Eisenlose Permanentmagnet-Synchronmotoren

Autor(en): **Engel, Matthias / Huth, Gerhard**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **104 (2013)**

Heft 4

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856475

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eisenlose Permanentmagnet-Synchronmotoren

Geringes Aktivteilgewicht, hoher Wirkungsgrad und Vermeidung von Rastmomenten

PM-Synchronmotoren werden bei Servoantrieben und zunehmend auch bei Hauptantrieben eingesetzt. Konventionelle PM-Synchronmotoren werden mit ferromagnetischen Aktivteilen in Trommelläuferbauform ausgeführt. Dabei ist die Drehfeldwicklung im Ständerblechpaket integriert und der Läufer ist mit Seltenerdmagneten ausgerüstet. Die Ständernutung führt mit der Permanentmagneterregung zu unerwünschten Rastmomenten, die sich zwar auslegungstechnisch teilweise unterdrücken lassen, aber mit einem nutenlosen Ständer mit Luftspaltwicklung ganz vermieden werden können.

Matthias Engel, Gerhard Huth

Wenn zusätzlich zum Einsatz eines nutenlosen Ständers komplett auf ferromagnetische Werkstoffe verzichtet wird, entfallen zusätzlich zu den Nutrastmomenten auch die Eisenverluste, die mit steigender Drehzahl das thermisch zulässige Drehmoment deutlich reduzieren. Bei Anwendungen mit thermisch schwacher Ausnutzung oder solchen, die meist im Teillastbetrieb arbeiten, steigert dieser Schritt zudem die Energieeffizienz. Der Doppelspulenaktor [1, 2, 5] ist für ein solches eisenloses Motorkonzept geeignet.

Doppelspulenaktor-Motorkonzept

Der Doppelspulenaktor ist die konsequente Weiterentwicklung des Tauchspulenaktors. Der Tauchspulenaktor besteht zunächst aus einer Spule und einem in die Spule passenden Permanentmagneten, der im bestromten Zustand in Richtung der Spulenachse bewegt wird.

Aufgrund der geschlossenen Spulengeometrie können mit einem Tauchspulenaktor nur begrenzte Stellbewegungen realisiert werden. Der Übergang zum Doppelspulenaktor [1, 2] ermöglicht eine Spulenöffnung, sodass Magnete ungehindert durch die Spule geführt werden können.

Der in **Bild 1** dargestellte Doppelspulenaktor besteht aus einer Doppelspule sowie zwei axial magnetisierten Permanentmagneten, die durch die Doppelspule geführt werden können. Da die Spulenseiten der Doppelspule einen entgegengesetzten Wicklungssinn aufweisen, müssen die Permanentmagnete entgegengesetzt magnetisiert sein. Soll der Doppelspulenaktor das Grundelement eines rotierenden Aktors bilden, so sind die Permanentmagnete auf einer Kreisbahn zu führen.

Ziel ist es, einen 2p-poligen PM-Synchronmotor mit einer symmetrischen 3-strängigen Doppelspulenanordnung auszuführen. Von besonderem Vorteil wäre es, wenn die 3-strängige Doppelspulenanordnung überlappungsfrei ausgeführt werden könnte. Eine solche Doppelspulenanordnung ist möglich, wenn die Doppelspulen in Analogie zu einer Einschicht-Zahnspulenwicklung der Polzahl 2p und der Nutenzahl N = 2 x Doppelspulenzahl angeordnet werden [3, 4]. Vom Zonenplan einer gewählten Einschicht-Zahnspulenwicklung [6] kann unmittelbar auf die Doppelspulenanordnung des gesuchten Motorkonzepts geschlossen werden. In **Bild 2** ist diese Analogiebetrachtung am Beispiel der Einschicht-Zahnspulenwicklung mit der Ständernutenzahl N = 12 und der Polzahl 2p = 10 für einen Strang dargestellt.

