

Permanentmagnet-Synchronmotoren in Luftspulentechnik

Autor(en): **Huth, Gerhard / Hoffmann, Martin**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **107 (2016)**

Heft 4

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-857119>

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.

Permanentmagnet-Synchronmotoren in Luftspulentechnik

Drei Motorkonzepte im Vergleich

Drehzahlvariable Antriebe mit PM-Synchronmotoren werden in vielen Produktionsmaschinen eingesetzt. Zunehmend sind integrierte energieeffiziente Systemlösungen mit anwendungsspezifisch entwickelten Antriebskomponenten gefragt. PM-Synchronmotoren mit eisenbehafteten Aktivteilen kommen hier aktuell zum Einsatz. Zusammen mit der PM-Erregung führen die Ständernuten aber zu unerwünschten Rastmomenten, die sich vermeiden lassen, wenn das Ständeraktivteil mit einer Luftspaltwicklung ausgeführt wird. Eine Weiterentwicklung ist der völlig eisenlose PM-Synchronmotor.

Gerhard Huth, Martin Hoffmann

PM-Synchronmotoren werden derzeit mit eisenbehafteten Aktivteilen ausgeführt, die das Magnetfeld führen. Das Ständerblechpaket beinhaltet die Drehfeldwicklung und der Läufer trägt meist am Luftspalt angeordnete Permanentmagnete. Im Zusammenwirken mit der PM-Erregung führen die Ständernuten zu unerwünschten Rastmomenten, die sich vermeiden lassen, wenn das Ständeraktivteil nutzenlos mit einer Luftspaltwicklung ausgeführt wird.

Eine Weiterentwicklung ist der eisenlose PM-Synchronmotor.[1–3] Hierbei entfallen zusätzlich die Ständereisenverluste, die mit steigender Drehzahl für die Absenkung der thermisch zulässigen Drehmoment/Drehzahl-Kennlinie verantwortlich sind. Bei Applikationen, die hauptsächlich im Teillastbereich arbeiten oder hohe Drehzahlen benötigen, ermöglicht dieses Konzept auch eine Steigerung der Energieeffizienz. Die Aktivteile eines solchen eisenlosen PM-Synchron-

motors beschränken sich auf eine Permanentmagnetspur im Rotor und eine Luftspulenanordnung im Ständer.[4] Je nach Applikation bietet es sich an, diese Aktivteile direkt in die jeweiligen Prozesskomponenten, zum Beispiel durch Kunststoffspritzguss, zu integrieren.

Motorkonzepte

Das Funktionsprinzip des PM-Synchronmotors in Luftspulentechnik basiert auf der Grundidee des Tauchspulenantors, bei dem ein Permanentmagnet von einer Spule umschlossen wird. Wegen der geschlossenen Spulenkontur ermöglicht der Tauchspulenantor nur eine begrenzte Stellbewegung. Für eine rotierende Bewegung muss die Spulenkontur geöffnet sein, was mit sogenannten Doppelspulen möglich ist.[5] Die Permanentmagnete sind nun einseitig zugänglich und können in ein Rotoraktivteil integriert werden. Im Vergleich zu einer zylinderförmigen Magnetgeometrie, die eine vergleichsweise grosse Spulenöffnung benötigt und die Doppelspule damit nicht optimal nutzt, ist ein quaderförmiger Magnetquerschnitt mit einer schalenförmigen Magnetkontur zu bevorzugen.[3, 6]

Motorkonzept 1 mit Doppelspulen

Bei einem 3-strängigen Wicklungsaufbau mit insgesamt S Doppelspulen bzw. $N=2 \cdot S$ Spulenseiten und der Polzahl $2p$ entspricht der prinzipielle Wicklungsaufbau dem einer in N Ständernuten untergebrachten Einschicht-Zahnspulenwicklung mit der Lochzahl q .[7, 8]

Der Wicklungsaufbau des in **Bild 1** dargestellten Motorkonzepts lässt sich von einer in 12 Ständernuten untergebrachten 10-poligen Einschicht-Zahnspulenwicklung der Lochzahl $q=2/5$ ableiten.[6]

Die Permanentmagnete des Rotors sind in Bewegungsrichtung magnetisiert. Dabei müssen die Magnete paarweise eine entgegengesetzte Magnetisierungsrichtung aufweisen. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Stromführung in den beiden Spulenseiten einer Doppelspule, die stets entgegengesetzt gerichtet ist.

