Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 104 (2013)
Heft: 6

Artikel: Energieeffiziente Line-Start-Synchronmotoren
Autor: Huth, Gerhard / Fischer, Ralf
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856494

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Energieeffiziente Line-Start-Synchronmotoren

Motoren mit Permanentmagneten am Luftspalt

Neben drehzahlvariablen Antrieben werden Line-Start-Antriebe weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Meist werden heute bei Line-Start-Antrieben Asynchronmotoren mit Käfigläufer eingesetzt. Da diese für die Drehmomenterzeugung auf Stromwärmeverluste im Läufer angewiesen sind, kann ihr Wirkungsgrad nur bedingt gesteigert werden – was sich besonders im unteren Leistungsbereich bemerkbar macht. Um die Energieeffizienzklasse IE4 in diesem Bereich sicher realisieren zu können, ist ein Übergang zur PM-Synchrontechnik notwendig.

Gerhard Huth, Ralf Fischer

Der PM-Line-Start-Motor verfügt über eine Permanentmagneterregung sowie über einen Anlauf- bzw. Dämpferkäfig für den Hochlauf. Nach dem Intrittfall arbeitet der Motor als PM-Synchronmotor mit einem entsprechend hohen Wirkungsgrad. PM-Line-Start-Motoren können zudem am einfachen U-f-Umrichter als drehzahlveränderbare Antriebe betrieben werden. Drehzahl- oder Rotorlagegeber erübrigen sich. So eröffnet sich eine energieeffiziente Antriebsgeneration sowohl für den Line-Start- als auch für den Umrichterbetrieb.

Die Grundidee des PM-Line-Start-Motors geht auf Entwicklungen zurück, die bereits in den 1960er-Jahren stattgefunden haben [1]. Der PM-Synchronmotor mit Anlauf- bzw. Dämpferkäfig wurde speziell für drehzahlveränderbare Mehrmotorenantriebe, wie sie zum Beispiel in der Textilindustrie zum Einsatz kommen, entwickelt. Ausgeführt wurde der PM-Line-Start-Motor bisher stets mit im Läuferblechpaket integrierten Magneten. Es ist aber auch möglich, die Magnete direkt auf dem Läuferblechpaket anzuordnen [3, 4]. Dieses alternative Motordesign [2] ergibt eine enge Teile- und Fertigungskopplung mit Käfigläufermotoren. Ein solches Design ist zum Beispiel bei moderaten Serienstückzahlen oder bei kundenspezifischen Lösungen hilfreich.

Motorkonzept

Der PM-Line-Start-Motor stellt eine Synthese aus den zwei Motorkonzepten Käfigläufermotor und PM-Synchronmotor dar. Er besteht somit aus einem klassischen Drehstromständer sowie einem Läufer mit Kurzschlusskäfig, der zusätzlich Permanentmagnete trägt. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal im Motordesign stellt die Art der Magnetanordnung dar, denn bei bestehenden Produktreihen sind die Magnete im Läuferblechschnitt integriert.

Abweichend von dieser integrierten Magnetanordnung ist, in Verbindung mit gegenfeldstabilen Seltenerdmagneten, auch eine Magnetanordnung an der Läuferoberfläche möglich. Für eine enge Teilekopplung mit bestehenden Käfigläufermotoren bietet sich ein Läuferkonzept an, bei dem der Käfigläufer durch eine einfache Weiterbearbeitung um die Luftspaltmagnete ergänzt wird. Bei der notwendigen Drehbearbeitung des Käfigläufers nach dem Druckguss wird zusätzlich zum mechanischen Luftspalt noch eine Eindrehung vorgenommen, in die die Magnetschalen eingeklebt und zur Sicherung mit einer Bandage versehen werden. Zur Reduzierung der Rastmomente können die Magnetschalen zusätzlich in Achsrichtung gestaffelt aufgebracht werden (Bild 1).