Für das gesamte Motorkonzept ergibt sich die Überleitung entsprechend **Bild 3**. Die Anzahl der Doppelspulen für den überlappungsfreien 3-strängigen Ständer entspricht der halben Ständernutenzahl N/2 = 6, auf einen Strang entfallen zwei Doppelspulen.

Stationäres Betriebsverhalten

Bei der Modellierung kann in guter Näherung eine lineare Anordnung von

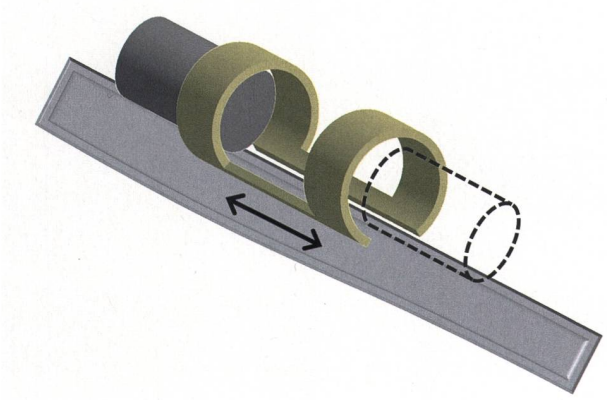


Bild 1 Grundprinzip des Doppelspulenaktors.

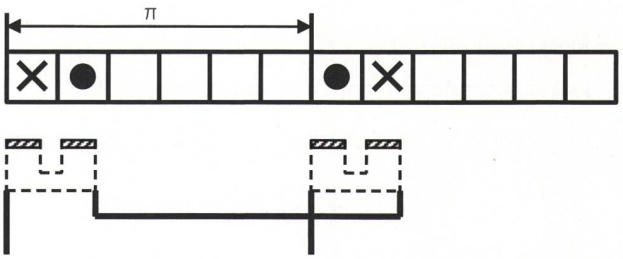


Bild 2 Überleitung von der Einschicht-Zahnspulenwicklung zur Doppelspulenanordnung am Beispiel der Ständernutenzahl N = 12 und der Polzahl 2p = 10.

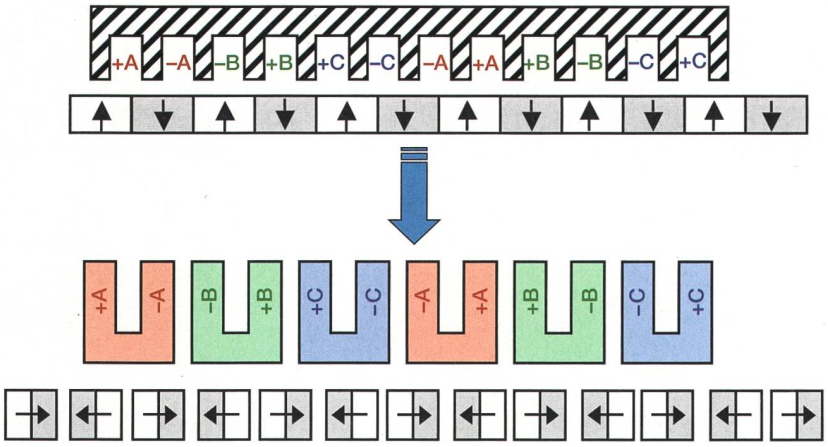


Bild 3 Bildung einer überlappungsfreien 3-strängigen Doppelspulenanordnung in Analogie zu einer Einschicht-Zahnspulenwicklung der Ständernutenzahl N = 12 und der Polzahl 2p = 10.

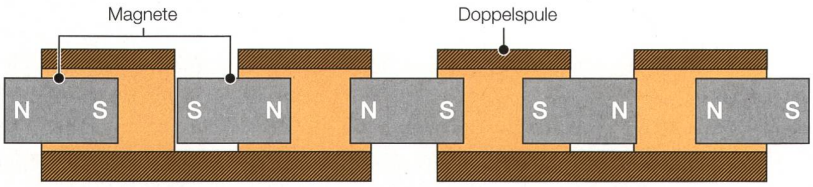


Bild 4 Lineare Anordnung von Doppelspulen und Magneten.