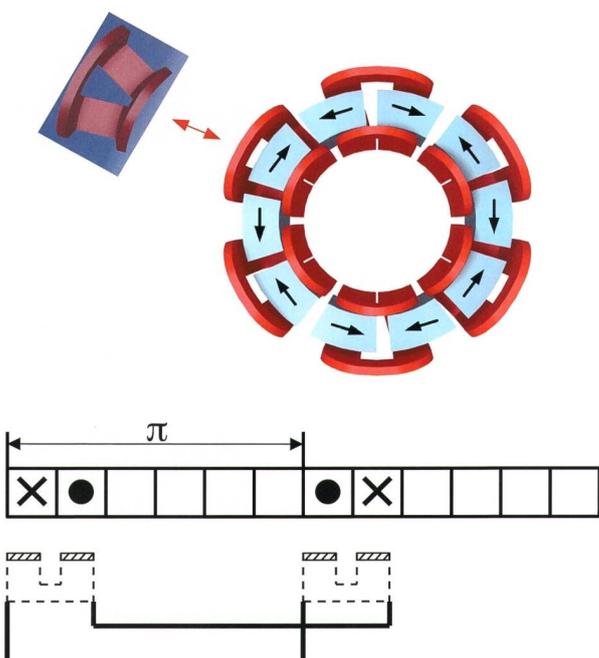


Bild 1 Motorkonzept 1 mit Doppelspulen und 10 in Umfangsrichtung magnetisierten Schalenmagneten sowie Wickelschaltbild für einen Wicklungsstrang.

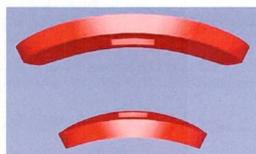


Bild 2 Motorconcept 2 mit Flachspulen und 10 in Bewegungsrichtung magnetisierten Schalenmagneten.

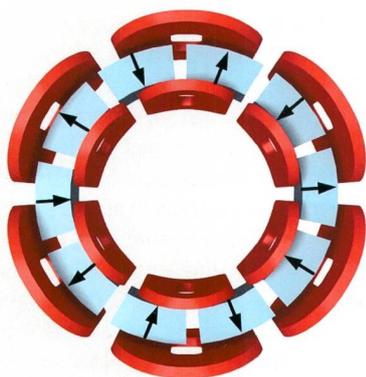


Bild 3 Motorconcept 3 mit Flachspulen und 10 in Radialrichtung magnetisierten Schalenmagneten.

Motorconzepte 2 und 3 mit Flachspulen

Die bei Motorconcept 1 eingesetzten Doppelspulen sind fertigungstechnisch anspruchsvoll, und so folgen zwei weitere Motorconzepte, bei denen eine einfachere Spulenfertigung möglich ist. Hierzu werden die Doppelspulen durch zwei gegenüberliegende Flachspulen, die eine obere und eine untere Spulenschicht bilden, ersetzt (**Bild 2**).

Wie bei Konzept 1 werden die Spulenseiten der oberen und unteren Spulenschicht mit entgegengesetzter Stromrichtung betrieben und die Magnetschalen des Rotors sind paarweise entgegengesetzt in Bewegungsrichtung magnetisiert.

Bei einem dritten Motorconcept werden die Spulenseiten der oberen und unteren Spulenschicht mit jeweils gleicher

Stromrichtung betrieben. Durch diese Änderung im Vergleich zu Konzept 2 kommen nun Magnetschalen zum Einsatz, die über eine radiale Magnetisierung verfügen (**Bild 3**).

Modellierung und Simulation des Betriebsverhaltens

Die Berechnung des Rotormagnetfeldes bildet die Basis für die Simulation des stationären Betriebsverhaltens. Ziel ist es, an jeder Luftspulenkoordinate das Magnetfeld infolge der Rotormagnete zu kennen. Unter der Randbedingung, dass sich keine ferromagnetischen Körper in unmittelbarer Umgebung befinden, gilt das Überlagerungsprinzip. Die Komplexität der Modellierung wird reduziert, wenn das rotationssymmetrische Motormodell in ein lineares Motormodell überführt wird. Wegen der bestehenden Nahewirkung zwischen Luftspulen und Permanentmagneten ist diese Vereinfachung naheliegend. [3, 6, 8]

Für die nachfolgend betrachteten Funktionsmuster nach Motorconcept 1 und 2 werden Magnete entsprechend **Bild 4** mit einer Magnetisierung in Umlaufrichtung verwendet. Bei beiden Konzepten wirkt die drehmomentbildende Magnetfeldkomponente in x-Richtung. Sie ist direkt an der Luftspulenoberfläche als Ergebnis der analytischen Feldberechnung für den betrachteten Magneten in Abhängigkeit der Koordinaten ebenfalls in **Bild 4** dargestellt.