Durch das zusätzliche Abdrehen des Läuferpakets um die Stärke von Magnetschale und Bandage geht der obere Teil der Käfigstäbe verloren und je nach Läufernutgeometrie sind die Nuten geöffnet. Wird unter Berücksichtigung dieser geplanten Nachbearbeitung des Läufers eine entsprechend angepasste Läufernutform [5] gewählt, so ist dieser Nachteil vermeidbar. Will man auf das zusätzliche Abdrehen verzichten, kann natürlich auch ein optimiert ausgelegter Läuferblechschnitt verwendet werden.

Bild 1 PM-Line-Start-Läufer mit Luftspaltmagneten ohne Bandage.

Simulation von Betrieb und Hochlauf

Um PM-Line-Start-Motoren mit am Luftspalt angeordneten Seltenerdmagneten zu optimieren, muss das synchrone Betriebsverhalten simuliert werden, wobei der Motor in guter Näherung als Vollpol-Synchronmaschine modelliert werden kann.

Für die Auslegung von PM-Line-Start-Motoren ist die Simulation des transienten Hochlauf- und Intrittfallvorgangs unerlässlich, da die Auslegungsziele hohe Energieeffizienz und robustes Intrittfallverhalten konkurrierend sind.

Der PM-Line-Start-Motor mit Luftspaltmagneten ist dafür durch die Überlagerung der Teilfunktionen PM-Synchronmotor und Käfigläufermotor zusammen mit dem mechanischen Wellenstrang über seine Differenzialgleichungen zu beschreiben.

Funktionsmuster

Das Funktionsmuster wurde durch Umbau eines handelsüblichen 4-poligen 1,5-kW-Käfigläufermotors der Energieeffizienzklasse IE2 erstellt. Die Auslegung erfolgte so, dass einerseits ein robustes Intrittfallverhalten bei linearer Lastkennlinie sowie einem Schwungmassenverhältnis von $J_{fremd}/J_{eigen} \leq 5$ besteht und andererseits die angestrebte Energieeffizienzklasse IE4 sicher erreicht wird. Ein sicherer Intrittfall von hohen Fremdschwungmassen geht stets zulasten der Energieeffizienz und umgekehrt. Über die Wicklungsauslegung ist ein entsprechender Kompromiss zu finden. Unabhängig von der konkreten Wicklungsauslegung ist hingegen der generatorische Bremssattel der PM-Synchronmotorfunktion im Bereich des asynchronen Hochlaufs. Bei ungünstiger Konstellation kann der Bremssattel den Hochlauf behindern bzw. kann der Hochlaufvorgang am Bremssattel enden [7]. Ein ungestörter Hochlauf unter Berücksichtigung der Lastkennlinie ist somit ein weiteres Auslegungskriterium, das durch die transiente Simulation des Hochlaufvorgangs sichergestellt werden kann.

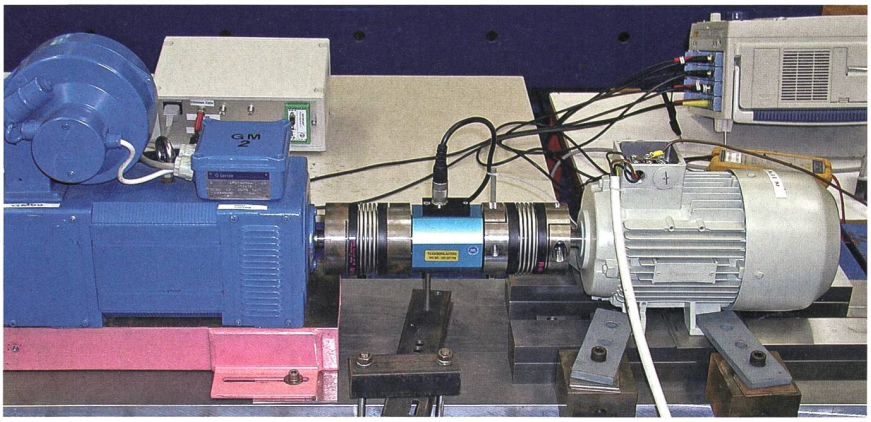


Bild 2 Versuchsaufbau zur Erprobung des Funktionsmusters mit der Lastmaschine (links), dem Prüfling und der dazwischenliegenden Drehmomentmesswelle.

