



Motoren mit Zukunft

Frequenzumrichter gespeiste Synchronmotoren sorgen für höhere Effizienz und Kompaktheit in industriellen Anwendungen

HEINZ LENDENMANN, REZA R. MOGHADDAM, ARI TAMMI, LARS-ERIK THAND – Etwa 60–65 % des in der Industrie benötigten Stroms wird von Elektromotoren verbraucht. Hauptziel bei der Optimierung von Motoren ist daher eine effizientere Energienutzung durch Steigerung des Wirkungsgrads. Bedeutende Einsparungen lassen sich zudem durch drehzahlgeregelte Antriebssysteme erzielen, die mittlerweile in 30–40 % aller neu installierten Motoren zum Einsatz kommen. Um eine hohe Nachhaltigkeit der Nutzung und Investition zu gewährleisten, sind zudem

eine hohe Zuverlässigkeit und eine lange Lebensdauer des Motors gefordert. Die optimierte Rotorstruktur der synchronen Reluktanzmotoren von ABB beseitigt Käfigverluste, was den Wirkungsgrad und die Kompaktheit der Motoren erhöht. Dadurch, dass Baugrößen-Normleistungen und -Normdrehmomente mit einer geringeren Erwärmung (entsprechend der Wärmeklasse A, 60 K) erreicht werden können, verlängern sich die Lebensdauer der Isolierung und die Lebensdauer bzw. die Schmierintervalle der Lager.



Da die Motoren mit hohen Drehzahlen betrieben werden können, kann in vielen Fällen auf mechanische Kraftübertragungskomponenten wie Getriebe verzichtet werden.

Elektromotoren werden in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen eingesetzt. Bei den meisten dieser Anwendungen ist eine möglichst hohe Effizienz und lange Lebensdauer der Motoren gefragt, ohne dass sich dadurch die Wartungsanforderungen oder das Ausfallrisiko erhöhen. Aufgrund ihrer geringen Größe helfen die synchronen Reluktanzmotoren Maschinenbauern dabei, kleinere, leichtere und effizientere Geräte zu entwickeln. Da die Motoren mit hohen Drehzahlen betrieben werden können, kann in vielen Fällen auf mechanische Kraftübertragungskomponenten wie Getriebe verzichtet werden. Dies ermöglicht eine Integration des Motors und der angetriebenen Ausrüstung – eine Forderung, die immer häufiger gestellt wird.

Um der Nachfrage nach einem effizienteren, kleineren, langlebigeren und wartungsarmen Motor zu begegnen, der sich zudem perfekt für den Betrieb mit einem Frequenzumrichter eignet, hat ABB alle technischen Möglichkeiten genau geprüft. Das Starten

eines umrichter gespeisten Motors ist völlig anders als das Einschalten eines Motors, der direkt an das 50-Hz-Stromnetz angeschlossen ist. Hieraus und aus der Veränderung anderer Randbedingungen ergaben sich potenzielle Möglichkeiten zur Vereinfachung des Motorendesigns und zur Verbesserung der Effizienz. Ein häufiger Ansatz ist die Verwendung von Synchronmotoren (SM). Ein Synchronmotor mit einem vierpoligen Rotor läuft im 50-Hz-Betrieb bei einer Drehzahl von genau 1.500 U/min synchron mit der Versorgungsspannung. Bei einem entsprechenden Asynchronmotor (AM) mit 30 kW hingegen treten Schlupfverluste auf, weshalb er nur mit 1475 U/min läuft. Bei modernen AMs mit Kurzschlussläuferkäfig machen die Rotorverluste 20–35 % der gesamten Motorverluste aus. Die meisten dieser Verluste können durch einen synchronen Betrieb vermieden werden.