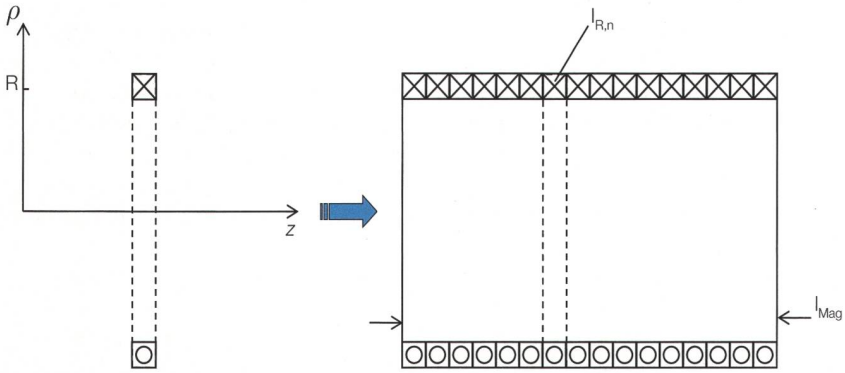


Bild 5 Ringstrom und Überlagerung zur Nachbildung eines Permanentmagneten.

Doppelspulen und Magneten entsprechend **Bild 4** unterstellt werden, da lediglich die Nahewirkung von Bedeutung ist. Für Seltenerdmagnete und Luftraum gilt eine relative Permeabilität von $\mu r = 1$.

Ausgangspunkt für die Simulation des stationären Betriebsverhaltens ist die Berechnung der permanentmagneterregten Flussdichte. Die Modellierung eines Magneten erfolgt in Form einer zylinderförmigen Ersatzspule, die von einem äquivalenten Magnetisierungsstrom durchflossen wird. Die Grösse der Ersatzspule entspricht dabei den geometrischen Abmessungen des Permanentmagneten. Jede Windung der Ersatzspule **(Bild 5)** kann als einzelner ringförmiger Strom um die z-Achse mit dem Radius R angesehen werden. Die Überlagerung aller Ringströme führt auf das Magnetfeld eines Magneten.

Die Berechnung der vollständigen magnetischen Flussdichte im umliegenden Raum eines Magneten erfolgt unter Berücksichtigung des Einflusses der jeweils rechts und links liegenden Nachbar-Magnete. Bei dieser Überlagerung sind der Magnetversatz auf der z-Achse und die Magnetisierungsrichtung zu beachten.

Das Magnetfeld bildet sich rotationssymmetrisch um die Magnetachse aus, es genügt daher die Betrachtung bei einem festen Winkel. Die Berechnung erfolgt in diskreten Schichten mit jeweils konstanter radialer Entfernung zum Magneten, in der sich die Doppelspulen relativ zu den Magneten bewegen. Für jede Wicklungslage **(Bild 6)** wird eine Schicht im entsprechenden radialen Abstand berechnet.

Eine nutzbare Kraftwirkung wird allein durch die zur Bewegungsrichtung senkrechte Komponente des permanenterregten Magnetfeldes erzielt. Es ist daher zur Drehmomentbestimmung ausreichend, die radiale Feldkomponente $B\rho$ zu betrachten. Als Beispiel hierzu ist für das