Das Magnetfeld eines Magneten stellt die kleinste Einheit einer Rotormagnetspur dar. Unter Berücksichtigung von Magnetisierungsrichtung und Magnetposition kann nun durch Superposition für die Motorconzepte das jeweilige Magnetfeld der Rotormagnetspur berechnet werden. Da das Wirkungsprinzip des Luftspulenmotors die Nahewirkung von Luftspulen und Magneten nutzt, ist es ausreichend, bei der Magnetfeldberechnung die zu einer Luftspule direkt benachbarten Magnete zu berücksichtigen. Für das in **Bild 4** dargestellte Beispiel ist in **Bild 5** der Feldverlauf über eine Polteilung unter Berücksichtigung der Magnetspur dargestellt.

Grundsätzlich ist es ausreichend, entweder die in der Luftspulenwicklung induzierte Strangspannung oder über die Lorentzkraft das innere Drehmoment zu berechnen, da sich die hieraus ergebende Spannungskonstante k_E bzw. Drehmomentkonstante k_T bei unterstellter feldorientierter sinusförmiger Stromeinprägung mit $k_T = 3 \cdot k_E$

ineinander überführen lassen. Damit folgen für die induzierte Strangspannung:

$$U_P = k_E \cdot \Omega$$

und für das innere Drehmoment:

$$M_i = \frac{3}{\Omega} U_P I_1 = k_T I_1$$

Da sich der PM-Luftspulenmotor besonders für die Integration in den anzu-treibenden Prozess eignet, sind in diesem Fall bei der Bestimmung des Wirkungsgrades nur die Stromwärmeverluste zu

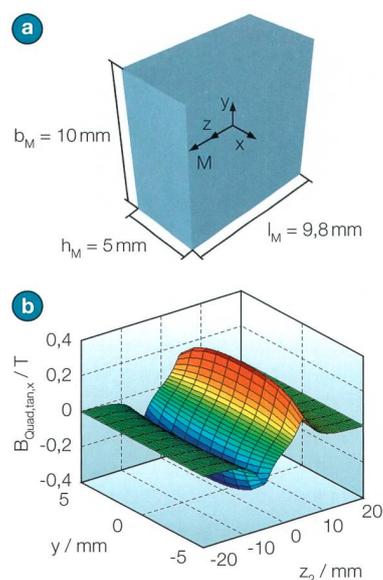


Bild 4 a) Lineare Magnetgeometrie der Funktionsmuster nach Konzept 1 und 2; b) Drehmomentbildende Magnetfeldkomponente an der Luftspulenoberfläche.

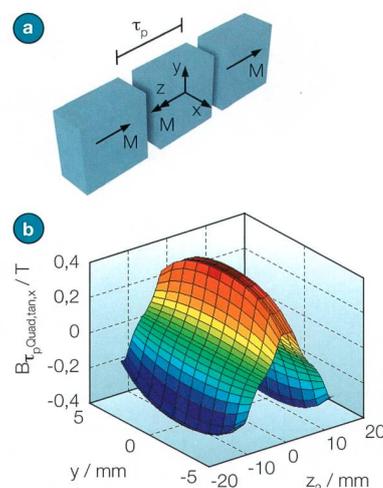


Bild 5 a) Ausschnitt aus der Magnetspur der Funktionsmuster nach Konzept 1 und 2; b) drehmomentbildende Magnetfeldkomponente an der Luftspulenoberfläche.