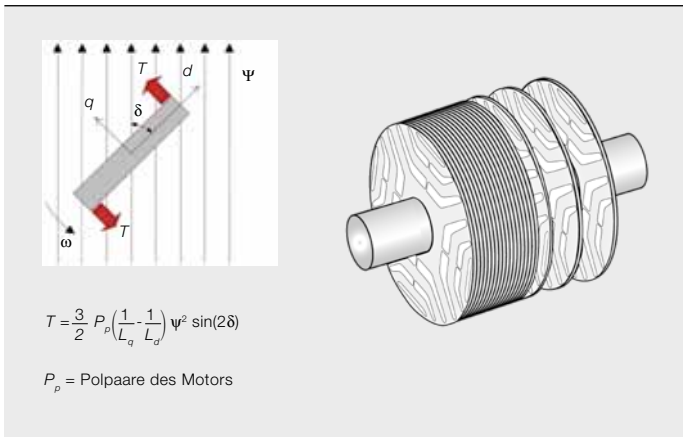
Die Beseitigung dieser Schlupfverluste ermöglicht eine Effizienzsteigerung zwischen 0,6 % (220-kW-Motor) und 8 % (3 kW)

sowie eine Steigerung der Leistungs- und Drehmomentdichte um 20–40 % bei gleicher Wärmeklasse der Isolation.

Synchronmotoren gibt es in verschiedenen Varianten: Motoren mit Feldwicklung und bürstenlosen Erregern, Permanentmagnetmotoren (PM-Motoren) oder Motoren, die nach dem Prinzip der magnetischen Reluktanz arbeiten (oft als synchrone Reluktanzmotoren oder SynRM bezeichnet). Ein SynRM-Rotor verfügt weder über einen leitfähigen Kurzschlusskäfig wie beim AM noch über Permanentmagnete oder eine Felderregwicklung. Stattdessen wird das Prinzip der magnetischen Reluktanz genutzt.

Der synchrone Reluktanzmotor

Magnetische Reluktanz ist das magnetische Pendant zum elektrischen Widerstand. Der Rotor besitzt in einer Richtung einen möglichst geringen magnetischen Widerstand (d) und rechtwinklig dazu (q) eine hohe magnetische Reluktanz (bzw. eine gute magnetische „Isolation“) → 1. Das Drehmoment entsteht dadurch, dass der



Rotor versucht, die magnetisch leitfähige Richtung am Statorfeld auszurichten. Die Höhe des erzeugten Drehmoments ist direkt proportional zur Ausprägung, d.h. dem Verhältnis der Induktivitäten der beiden magnetischen Richtungen des Rotors. Die Erfindung des synchronen Reluktanzmotors geht zurück auf das Jahr 1923. In der Industrie fand er jedoch kaum Anwendung, da er im direkten Netzanschluss nicht selbstständig anläuft. Dank moderner drehzahl geregelter Antriebe mit Frequenzumrichter ist dies mittlerweile kein Problem mehr → 2.

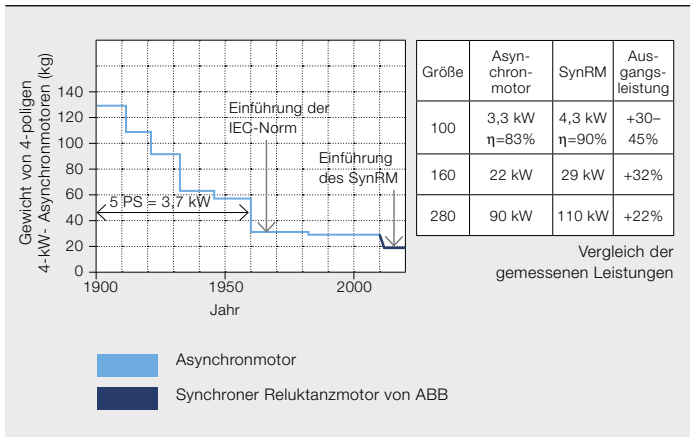
Im Jahr 1982 wurden Permanentmagnetwerkstoffe auf der Basis von Neodym (NdFeB) entdeckt. Die daraus resultierende neue Permanentmagnet-Motortechnologie (PM) wurde besonders für Servomotoren genutzt und setzt sich heute in vielen industriellen Spezialanwendungen wie getriebelosen, langsam laufenden Drehmomentmotoren zunehmend durch [1]. Der nüchterne SynRM blieb erneut weitgehend unbeachtet. Hinzu kam, dass in vielen früheren Veröffentlichungen zum SynRM die (laut Berechnungen zu erwartenden) überlegenen Drehmoment- und Effizienzeigenschaften gegenüber dem AM nicht recht deutlich wurden. Für viele Experten ist dies der Grund für das heutige Schattendasein des SynRM. Vermutlich fehlte es diesen ersten Versuchen noch an einer ausreichend optimierten Umrichtersteuerung. Einige Veröffentlichungen zeigen jedoch äußerst vielversprechende Ergebnisse und befassen sich sehr genau mit den elektromagnetischen Designaspekten [2], [3]. Wichtig ist hier der Unterschied zwischen dem SynRM und dem geschalteten Reluktanzmotor oder Schrittmotor, der einen völlig anderen Stator, ein anderes Wicklungskonzept und einen nicht sinusförmigen Stromverlauf besitzt. Jener Motor wird aufgrund seines hohen Geräuschpegels für den industriellen