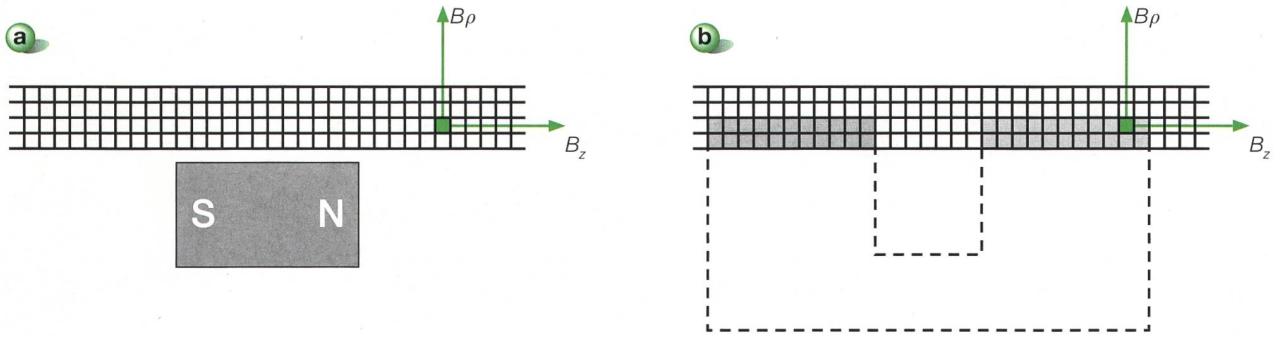


Bild 6 Betrachtung der magnetischen Flussdichte: a) über einem Permanentmagneten; b) im Leiterbereich einer Doppelspule.

nachstehend beschriebene Funktionsmuster in **Bild 7** der Verlauf der radialen Feldkomponente in Abhängigkeit der z-Koordinate sowie der vier Spulenschichten dargestellt.

Zur Berechnung der Polradspannung wird für jede einzelne Leiterposition einer Doppelspulenseite zum jeweiligen Zeitpunkt die induzierte Leiterspannung $B\rho \cdot l_L \cdot v$ bestimmt. Die aktive Leiterlänge l_L ergibt sich aus dem Umfang der jeweiligen Leiterposition unter Berücksichtigung der Doppelspulenöffnung. Durch den räumlichen Versatz der Leiterpositionen ergeben sich zeitlich verschobene induzierte Leiterspannungen. Die Leiterspannungen werden zur Gesamtspannung einer Doppelspule und dann zur Strangspannung aller an einem Strang beteiligten Doppelspulen phasenrichtig für jeden Zeitpunkt aufsummiert. Hieraus ergibt sich der zeitliche Verlauf der induzierten Strangspannungen und als Grundschwingungsanteil hieraus die Polradspannung U_p. Aus der Polradspannung U_p bestimmt sich die Spannungskonstante zu:

$$k_E = \frac{U_p}{\Omega} \quad (1)$$

Bei feldorientierter sinusförmiger Stromeinprägung mit dem Effektivwert I_1 berechnet sich damit das Luftspaltdrehmoment zu:

$$M_i = 3 \cdot k_E \cdot I_1 = k_T \cdot I_1 \quad (2)$$

Funktionsmuster

Auf der Basis des oben beschriebenen Motorkonzepts wurde das in **Bild 8** dargestellte 20-polige Funktionsmuster mit insgesamt 9 Doppelspulen gebaut. Bei einer Drehzahl von 800 U/min beträgt das Bemessungsdrehmoment 0,2 Nm. Wegen der speziellen Applikation darf die mittlere Wicklungserwärmung hierbei lediglich 10 K betragen.