Schliesslich muss bei der Auslegung auch sichergestellt werden, dass das Magnetmaterial beim bestimmungsgemässen Betrieb nicht irreversibel entmagnetisiert wird. Bei der transienten Simulation ist daher auch das Luftspaltfeld im Magnetbereich zu berechnen und zu kontrollieren, ob die gewählte Magnetqualität in Verbindung mit der Motorauslegung ausreichend ist.

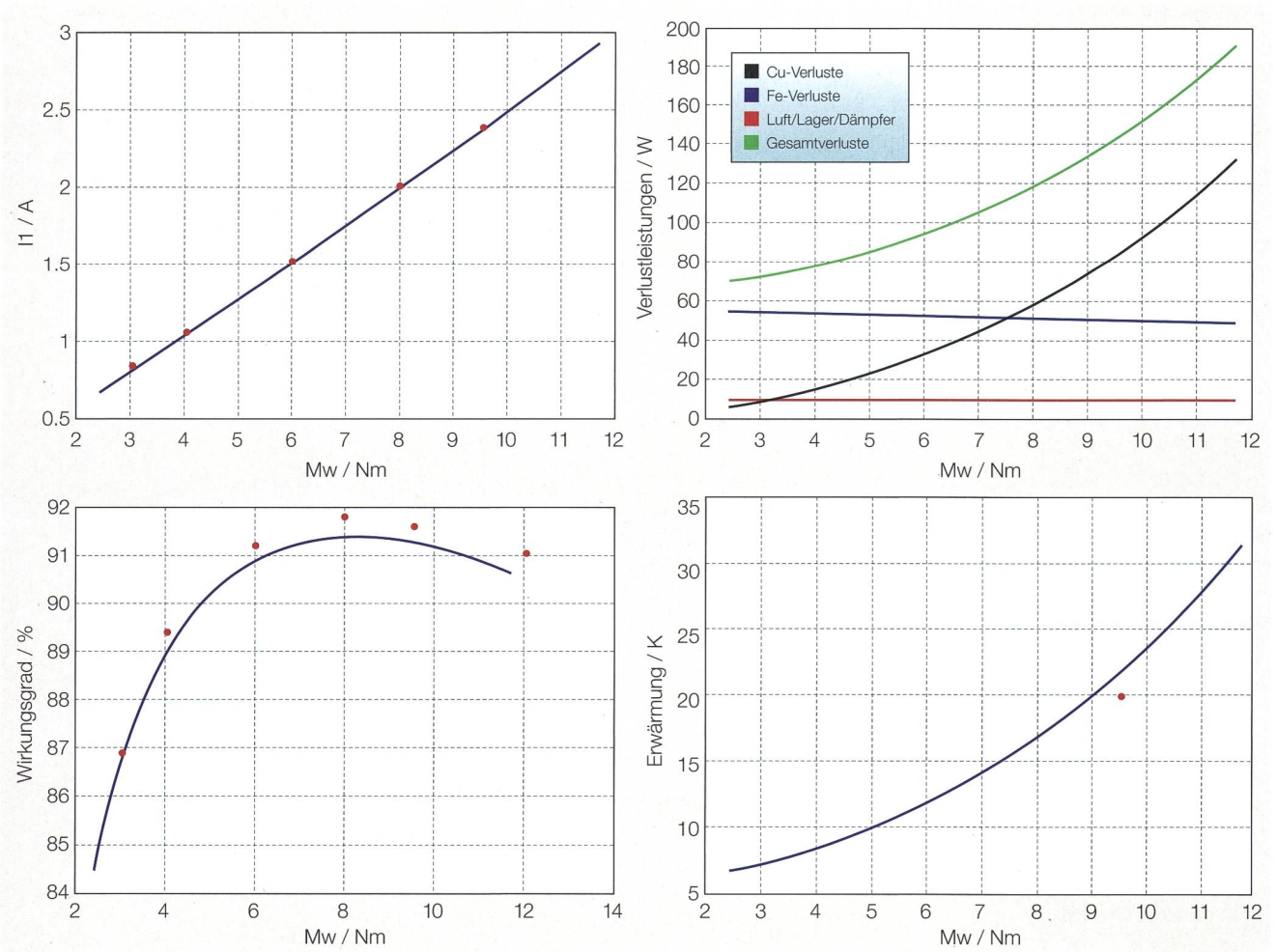


Bild 3 Synchrone Betriebsgrössen des Funktionsmusters im Vergleich Simulation (blaue Linie) und Messung (rote Punkte).