Einsatz häufig als ungeeignet erachtet. Ein oft genannter Nachteil des SynRM ist der höhere Strombedarf für das gleiche Drehmoment im Vergleich zum PM-Motor, da der Rotor durch den Stator magnetisiert werden muss. Allerdings wird der vom Netz aus betrachtete Leistungsfaktor durch den Stromrichter bestimmt und liegt selbst beim SynRM in allen Betriebsarten nahe bei eins.

Der perfekte Umrichtermotor

Bei den SynRM-Rotoren und der Umrichtersteuerung von ABB ist der Motorstrom, der sich umgekehrt proportional zum Leistungsfaktor und Wirkungsgrad verhält ($\propto 1/(\eta \cdot \cos(\phi))$), tatsächlich geringer als bei einer kleinen Asynchronmaschine mit gleichem Drehmoment und gleicher Drehzahl. Dies ist vor allem auf den erheblich besseren Wirkungsgrad zurückzuführen. Lediglich bei größeren Motoren ist der Umrichterstrom höher als bei einem AM mit gleichem Drehmoment. Im Allgemeinen können die SynRM von ABB mit Umrichtern der gleichen Größe (z. B. dem ACS850) betrieben werden wie AMs mit gleicher Leistung und gleichem Drehmoment – allerdings mit höherer Leistungsdichte und höherem Wirkungsgrad. Diese Steigerung des Motorwirkungsgrads führt zu einer nahezu identischen Energieeinsparung für das gesamte Antriebssystem.

Ein weiterer bedeutender Vorteil des SynRM von ABB ist die schlichte Rotorstruktur. Ohne Magnete und Käfig ist der Rotor robuster als bei AM oder PM-Maschinen. Zudem entfällt das Risiko eines permanenten Leistungsverlusts durch Entmagnetisierung bei einem Ausfall oder

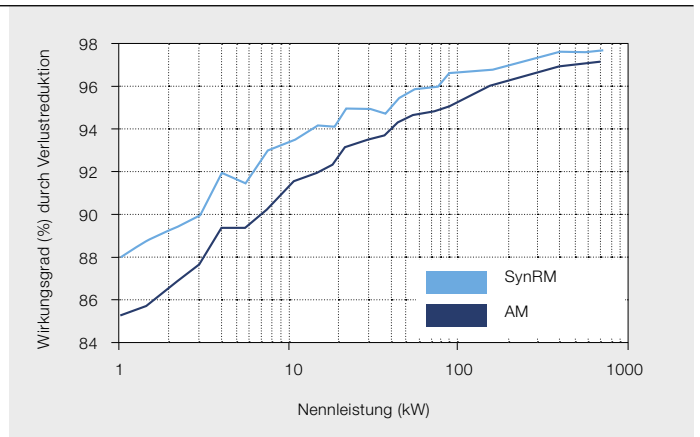
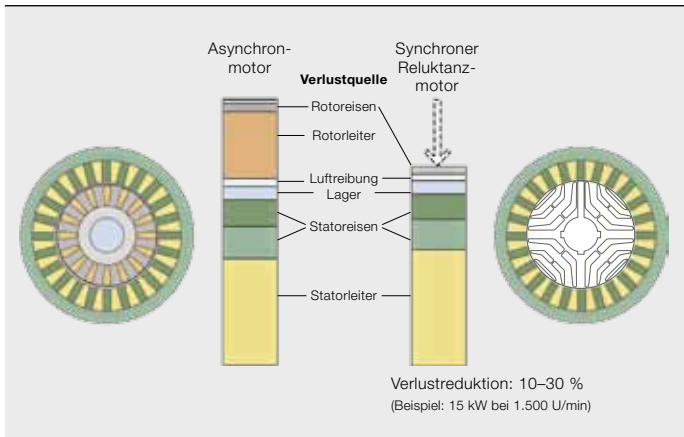