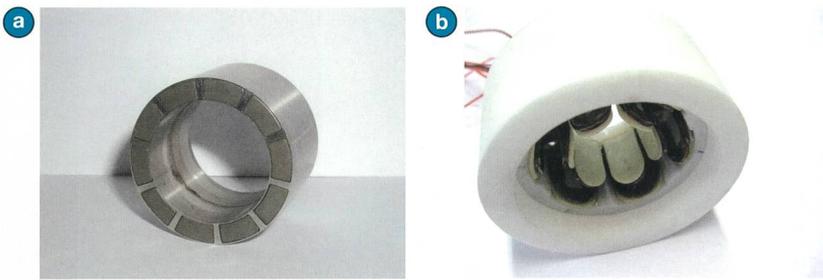


Bild 6 10-polige Rotorhülse (a) und Ständer-Kunststoffring mit eingewickelten Luftspulen (b).

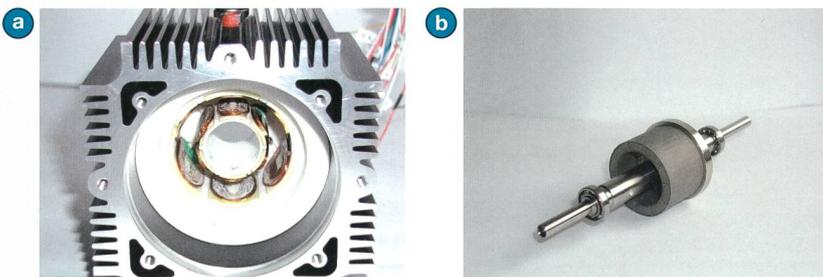


Bild 7 Gehäuse mit Ständeraktivteil (a) und Läufer mit Rotorhülse (b).

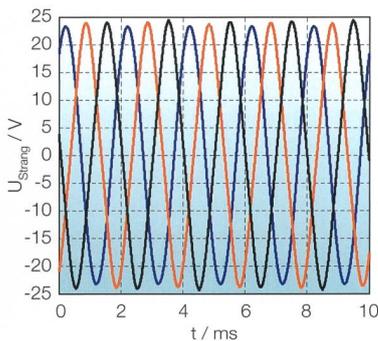


Bild 8 Induzierte Strangspannungen von Funktionsmuster 1 bei 6000 Upm.

berücksichtigen. Die Lagerung gehört zum angetriebenen Prozess und so werden die gesamten Reibungsverluste dem angetriebenen Prozess zugeordnet.

Funktionsmuster

Auf der Basis der vorgestellten drei Motorkonzepte wurde je ein Funktionsmuster für eine Textilspindelapplikation optimiert ausgelegt. Der integrierte Spindelmotor ist selbstgekühlt. Die zulässigen Aktivteilabmessungen betragen 25 mm für die axiale Länge und 50 mm für den Aussendurchmesser. Bei 15000 Upm beträgt der Leistungsbedarf für den Spinnprozess rund 70 W, die mittlere Wicklungserwärmung sollte dabei 45 K nicht überschreiten.

Um die 10-polige Rotormagnetspur in einen Versuchsträger einbauen zu können,

wurden Rotorhülsen mit Magnet-taschen aus amagnetischem Stahl hergestellt (Bild 6). Passend zur 10-poligen Magnetspur sind die Ständer mit $S=6$ Luftspulen auszuführen. Das entspricht bezüglich der Wicklungssystematik einer Einschicht-Zahnspulenwicklung mit der Ständernutzahl $N=12$ und der Lochzahl $q=2/5$. Um die sechs Luftspulen in Form von Doppelpulen oder geteilten Flachspulen in den Versuchsträger integrieren zu können, wurden die Luftspulen auf einen Spulenrahmen gewickelt und in einen Ständer-ring aus Polyamid montiert (Bild 6).

Der magnetisch wirksame Luftspalt zwischen Magnet- und Luftspulenoberfläche beträgt 1 mm, der lichte mechanische Luftspalt unter Berücksichtigung von Rotorhülse und Spulenrahmen beträgt rund 0,5 mm. Um die Aktivteile der drei Funktionsmuster unabhängig von der konkreten Applikation erproben zu

können, wurden diese unter Nutzung der mechanischen Komponenten eines Servomotors zu einem eigengelagerten Funktionsträger (Bild 7) ergänzt.