Das Funktionsmuster wurde so ausgelegt, dass es beim Einschalt-, Hochlauf- und Intrittfallvorgang sicher zu keiner irreversiblen Entmagnetisierung kommt. Beschrieben wird das Funktionsmuster durch die in der Tabelle zusammengestellten Auslegungs- und Aktivteildaten.

Bemessungspunkt	**– Leistung** **– Drehzahl** **– Spannung** **– Strom** **– Wirkungsgrad**	**1,5 kW** **1500 1/min** **400 V / 50 Hz / Y** **2,4 A** **91,5%**
Ständer-/Läufernutzzahl	–	36 / 28
Blechsorte	–	M530-50A
Ständeraussen Ø	mm	135
Bohrungs Ø	mm	82,5
Blechpaketlänge	mm	125
Strangwindungszahl	–	282
Magnetschalenhöhe	mm	2
Luftspalt + Bandage	mm	0,8
Polbedeckungsfaktor	–	0,75
Magnetmaterial	–	VD 677 HR

Tabelle Zusammenstellung der Auslegungs- und Aktivteildaten des Funktionsmusters.

Funktionsmustererprobung

Der gewählte Versuchsaufbau nach Bild 2 ermöglicht sowohl die stationäre als auch die transiente Erprobung. Der anzutreibende Prozess wird durch eine variable Schwungmasse und eine Gleichstrommaschine nachgebildet. Bei transienten Messungen wird die Gleichstrommaschine als Widerstandsbremse betrieben, sodass eine lineare Lastkennlinie nachgebildet wird.

Die stationären synchronen Betriebsgrössen Strangstrom, Wirkungsgrad, Verlustleistungen und Wicklungserwärmung sind in Bild 3 in Abhängigkeit des Lastzustandes im direkten Vergleich von Simulation und Messung dargestellt. Wie den Darstellungen zu entnehmen ist, kann die Modellierung als praxistauglich bewertet werden. Durch die Auslegung mit einem Leistungsfaktor nahe 1 können die Stromaufnahme und damit die Kupferverluste deutlich limitiert werden, und es wird ein Wirkungsgrad im Bemessungspunkt von über 91 % erreicht.

Wie die Darstellung der Einzelverluste in Bild 3 verdeutlicht, besteht durch die Verwendung einer besseren Elektroblechqualität sogar noch Wirkungsgradpotenzial. Mit einem Wirkungsgrad von über 91 % wird der Grenzwirkungsgrad für IE4 (1,5 kW / 88,1 %) deutlich überschritten. Erkennbar ist auch die für Effizienzklassemotoren typische geringe Ausnutzung der Wärmeklasse, denn im Bemessungspunkt beträgt die mittlere Ständerwicklungserwärmung lediglich rund 20 K. Damit wäre es nach Bild 3 sogar möglich, mit dem Funktionsmuster die nächste Normleistung von 2,2 kW in Effizienzklasse IE4 zu realisieren.

Neben der Simulation der Einschaltstösse in Netz und Wellenstrang und der Beurteilung der Magnetbeanspruchung in der Entwicklungsphase des PM-Line-Start-Motors dient die transiente Simulation primär der Berechnung der Intrittfallgrenze. Diese beschreibt das maximal mögliche Lastmoment bei Zugrundelegung einer zum Beispiel linearen oder quadratischen Lastkennlinie, das bei einer bestimmten Fremdschwungmasse noch einen Intrittfall ermöglicht. Für das Funktionsmuster ist in Bild 4 die berechnete Intrittfallgrenze für den Kaltstart im direkten Vergleich zu einigen Messungen dargestellt.