Überhitzung. Der Motor ist eigensicher im Betrieb, da durch die fehlenden Magnete keine elektromotorische Gegenspannung induziert wird. Ein Überspannungsschutz des Umrichters ist daher überflüssig. Außerdem sind die für Permanentmagnete benötigten Seltenerde-Werkstoffe relativ teuer und stehen aufgrund der geographischen Konzentration der Lieferanten auf einigen Märkten möglicherweise nur beschränkt zur Verfügung.

Aus der weitgehenden Beseitigung der Rotorverluste und der optimierten Rotorstruktur ergeben sich eine Reihe von Vorteilen für diese Motoren und die davon angetriebene Ausrüstung → 3. Ein Motor mit dieser Technologie kann mit der nach IEC standardisierten Normleistung für die jeweilige Baugröße betrieben werden. In diesem Fall reicht die Effizienzsteigerung von über 5 % für Maschinen im einstelligen kW-Bereich bis 0,5 % für die größten Motoren (Baugröße 315). Wo also ein AM einen Temperaturanstieg nach Klasse F (105 K) erreicht hätte, bleibt der SynRM in der Wärmeklasse A (60 K) → 4. Nimmt man zum Beispiel einen Kompressor, der mit 4.500 U/min betrieben wird, bleiben die Lagertemperaturen beim SynRM von ABB selbst bei

Bei kleinen Motoren mit 3 oder 4 kW kann die Leistung bei gleichem Temperaturanstieg um bis zu 60 % gesteigert werden.

einem echten Temperaturanstieg der Klasse H (125 K) noch unter denen, die beim Betrieb mit einem größeren AM und einem Temperaturanstieg der Klasse F (105 K)



erreicht werden. Aus diesem Grund erhielt der Motor den Beinamen „CoolMotor“ → 5. Diese niedrige Betriebstemperatur verlängert die Lebensdauer der Motorisolierung und die Lebensdauer bzw. die Schmierintervalle der Lager. Besonders Motorlager erfordern eine regelmäßige Wartung, und einigen Studien zufolge sind Lagerschäden für etwa 70 % aller ungeplanten Motorausfälle verantwortlich. Die geringere Lagertemperatur macht sich unmittelbar durch längere Schmierintervalle, einen geringeren Wartungsaufwand und eine höhere Zuverlässigkeit bemerkbar. Selbst wenn ein Lager einmal ausgetauscht werden muss, ist dies aufgrund der nicht vorhandenen magnetischen Kräfte, wie sie beim PM-Motor auftreten, ebenso einfach wie bei einem AM. Die Technologie ermöglicht eine hohe Drehmomentausbeute sogar bei höheren Drehzahlen. In dieser Anwendung der SynRM Technologie bleibt der Temperaturanstieg im Bereich der herkömmlichen Klassen B oder F. Da Verluste am Rotor im Vergleich zu Statorverlusten schwer zu kühlen sind, wirkt sich ihre nahezu vollständige Beseitigung hier besonders positiv auf das Drehmomentverhalten aus. Bei kleinen Motoren mit 3 oder 4 kW kann die Leistung bei gleichem Temperaturanstieg um bis zu 60 % gesteigert werden. Bei einem 60-kW-Motor liegt die Steigerung im Vergleich zu einem AM im Bereich von 40 % und bei einem 220-kW-Motor bei etwa 20 %. In den meisten Fällen kann stattdessen die gleiche Leistung mit einem SynRM erzielt werden, der um eine oder sogar zwei Baugrößen kleiner ist als ein entsprechender AM. Dies zahlt sich in allen Anwendungen aus, in denen platzsparende Motoren von Vorteil sind. Ein weiterer Pluspunkt ist die geringere Wärmeabgabe an benachbarte Teile, besonders in geschlossenen Schränken. Selbst bei dieser extrem erhöhten Leistungsichte hat die Beseitigung der Rotor-