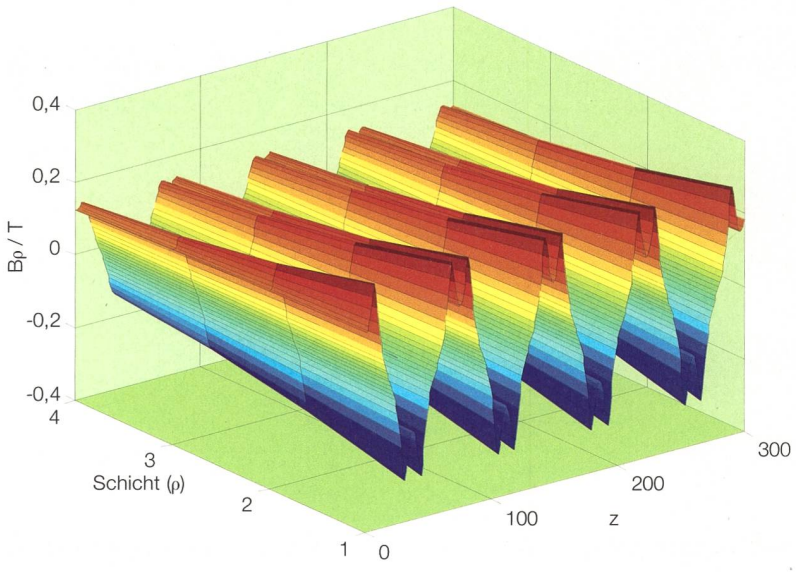


Bild 7 Verlauf der permanentmagneterregten radialen Feldkomponente Bρ des Funktionsmusters.

Die Doppelspulen des Funktionsmusters sind U-förmig ausgeführt und öffnen sich in Richtung Motorachse, sodass eine einfache Rotormontage durch Einschieben möglich ist. Der Innenradius der Doppelspulen ist um 1 mm grösser gewählt als der Aussenradius der Magnete. Nähere Angaben zum Funktionsmuster sind in der **Tabelle** zusammengestellt.

Die Auslegung des Funktionsmusters erfolgte mittels Parametervariation. Zur Unterdrückung der Spannungsharmonischen wurde die Breite der Doppelspulenseite im Verhältnis zur Magnetlänge angepasst. Hierzu wurde das Auftreten der 5. und 7. Harmonischen im Spektrum der induzierten Spannung in Abhängigkeit von Magnetlänge und Breite der Doppelspulenseite betrachtet. Für das Funktionsmuster ergibt sich unter Berücksichtigung der Spulenfertigungstechnik eine Spulenseitenbreite von rund 87 % der Polteilung. Dies führt auf einen Oberschwingungsanteil in der induzierten Spannung von weniger als 3 %.

Der Drahtdurchmesser stellt einen weiteren Optimierungsparameter dar, da mit einem grösseren Kupferquerschnitt geringere ohmsche Verluste verbunden sind. Andererseits vergrössert aber eine höhere Drahtstärke die Bauhöhe der Doppelspulen, wobei sich die oberen Lagen der Wicklung weiter von den Magneten entfernen. Hierdurch sinkt die nutzbare magnetische Flussdichte, und es kommt gegenläufig zu einer Reduzierung der Aktivteilausnutzung.

Polzahl	20
Anzahl der Doppelspulen	9
Schaltung	Stern
Mittlerer Durchmesser Magnetspur	150 mm
Remanenzinduktion Magnete/20 °C	1,41 T
Magnetdurchmesser	8 mm
Magnetlänge	15 mm
Drahtdurchmesser	0,6 mm
Windungszahl einer Spule	80
Lagenaufbau	4 x 20 Leiter
Masse einer Spulenseite (b x h)	20,6 x 2,52 mm
Strangwiderstand	1,75 Ω
Stranginduktivität	0,5 mH

Tabelle Ausführung des Funktionsmusters.