Die angestrebte Auslegung für $J_{fremd}/J_{eigen} \leq 5$ führt bei einem Bemessungsdrehmoment von rund 9,5 Nm nach Bild 4 auf das gewünschte robuste Intrittfallverhalten. Zur Kontrolle der simulierten Intrittfallgrenze sind in Bild 4 zwei Messungen in unmittelbarer Nähe der Intrittfallgrenze dargestellt. Die Messung dicht unterhalb der Intrittfallgrenze ($W = 12$ Nm, $J_{fremd}/J_{eigen} = 14$) führt zum erfolgreichen Intrittfall, bei der Messung direkt über der berechneten Intrittfallgrenze ($W = 13$ Nm, $J_{fremd}/J_{eigen} = 14$) kommt es zu keinem Intrittfall.

Bilder: TU Kaiserslautern

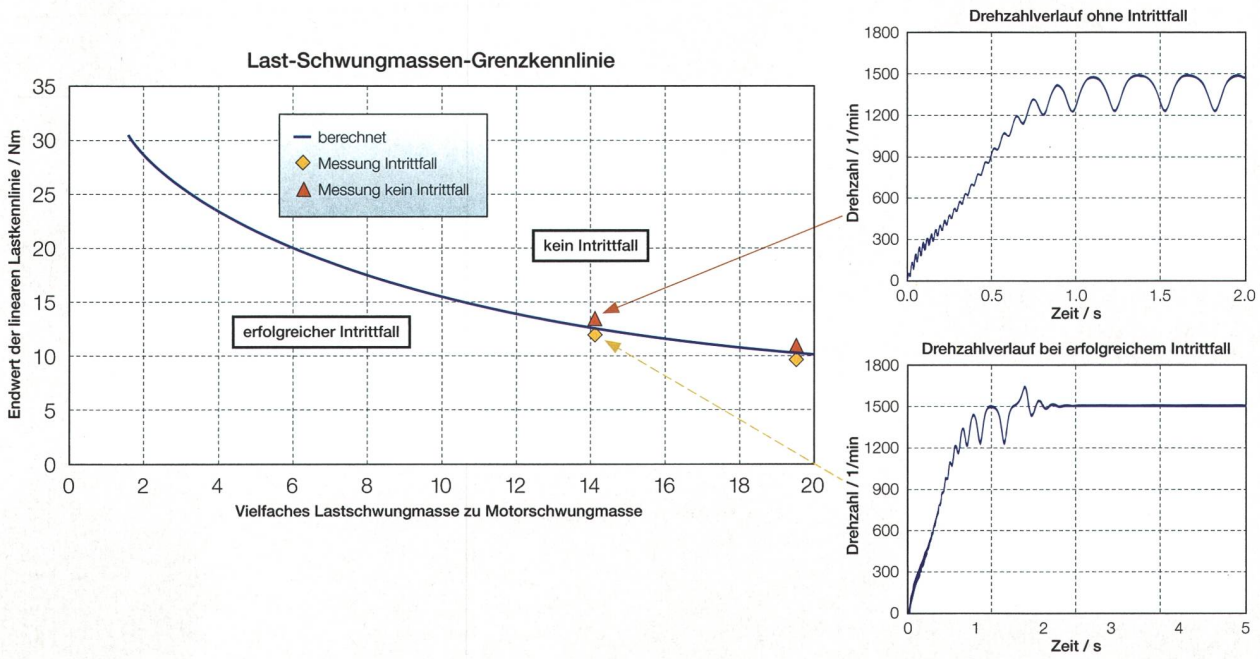


Bild 4 Intrittfallgrenze des Funktionmusters für den Kaltstart und Bemessungsspannung 400V / 50 Hz bei linearer Lastkennlinie.