verluste noch einen weiteren wichtigen Vorteil: Da weniger Wärme durch die Welle abgeleitet wird, sinkt die Lagertemperatur besonders auf der Antriebsseite. Im Vergleich zu einem AM können mit einem SynRM von ABB bei einer Leistung von 6 kW Temperatursenkungen um bis zu 30 K erzielt werden. Über den gesamten Leistungsbereich hinweg liegt die Reduktion typischerweise bei 15–20 K. Dieser Effekt macht sich besonders bei höheren Drehzahlen und beim Betrieb in höheren Wärmeklassen bemerkbar. Der allgemein hohe Wirkungsgrad bleibt selbst bei dieser hohen Ausgangsleistung erhalten. Darüber hinaus verfügt der SynRM von ABB über die für Synchronmaschinen typische, ausgezeichnete Wirkungsgradkurve bei Teillast, d.h. der Wirkungsgrad bleibt selbst bei Teillast hoch. Diese Eigenschaft zahlt sich insbesondere bei drehzahlgeregelten Systemen für Gebläse und Pumpen aus.

Last but not least besitzen die Rotoren aufgrund des Fehlens von Käfig und Magneten eine um 30–50 % geringere Trägheit. In besonders dynamischen Anwendungen wie Kränen sorgt dies für weitere Effizienzvorteile und kürzere Hubzyklen, da die Motoren schneller beschleunigt werden können.

Rotorkonstruktion und Zuverlässigkeit

Die meisten technischen Aspekte der ABB SynRM-Antriebssysteme basieren auf vorhandenen Technologien. Gehäuse, Anschlusskasten, Stator, Wicklungsdesign und -technologie sowie Lager sind identisch mit denen von AMs. Da die dreiphasigen Ströme sinusförmig sind, kann dieser Motortyp von den gleichen Umrichtern gespeist werden, sofern diese über eine optimierte Firmware verfügen, die diesen Motortyp unterstützt. Lediglich der Rotor ist anders.

Der Rotor ist weniger komplex als bei AMs und PM-Motoren und besteht aus laminier-

Die niedrige Betriebstemperatur verlängert die Lebensdauer der Motorisolierung und die Lebensdauer bzw. Schmierintervalle der Lager.

Die Umgebungstemperatur ist die Temperatur der Luft, die den Motor umgibt. Dies ist der Referenzwert bzw. die Temperatur, die der Motor annimmt, wenn er abgeschaltet und vollständig abgekühlt ist.