Die Erprobung der Funktionsmuster erfolgte auf einem Versuchsstand, der Drehzahlen bis 20000 Upm ermöglichte. Neben dem feldorientierten Motorbetrieb konnten die Funktionsmuster auch angetrieben werden, um die induzierte Spannung sowie die Reibungsverluste zu bestimmen. Bild 8 zeigt beispielhaft die induzierten Strangspannungen von Funktionsmuster 1, die aufgrund der manuell gefertigten Doppelpulen eine leichte Asymmetrie aufweisen.

Der zeitliche Verlauf der induzierten Strangspannungen ist praktisch sinusförmig. In Tabelle 1 sind die experimentell bestimmten Spannungskonstanten aller Funktionsmuster im Vergleich zur Simulation zusammengestellt. Die Abweichungen liegen unter 3%, was in der Grössenordnung der Magnettoleranzen liegt.

Für die Projektierung sind die S1-Kennlinie und die Wirkungsgradkennlinie von Interesse. Bei integrierten Spindelantrieben zählen die Reibverluste zum Prozess, aus diesem Grund werden bei der Wirkungsgradbestimmung einmal der innere Wirkungsgrad (ohne Reibverluste) sowie der äussere Wirkungsgrad (mit Reibverlusten) ermittelt. Für die Textilspindelapplikation ist der innere Wirkungsgrad von Interesse. In Bild 9 sind beispielhaft die S1-Kennlinien und die Wirkungsgrade für Funktionsmuster 1 im direkten Vergleich von Erprobung und Simulation dargestellt.

Im Vergleich der Funktionsmuster kann festgestellt werden, dass das Motor-konzept 1 mit Doppelpulen die höchste Aktivteilausnutzung und den besten Wirkungsgrad bietet. In Tabelle 2 sind die experimentell ermittelten inneren Betriebsgrössen der drei Konzepte für den Betriebspunkt 15000 Upm gegenübergestellt.

| Spannungskonstante k_E | Berechnet | Gemessen |
|--------------------------|-----------|----------|
| Funktionsmuster 1 | 27,5 mVs | 27,0 mVs |
| Funktionsmuster 2 | 31,1 mVs | 30,8 mVs |
| Funktionsmuster 3 | 31,5 mVs | 30,7 mVs |

Tabelle 1 Experimentell bestimmte und simulierte Spannungskonstante k_E .

| | M_i / mNm | η_i |
|-------------------|-------------|----------|
| Funktionsmuster 1 | 50 mNm | 94% |
| Funktionsmuster 2 | 47 mNm | 91% |
| Funktionsmuster 3 | 46 mNm | 90% |

Tabelle 2 Experimentell ermittelte innere Betriebsgrössen Drehmoment und Wirkungsgrad bei 15000 Upm.

Bilder: TU Kaiserslautern

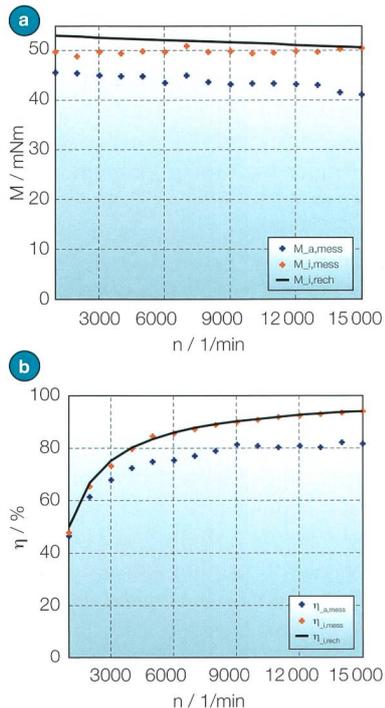


Bild 9 S1-Kennlinie (45K) und Wirkungsgrad für Funktionsmuster 1.

Die Motorkonzepte 2 und 3 unterscheiden sich lediglich in der Magnetisierungsrichtung der Magnetspur und der hieraus notwendigen Umkehrung der Stromeinprägung in oberer und unterer Flachspule. Bezüglich der Aktivteilnutzung sind beide Motorkonzepte praktisch gleich.