Das Funktionsmuster hält damit die Zielvorgaben robuster Intrittfall bei Einhaltung von Effizienzklasse IE4 optimal ein. Eine eventuelle irreversible Entmagnetisierung der SE-Magnete kann einfach anhand des zeitlichen Verlaufs der Polradspannung im Vergleich Erstmessung zur Messung nach Abschluss der Erprobung überprüft werden. Beim Funktionsmuster konnte keine irreversible Entmagnetisierung festgestellt werden.

Fazit

PM-Synchronmotoren mit Anlauf- bzw. Dämpferkäfig gehen auf Entwicklungen zurück, die bereits in den 1960er-Jahren für das Segment der drehzahlvariablen Mehrmotorenantriebe stattgefunden haben. Diese bisher oft als Nischenprodukt betrachtete Motorausführung gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie einerseits line-start-fähig ist und andererseits für hohe Wirkungsgrade (IE4 und besser) bemessen werden kann.

Statt die Magnete wie bisher in den Läuferblechschnitt zu integrieren, werden in der hier vorgestellten Lösung für den unteren Leistungsbereich gegenfeldstabile Seltene-Erde-Luftspaltmagneten eingesetzt. Das Motorkonzept unterstützt eine enge Kopplung zur Käfigläuferfertigung. Neben der Simulation des stationären synchronen Betriebs ist für die Auslegung von PM-Line-Start-Motoren auch die Simulation des Einschalt-, Hochlauf- und Intrittfallvorgangs notwendig, da die Auslegungsziele hohe Energieeffizienz und robustes Intrittfallverhalten konkurrierend sind.

Am Beispiel eines 4-poligen Funktionsmusters mit der Bemessungsleistung 1,5 kW wird exemplarisch gezeigt, dass die Effizienzklasse IE4 bei akzeptablem Intrittfallverhalten realisiert werden kann und sogar das Potenzial zur Leistungssteigerung von 1,5 kW auf die nächste Normleistungsstufe von 2,2 kW besteht.

Résumé

Les moteurs synchrones à haut rendement énergétique de type démarrage en ligne

Des moteurs dotés d'aimants permanents à l'entrefer

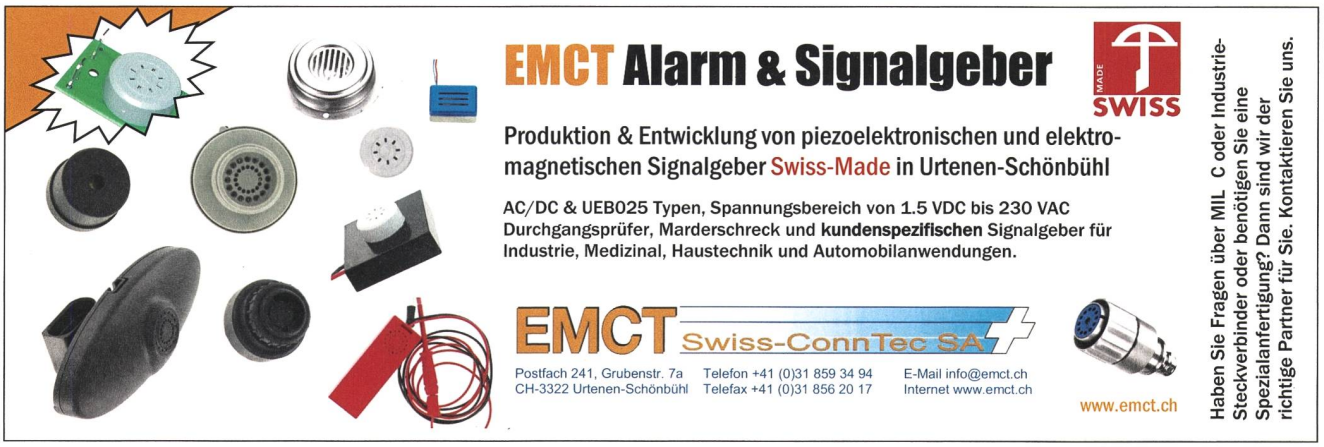
Les moteurs synchrones à aimants permanents dotés d'une cage de démarrage ou d'amortissement trouvent leur origine dans plusieurs développements qui ont été mis au point dans les années 1960 pour le segment des propulsions à plusieurs moteurs à vitesse variable. Souvent considérés jusqu'à présent comme un produit de niche, ces types de moteur ne cessent de gagner en importance pour deux raisons : d'une part, ils sont capables d'assurer un démarrage en ligne et, de l'autre, ils peuvent être dimensionnés pour des rendements élevés (IE4 et plus). À la différence du type de rotor actuellement courant qui dispose de plusieurs aimants intégrés dans sa coupe de tôle, une solution envisageable en lien avec des aimants en terres rares résistants au contre-champ est proposée pour la plage de puissances inférieure avec des aimants à l'entrefer. Ce concept de moteur prend en charge un couplage étroit destiné à la réalisation de rotors à cage. Outre la simulation du fonctionnement synchrone stationnaire, celle des processus de démarrage, de lancement et d'accrochage est également nécessaire au dimensionnement des moteurs à aimants permanents de type démarrage en ligne étant donné que les objectifs d'une efficacité énergétique élevée et d'un comportement d'accrochage solide présentent un intérêt concurrentiel. Le concept est illustré par un exemple de modèle fonctionnel quadripolaire disposant d'une puissance assignée de 1,5 kW dont la simulation et la mesure font l'objet d'une comparaison directe. Cet exemple indique non seulement que la classe d'efficacité IE4 peut être obtenue en cas de comportement d'accrochage acceptable, mais aussi que la puissance est susceptible de passer de 1,5 kW au prochain niveau de puissance normalisée équivalant à 2,2 kW. No