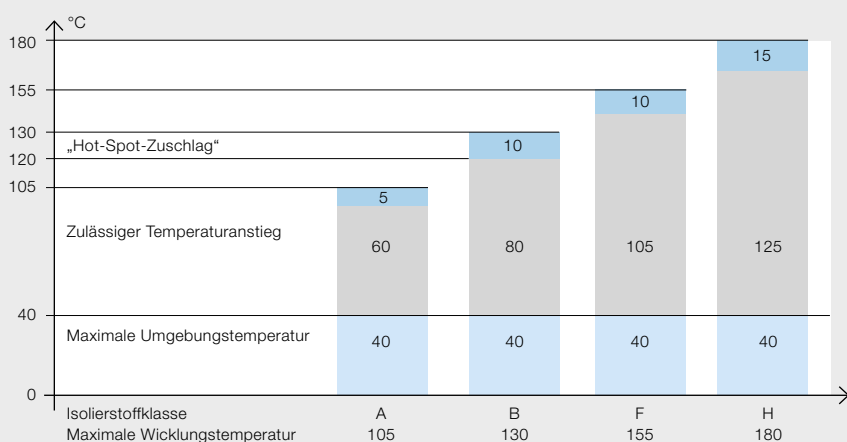
Die Erwärmung oder der Temperaturanstieg des Motors entspricht der Differenz zwischen der Referenztemperatur und der Temperatur bei Vollast.

Die Standardmethode zur Messung des Temperaturanstiegs basiert auf der Bestimmung der Differenz zwischen dem „kalten“ und „heißen“ ohmschen Widerstand der Wicklung. Dadurch wird der Temperaturanstieg der gesamten Wicklung einschließlich der Zuleitungen, Wickelköpfe und Drähte tief im Inneren der Statornuten gemittelt. Da einige dieser Stellen heißer sind als andere, wird aus der Durchschnittstemperatur und einem „Hot-Spot-Zuschlag“ die wahrscheinliche Temperatur an der heißesten Stelle bestimmt.

Isolierungen werden nach ihrer Beständigkeit gegen thermisches Altern und Versagen in Isolierstoffklassen eingeteilt. Die vier häufigsten Isolierstoffklassen sind die Klassen A, B, F, und H. Die Temperaturbeständigkeit der einzelnen Klassen entspricht der maximalen Betriebstemperatur, bei der die Isolierung eine durchschnittliche Lebensdauer von 20.000 Stunden erreicht.

Wird ein Motor mit einer geringeren Erwärmung betrieben als durch die Isolierstoffklasse zulässig, kann dies seine Temperaturfähigkeit dahingehend verändern, dass er höheren Umgebungstemperaturen standhalten kann oder dass die Lebensdauer des Motors verlängert wird.

Die folgende Tabelle zeigt die Grenztemperaturen, den zulässigen Temperaturanstieg und die Hot-Spot-Zuschläge für verschiedene Wärmeklassen von Standardmotoren.



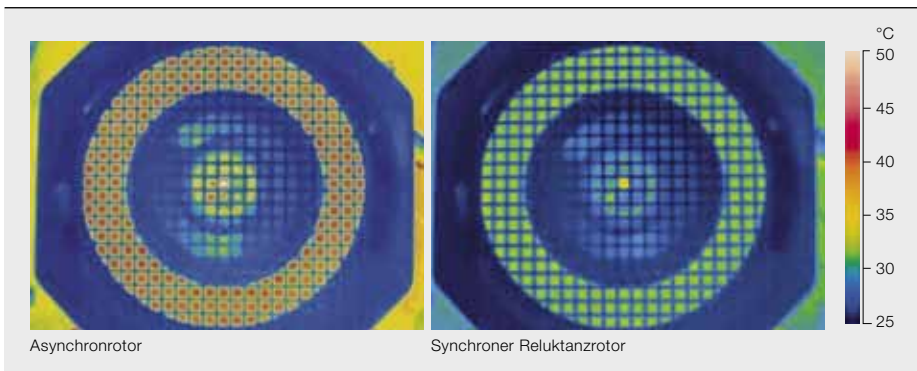
Mithilfe von beschleunigten Belastungsprüfungen (HAST) wurden die Bedingungen von Pumpen-, Gebläse-, Kompressor-, Bergbau- und Krananwendungen nachgebildet.