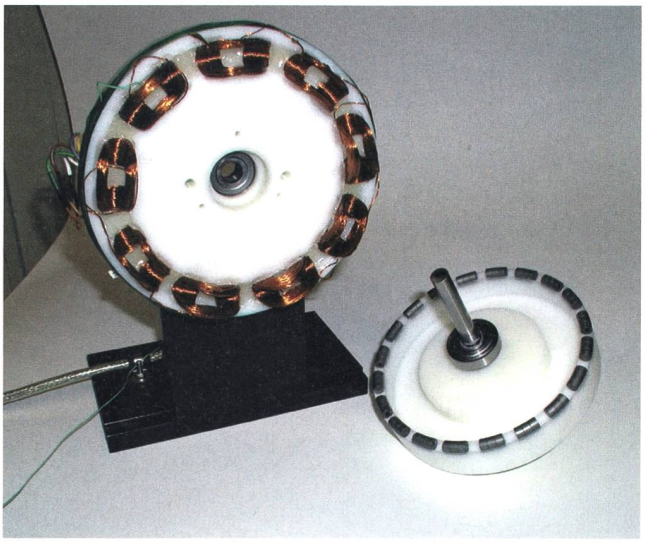
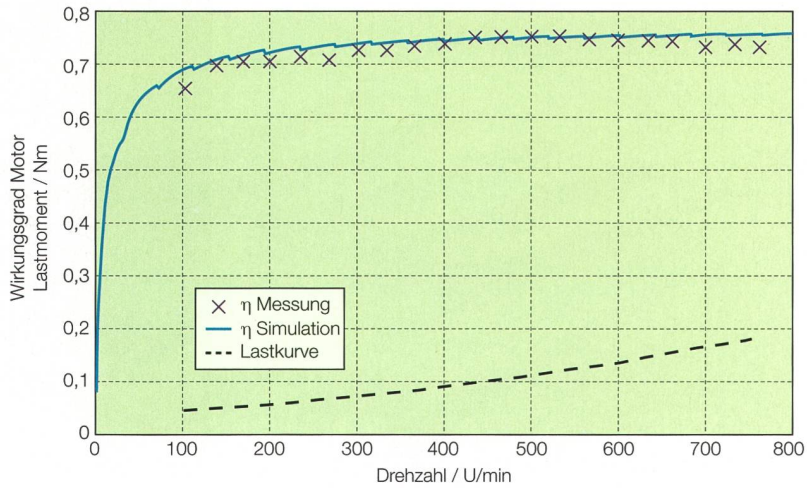


Bild 8 Komponenten eines 20-poligen Funktionsmusters.



Bilder: TU Kaiserslautern

Bild 9 Motorwirkungsgrad entlang einer quadratischen Lastkennlinie im Vergleich von Messung und Simulation.

Funktionsmustererprobung

Das für eine Zwischenkreisspannung von 24 V ausgelegte Funktionsmuster wurde an einem Single-Chip-Pulswechselrichter mit sinusförmigen Strömen betrieben. Für den feldorientierten Betrieb war zusätzlich die Integration von drei Hallsensoren im Doppelspulenständer notwendig. Mechanisch wurde das Funktionsmuster über eine Drehmomentmesswelle mit einer Belastungsmaschine gekoppelt, mit der auch ein Fremdantrieb des Funktionsmusters möglich war.

Die zeitlichen Verläufe der induzierten Spannungen bei Fremdantrieb des Funktionsmusters zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation und bestätigen die Optimierung des Funktionsmusters auf geringe Spannungswelligkeit.

Das stationäre Betriebsverhalten des Funktionsmusters wurde entlang einer quadratischen Lastkennlinie, wie sie bei Strömungsmaschinen typisch ist, berechnet bzw. gemessen. Der Motorwirkungsgrad als Ergebnis der Funktionsmustererprobung ist in Bild 9 dargestellt. Wie der Darstellung zu entnehmen ist, wird die Simulation weitgehend durch die experimentelle Erprobung bestätigt. In einem sehr weiten Drehzahlstellbereich ist der Motorwirkungsgrad praktisch konstant und beträgt in diesem Bereich rund 75 %.

Im Vergleich zum ausgeführten ersten Funktionsmuster nach Bild 8 ist noch mit einer Verbesserung des Motorwirkungsgrads zu rechnen, wenn die Doppelspulen optimiert gefertigt werden und der Doppelspulenständer abschliessend zur Verringerung der Luftreibungsverluste vergossen wird bzw. die Doppelspulen in eine Kunststoffumgebung eingespritzt werden. Unter diesen verbessernden Randbedingungen kann mit einem Motorwirkungsgrad von über 80 % gerechnet werden.

