführer bei der Entwicklung und Herstellung von Frequenzumrichtern – und gewinnt täglich neue Kunden hinzu.

Verantwortung für die Umwelt

Danfoss VLT® Produkte mit Rücksicht auf Mensch und Umwelt

Alle Fertigungsstätten für VLT® Frequenzumrichter sind gemäß den Standards ISO 14001 and ISO 9001 zertifiziert.

Alle Aktivitäten von Danfoss berücksichtigen den Mitarbeiter, die Arbeitsplätze und die Umwelt. So erzeugt die Produktion nur ein absolutes Minimum an Lärm, Emissionen und anderen Umweltbelastungen. Daneben sorgt Danfoss für eine umweltgerechte Entsorgung von Abfällen und Altprodukten.

UN Global Compact

Danfoss hat seine soziale Verantwortung mit der Unterzeichnung des UN Global Compact festgeschrieben. Die Niederlassungen verhalten sich verantwortungsbewusst gegenüber lokalen Gegebenheiten und Gebräuchen.

Energieeinsparungen durch VLT®

Die Energieeinsparung einer Jahresproduktion von VLT® Frequenzumrichtern spart soviel Energie ein, wie ein größeres Kraftwerk jährlich erzeugt. Daneben optimiert die bessere Prozesskontrolle die Produktqualität und reduziert den Ausschuss und den Verschleiß an den Produktionsstraßen.



Der Antriebsspezialist

Danfoss VLT Drives ist weltweit einer der führenden Antriebstechnikhersteller. Bereits 1968 stellte Danfoss den weltweit ersten in Serie produzierten Frequenzumrichter für Drehstrommotoren vor und hat sich seitdem auf die Lösung von Antriebsaufgaben spezialisiert. Heute steht VLT® für zuverlässige Technik, Innovation und Know-how für Antriebslösungen in den unterschiedlichsten Branchen.

Innovative und intelligente Frequenzumrichter

Ausgehend von der Danfoss VLT Drives Zentrale in Graasten, Dänemark, entwickeln, fertigen, beraten, verkaufen und warten 2500 Mitarbeiter in mehr als 100 Ländern die Danfoss Antriebslösungen.

Die modularen Frequenzumrichter werden nach den jeweiligen Kundenanforderungen gefertigt und komplett montiert geliefert. So ist sichergestellt, dass Ihr VLT® stets mit der aktuellsten Technik zu Ihnen geliefert wird.

Vertrauen Sie Experten – weltweit

Um die Qualität unserer Produkte jederzeit sicherzustellen, kontrolliert und überwacht Danfoss VLT Drives die Entwicklung jedes wichtigen Elements in den Produkten. So verfügt der Konzern über eine eigene Forschung und Softwareentwicklung sowie eine moderne Fertigung für Hardware, Leistungsteile, Platinen und Zubehör.

VLT® Frequenzumrichter arbeiten weltweit in verschiedensten Anwendungen. Dabei unterstützen die Experten von Danfoss VLT Drives unsere Kunden mit umfangreichem Spezialwissen über die jeweiligen Anwendungen. Umfassende Beratung und schneller Service sorgen für die optimale Lösung bei höchster Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Eine Aufgabe ist erst beendet, wenn Sie als Kunde mit der Antriebslösung zufrieden sind.



Deutschland: Danfoss GmbH VLT® Antriebstechnik, Carl-Legien-Straße 8, D-63073 Offenbach, Tel: +49 69 8902-0, Telefax: +49 69 8902-106, www.danfoss.de/vlt
 Österreich: Danfoss Gesellschaft m.b.H. VLT® Antriebstechnik, Danfoss Straße 8, A-2353 Guntramsdorf, Tel: +43 2236 5040-0, Telefax: +43 2236 5040-35, www.danfoss.at/vlt
 Schweiz: Danfoss AG VLT® Antriebstechnik, Parkstrasse 6, CH-4402 Frenkendorf, Tel: +41 61 906 11 11, Telefax: +41 61 906 11 21, www.danfoss.ch/vlt

Die in Katalogen, Prospekten und anderen schriftlichen Unterlagen, wie z.B. Zeichnungen und Vorschlägen enthaltenen Angaben und technischen Daten sind vom Käufer vor Übernahme und Anwendung zu prüfen. Der Käufer kann aus diesen Unterlagen und zusätzlichen Diensten keinerlei Ansprüche gegenüber Danfoss oder Danfoss-Mitarbeitern ableiten, es sei denn, daß diese vorsätzlich oder grob fahrlässig gehandelt haben. Danfoss behält sich das Recht vor, ohne vorherige Bekanntmachung im Rahmen des Angemessenen und Zumutbaren Änderungen an ihren Produkten – auch an bereits in Auftrag genommenen – vorzunehmen. Alle in dieser Publikation enthaltenen Warenzeichen sind Eigentum der jeweiligen Firmen. Danfoss und das Danfoss-Logo sind Warenzeichen der Danfoss A/S. Alle Rechte vorbehalten.