ten Blechen aus weichmagnetischem Stahl, die an der Welle befestigt sind. Komplex ist hingegen das Design. Umfangreiche Finite-Elemente-Simulationen waren erforderlich, um die elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Rotorquerschnitts sicherzustellen. Wichtige konstruktive Aspekte sind die Zahl der magnetischen Segmente und die genaue Form der Luftbarrieren, da diese für die Drehmomenterzeugung und den Magnetisierungsstrom ausschlaggebend sind. Für eine günstige Auslegung des Antriebs musste dieser Blindstrom möglichst gering gehalten werden. Die genaue Platzierung der Segmente entlang der Peripherie ist entscheidend für ein gleichmäßiges Drehmoment bei der Rotation, damit der Motor ebenso leise läuft wie herkömmliche Motoren. Ein Ergebnis dieser komplexen Optimierung mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) sowie analytischen und genetischen Algorithmen war, dass sich eine vierpolige Konfiguration für den gesamten Drehzahlbereich bis 6.000 U/min am besten eignet.

Um die Zuverlässigkeit dieses neuen Rotors zu gewährleisten, wurden Motor und Antriebssystem während der gesamten Entwicklungsphase umfangreichen Prüfungen unterzogen (siehe Titelbild). Mithilfe von Methoden zur beschleunigten Belastungsprüfung (Highly Accelerated Stress Testing, HAST) wurden die Bedingungen von Pumpen-, Gebläse-, Kompressor-, Bergbau- und Krananwendungen nachgebildet. Dabei wurden eigens für diesen Motortyp entwickelte HAST-Zyklen verwendet, um eine robuste Leistungsfähigkeit über die gesamte Lebensdauer hinweg zu gewährleisten. In einem erfolgreichen Versuch wurden zum Beispiel Motorstarts und -stopps mit hoher Wiederholrate und mit Spitzendrehzahlen oberhalb der maximal zulässigen Betriebsdrehzahl durchgeführt. Die Anzahl der Zyklen und die Überlastbedingungen wurden so bemessen, dass sie einer Lebensdauer von über 20 Jahren im normalen Betrieb entsprachen.

Antriebsstromrichter und Steuerung

Die herkömmliche ABB-Antriebstechnologie mit standardmäßiger direkter Drehmomentregelung (Direct Torque Control, DTC) für AM und PM-Motoren wurde angepasst und um den SynRM als neuen Motortyp erweitert. Trotz der vielen Gemeinsamkeiten mit dem PM-Motor (mit Ausnahme des nicht vorhandenen Rotorflusses) wurde bei der Entwicklung großer Wert darauf gelegt,



6 Beispiele des neuen Motorantriebssystems

Die folgende Tabelle zeigt die Leistungsdaten des neuen Motorantriebssystems für drei IEC-Motorbaugrößen.

Motor, Wärmeklasse F							Frequenzumrichter, 400 V				
Größe mm	P _N kW	n _N U/min	P _N kW	n _{max} U/min	η %(1/1)	M _N Nm	m kg	Typencode ACS-850-04	I _N A	Geräusch Bau- dBa gröÙe	m kg
100	4	1500	4	2250	84,3	25	22	010A-5	10,5	39	B 5
100	7,5	3000	7,5	4500	88,7	23	22	018A-5	18	39	B 5
100	13	4500	13	6000	90,5	27	22	030A-5	30	63	C 16
100	17,5	6000	17,5	6000	91,3	27	22	044A-5	44	71	C 16
160	26	1500	26	2250	91,7	165	180	061A-5	61	70	D 23
160	50	3000	50	4500	94,0	159	180	144A-5	144	65	E0 35
160	70	4500	70	5300	94,6	148	180	166A-5	166	65	E 67
280	110	1500	110	1800	96,0	700	640	260A-5	260	65	E 67
280	130	1800	130	2200	95,9	689	640	290A-5	290	65	E 67

Die vollständigen Spezifikationen sind unter www.abb.com/motors&generators aufgeführt.

die Drehmomenterzeugung durch eine auf maximales Drehmoment je Ampere (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) ausgelegte Steuerung zu optimieren. So wird sichergestellt, dass der Antriebsstrom an jedem Betriebspunkt so gering wie möglich gehalten wird. Die Steuerung ist auch in der

Antrieb für diesen Motor nicht von drehzahl-geregelten Antrieben für AMs oder PM-Motoren. Zu den Standardmerkmalen gehören die automatische Parametererkennung auf der Basis von Typenschildangaben und ein geberloser Betrieb. Der Motor benötigt keinerlei Drehzahlsensoren und bietet

dennoch eine hohe Drehzahlgenauigkeit und Drehmomentdynamik. Bei Bedarf kann der Antrieb sogar auf eine bestimmte Überlastbarkeit und zyklische Belastbarkeit ausgelegt werden.