Zusammenfassung

Auf der Basis des Doppelspulenaktors können eisenlose PM-Synchronmotoren realisiert werden. Im Vergleich zum klassischen PM-Synchronmotor entfallen die Eisenverluste sowie die oft störenden Nutrastmomente. Ein überlappungsfreier Entwurf der Doppelspulen ist möglich, wenn die Doppelspulen in Analogie zu einer Einschicht-Zahnspulenwicklung angeordnet werden.

Die experimentelle Erprobung eines Funktionsmusters mit den Bemessungsdaten 0,2 Nm / 800 U/min bei einer zulässigen Wicklungserwärmung von 10 K werden im direkten Vergleich zur Simulation diskutiert. Die Simulation der induzierten Spannung und damit die Spannungs- bzw. Drehmomentkonstante sowie der Motorwirkungsgrad entlang einer quadratischen Lastkennlinie werden durch die Erprobung in guter Übereinstimmung bestätigt. Das Motorkonzept birgt jedoch noch Verbesserungspotenzial, wenn die Doppelspulen optimiert gefertigt werden und die Luftreibungsverluste durch einen Aktivteilverguss reduziert werden.

Referenzen

[1] Engel, M.; Al Khafaji, H.; Huth, G.: PM-Synchronmotoren auf der Basis des Doppelspulenaktors, VDI/ETG-Fachtagung in Böblingen 2008, Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, ETG-Fachbericht 113, S. 17–22.
[2] Huth, G.; Engel, M.: Eisenloser PM-Synchronmotor auf der Basis des Doppelspulenaktors, VDE/GMM-Fachtagung «Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2010», Würzburg, ETG-Fachbericht 124, S. 19–24.
[3] Patentschrift EP 1 858 142 A1.
[4] Patentschrift DE 10 2009013019 A1.
[5] Binder, A.: The Torus-Flux motor – a novel permanent magnet synchronous machine. Electrical Engineering, vol. 79., S. 31–38 Springer-Verlag (1996).
[6] Huth, G.: Zahnspulenwicklungen für permanent erregte AC-Servo- und Linearmotoren. Bulletin SEV/AES 17/2006, S. 36–40.

Angaben zu den Autoren

Dipl.-Ing. **Matthias Engel** studierte Elektrotechnik an der TU Kaiserslautern und war dort bis 2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik. Seit 2010 ist er Entwicklungsingenieur für direkt angetriebene PM-Windkraftgeneratoren.
Vensys Energy AG, DE-66539 Neunkirchen
m.engel@vensys.de

Prof. Dr.-Ing. **Gerhard Huth** hat seit 2001 den Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der Technischen Universität Kaiserslautern.
TU Kaiserslautern, DE-67663 Kaiserslautern
huth@eit.uni-kl.de

Résumé

Moteurs synchrones à aimant permanent sans fer

Augmentation du rendement grâce à un stator à double bobine

Dans le vaste domaine des machines de production, les moteurs synchrones à aimant permanent sont utilisés comme servomoteur et de plus en plus comme entraînement principal. Les moteurs synchrones à aimant permanent classiques sont conçus avec des parties actives ferromagnétiques situées dans un rotor cylindrique. Pour ce faire, les bobines produisant le champ rotatif sont intégrées dans la carcasse de tôle du stator et le rotor est équipé d'aimants en alliage de terre rare. L'excitation par aimants permanents et les encoches dues au feuilletage du corps de tôle du stator produisent des couples de saillance non désirés. Ces derniers peuvent être partiellement contenus en optimisant la conception et en principe évités en utilisant un stator à entrefer lisse.

Lorsque la construction n'implique aucun matériau ferromagnétique, les pertes de fer par inversion magnétique sont supprimées en même temps que les couples de saillance. Ceci permet en outre d'augmenter l'efficacité énergétique pour des applications à faible exploitation thermique ou en fonctionnement à charge partielle. Une telle conception de moteur sans fer est possible sur la base d'un stator à double bobine. No