Referenzen

[1] Volkroth W.: Polradspannung, Reaktanzen und Ortskurve des Stromes der mit Dauermagneten erregten Synchronmaschine, ETZ Bd. 83, 1962, Heft 16, S. 517–522.
[2] Fischer R.; Huth G.: Betriebsverhalten von PM-Line-Start-Motoren mit am Luftspalt angeordneten Magneten, Internationaler ETG-Kongress 2011, Würzburg, Paper 5.4.
[3] Möller G.: Betriebsverhalten permanenterregter Synchronmotoren mit Luftspaltmagneten, Diss. Universität Hannover 1988.
[4] Huth G.: Nutrastung von permanentmagneterregten AC-Servomotoren mit gestaffelter Rotoranordnung, Electrical Engineering, Archiv für Elektrotechnik 78 (1996) S. 391–397.
[5] Patentschrift DE102009060438.
[6] Huth G.: Beschreibung der transienten Stromverdrängung in Käfigläuferstäben über numerisch bestimmte Ersatznetzwerke, Archiv für Elektrotechnik 70 (1987) S. 31–37.
[7] Honsinger V. B.: Permanent Magnet Machines: Asynchronous operation, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, Nr. 4 1980.

Angaben zu den Autoren

Dr.-Ing. **Ralf Fischer** studierte bis 2008 Wirtschaftsingenieurwesen in der Fachrichtung Elektrotechnik an der TU Kaiserslautern, bis 2012 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der TU Kaiserslautern, Promotion April 2012. Seit Mai 2012 ist er als Entwicklungsingenieur bei der Siemens AG in Nürnberg tätig.
Siemens AG, 90439 Nürnberg, ralf.fischer@siemens.com

Prof. Dr.-Ing. **Gerhard Huth** studierte an der Universität Hannover Elektrotechnik und promovierte anschliessend am Institut für elektrische Maschinen und Antriebe derselben Universität. Von 1986 bis 2000 war er Mitarbeiter der Siemens AG, wo er im Bereich der drehzahlveränderbaren Antriebe zunächst als Entwicklungsingenieur und anschliessend in den Positionen Entwicklungsleiter, Technischer Leiter und Werksegmentleiter tätig war. Seit November 2000 hat er den Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme der Technischen Universität Kaiserslautern.
TU Kaiserslautern, DE-67663 Kaiserslautern
huth@eit.uni-kl.de

Anzeige