Ein weiterer Pluspunkt ist die geringere Wärmeabgabe an benachbarte Teile, besonders in geschlossenen Schränken.

Lage, im Feldschwächungsbereich, d. h. im Drehzahlbereich oberhalb der Bemessungsdrehzahl, zu arbeiten. So kann für einen Großteil der Motorenbaugrößen eine Maximaldrehzahl erreicht werden, die bis zum 1,5-fachen über der Bemessungsdrehzahl liegt. Diese Antriebssteuerung ist eine besonders wichtige Entwicklung von ABB, durch die mit dem SynRM deutlich höhere Drehmomentdichten erreicht werden können als mit AMs. Von der Installation und vom Betrieb her unterscheidet sich der leistungselektronische

Ausblick

Da dieser Motor, ebenso wie ein PM-Motor, grundsätzlich einen Frequenzumrichter benötigt, werden für bestimmte Leistungs- und Drehzahlanforderungen passende Paarungen aus Motor und ACS-Frequenzumrichter empfohlen → 6.

Als Antwort auf die Forderungen des Marktes nach höheren Ausgangsleistungen, einer höheren Effizienz, längeren Wartungsintervallen und einer kompakteren Bauweise präsentiert ABB einen komplett

neuen Motor, der optimal für den Betrieb mit Umrichtersystemen abgestimmt ist. Eine um 20–40 % höhere Leistungsdichte im Vergleich zu einem AM, eine Rotorkonstruktion ohne Kurzschlusskäfig oder Permanentmagnete, eine geringere Baugröße, eine geringere Wärmeentwicklung und höchste Effizienz für drehzahlregelte Systeme gehören zu seinen Merkmalen. Aus einem herkömmlichen AM mit neuem Rotor in Verbindung mit einem Standardantrieb und neuer Software entsteht ein äußerst leistungsfähiges und effizientes drehzahlvariables Antriebssystem. Leistung und Effizienz sind vergleichbar mit einem PM-Motorantrieb, allerdings unter Verwendung der robusten Technologie von Asynchronmotoren. Damit kommt der Nutzer nicht nur in den Genuss der Vorteile beider Technologien, sondern kann auch eine Vielzahl zusätzlicher Vorzüge für sich beanspruchen.

Heinz Lendenmann

Reza Rajabi Moghaddam

ABB Corporate Research

Västerås, Schweden

heinz.lendenmann@se.abb.com

reza.r.moghaddam@se.abb.com

Ari Tammi

ABB Discrete Automation and Motion,

Motors & Generators

Vaasa, Finnland

ari.tammi@fi.abb.com

Lars-Erik Thand

ABB Discrete Automation and Motion,

Motors & Generators

Västerås, Schweden

lars-erik.thand@se.abb.com

Literaturhinweise

- [1] Haikola, M.: „Der Direkte Weg. Die Direct-Drive-Lösung von ABB erfüllt die Anforderungen der anspruchsvollsten Prozesse“. *ABB Technik* 4/2009: 12–15
- [2] Boglietti, A., Cavagnino, A. Pastorelli, M., Vagati, A.: „Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance“. 40th IEEE IAS Annu. Meeting, Okt. 2005, Vol. 1: 474–479
- [3] Germishuizen, J. J., Van der Merwe, F. S., Van der Westhuizen, K., Kamper, M. J.: „Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units“. IEEE IAS Annu. Meeting, Okt. 8–12, 2000, Vol. 1: 316–323

Titelbild

Das Motor- und Antriebssystem bei der beschleunigten Belastungsprüfung (HAST)