Zusammenfassung

PM-Synchronmotoren in Luftspulentechnik eignen sich für Applikationen, bei denen die Motorfunktion in den Prozess integriert werden soll, Nutrastrmomente störend sind, keine hohe thermische Ausnutzung bestehen darf, ein geringes Aktivteilgewicht erforderlich ist oder haupt-

sächlich ein Teillastbetrieb besteht. Insgesamt werden drei Motorkonzepte vorgestellt, für die je ein Funktionsmuster gebaut und experimentell untersucht wurde. Die Versuchsergebnisse bestätigen einerseits die Simulationen und beschreiben andererseits das Potenzial der PM-Synchronmotoren in Luftspulentechnik. Am Beispiel einer Textilspindelapplikation konnte gezeigt werden, dass mit dem Konzept vergleichsweise hohe Wirkungsgrade möglich sind.

Referenzen

- [1] M. Engel, H. Al Khafaji, G. Huth, «PM Synchronmotoren auf der Basis des Doppelspulenaktors», VDI/ETG-Fachtagung in Böblingen 2008, Elektrisch-mechanische Antriebssysteme, ETG-Fachbericht 113, S. 17–22.
- [2] G. Huth, M. Engel, «Eisenloser PM Synchronmotor auf der Basis des Doppelspulenaktors», VDE/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2010, Würzburg, ETG-Fachbericht 124, S. 19–24.
- [3] G. Huth, M. Hoffmann, «PM Synchronous Motor with Air Coil Winding based on the Double-Coil

Actuator», VDE/GMM Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2013, Nürnberg, GMM-Fachbericht 76, S. 99–104.

- [4] Patentschriften EP 1 858 142, EP 2201252, EP2053340/42.
- [5] G. Huth, M. Engel, «Eisenlose PM-Synchronmotoren», Bulletin SEV/VSE 4/2013, S. 41–44.
- [6] M. Hoffmann, «Berechnung, Auslegung und Erprobung von PM Luftspulensynchronmotoren», Dissertation an der TU Kaiserslautern, Shaker Verlag, Aachen, 2013.
- [7] G. Huth, «Zahnspulenwicklungen für permanent erregte AC-Servo- und Linearmotoren», Bulletin SEV/VSE 17/2006, S. 36–40.
- [8] M. Engel, «Eisenloser Permanentmagnet-Synchronmotor auf der Basis des Doppelspulenaktors in integrierter Anwendung», Dissertation TU Kaiserslautern, Shaker Verlag, Aachen, 2014.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. **Gerhard Huth** hat seit November 2000 den Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der Technischen Universität Kaiserslautern.

TU Kaiserslautern, DE-67663 Kaiserslautern
 huth@eit.uni-kl.de

Dr.-Ing. **Martin Hoffmann** war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der TU Kaiserslautern und ist nun Entwicklungsingenieur bei der Firma SEW Eurodrive.

Résumé

Les moteurs synchrones à aimant permanent dans un procédé à bobine à air

Comparaison de trois concepts de moteur

Les systèmes d'entraînement à vitesse variable équipés de moteurs synchrones à aimant permanent sont employés dans de nombreuses machines de production. Les solutions de système à haut rendement énergétique intégrées qui sont dotées de composants d'entraînement conçus en fonction de leurs applications ne cessent de faire l'objet de multiples demandes. Les moteurs synchrones à aimant permanent munis de parties actives en fer sont utilisés à ce propos. Toutefois, les rainures du stator conjuguées à l'excitation de l'aimant permanent génèrent des couples de saillance indésirables qu'il est possible d'éviter si la partie stator est réalisée avec un enroulement à entrefer. Le moteur synchrone à aimant permanent totalement dépourvu de fer constitue une version perfectionnée de ce système d'entraînement. Dans le cas d'applications qui fonctionnent la plupart du temps en charge partielle ou qui nécessitent des vitesses élevées, ce concept permet d'augmenter l'efficacité énergétique. Les parties actives d'un tel moteur synchrone à aimant permanent dépourvu de fer se limitent à une piste à aimant permanent dans le rotor, ainsi qu'à une disposition de bobine à air dans le stator. Selon l'application choisie, ces parties actives peuvent être directement intégrées dans les composants des procédés respectifs, et ce, notamment au moyen de la technique du moulage de matières plastiques.

No

Anzeige

Im Einsatz für die Werterhaltung von Transformatoren und Kühlsysteme.

trafopower ag / 062 858 91 91 / info@trafopower.ch / www.trafopower.ch

SGB-SMIT
 Transformatoren Schweiz AG

Power in Starkstrom

Kontakt: +41 62 858 91 00 / info@sgb-smith.ch / www.sgb-smith.ch