e&i

elektrotechnik und informationstechnik **heft 3.2011**

OVE Verbands-zeitschrift

THEMENSCHWERPUNKT

Elektrische Maschinen I

PRAXIS + WISSEN

Überspannnungsschutzgeräte Typ 1 – Funkenstrecke oder Varistor?

INTERVIEW

mit VDir. Ing. Erwin Toplak, Kapsch TrafficCom AG

ZUR HANNOVER MESSE 2011

Traktionssysteme Austria GmbH
Brown-Boveri-Straße 1
2351 Wiener Neudorf, Österreich
Tel.: 02236 8118 - 0
Fax: 02236 8118 - 237
e-Mail: office@traktionssysteme.at

traktionssysteme austria

SpringerWienNewYork

P.b.b. Erscheinungsort Wien, Verlagspostamt 1201 Wien, **Zulassungsnummer: 02Z031416M**

Elektrotechnik & Informationstechnik (2011) 128/3: 68–74. DOI 10.1007/s00502-011-0809-7

Sensorloser Betrieb von PM-Außenläufermaschinen mit konzentrierten Wicklungen

F. Demmelmayr, M. Schrödl OVE, A. Eilenberger OVE

Der vorgestellte Antrieb mit Permanentmagn eterregter Synchronmaschine (PSM) zeichnet sich durch hohes Drehmoment pro Volumen, hohe Wirkungsgrade bis weit in den Feldschwächbereich und Dauerkurzschlussfestigkeit aus. Nach einem Überblick zur Auslegung der Maschine wird die sensorlose Regelung vorgestellt. Diese eignet sich für Überlast bis dreifachen Dauerstrom im gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand. Die INFORM-Ortskurven (**I**ndirekte **F**lusserfassung durch **O**nline-**R**eaktanz**m**essung) zur Beurteilung der Sensorlos-Fähigkeit veranschaulichen dieses Verhalten. Die implementierte Regelstruktur und Messungen von Wirkungsgrad und Drehmoment des Antriebs werden präsentiert. Dieser Bericht stellt zudem Berechnung, Simulation und Messungen zur Kurzschlussfestigkeit dar.

Schlüsselwörter: sensorlose Regelung; Permanentmagnet-Synchromaschine; elektrischer Traktionsantrieb

Sensorless operation of outer-rotor permanent magnet drives with concentrated windings.

*A drive with permanent magnet synchronous machine (PSM) is presented, which is characterized by a high torque per volume ratio, high efficiency up to wide field weakening range and short-circuit-strength. The construction of the machine contains analytical calculation and numerical simulation of the magnetic behaviour. The used sensorless control method, which works up to three-times rated current down to standstill, is shown. The depicted „Characteristic INFORM curves" (**I**ndirect **F**lux detection by **O**nline **R**eactance **M**easurement) illustrate the sensorless position control capability. Furthermore, the implemented control structure and efficiency and torque measurements of the drive are presented. Calculation, simulation and measurements of the short-circuit-behaviour are also discussed in this paper.*

Keywords: sensorless control; permanent magnet synchronous machine; electric traction drive

Eingegangen am 6. Oktober 2010, angenommen am 18. Jänner 2011
© Springer-Verlag 2011

1. Einleitung

Durch hohen Wirkungsgrad bei kompaktem Bauraum gewinnen PSM an steigender Bedeutung in Industrie und Traktionsanwendungen. Die vektororientierte Regelung dieser Maschinen setzt die Kenntnis der aktuellen Rotorposition voraus. Um ohne Lagegeber auszukommen und den damit verbundenen Nachteilen wie schlechte Verfügbarkeit und Fehleranfälligkeit aus dem Weg zu gehen, werden sensorlose Positionserkennungsmethoden verwendet. Das hier vorgestellte Konzept nutzt das INFORM-Verfahren im Stillstand und bei niedrigen Drehzahlen sowie ein EMK-Verfahren bei höheren Geschwindigkeiten.

Die Ausführung des Antriebs als Außenläufer kommt vor allem bei getriebelosen Direktantrieben zum Einsatz. Konzentrierte Zahnspulenwicklungen eröffnen hohes Automatisierungspotential in der Fertigung.

2. Auslegung der PSM

2.1 Anforderungen

Die vorgestellte PSM ist für eine Traktionsanwendung ausgelegt.

Anforderungen laut Tabelle 1 hinsichtlich Bauraum, mechanischer Daten und Pol/Nutenzahl sind zu erfüllen.

Auf den Traktionsmotor können im Betrieb hohe Beschleunigungskräfte wirken. Die magnetischen Eigenschaften dürfen auch bei mechanischer Zerstörung der Dauermagnete nicht beeinträchtigt werden. Der Rotor wird daher mit vergrabenen Magneten in Flusskonzentratoranordnung ausgeführt.

Tabelle 1. Spezifikationen des Antriebs

Außendurchmesser	400 mm
Aktive Eisenlänge	50 mm
Nenndrehzahl	450 U/min
Dauermoment bei Nenndrehzahl	350 Nm
Nennleistung	16,5 kW
Polpaarzahl	15
Nutanzahl	36

Die Statorzähne weisen parallele Flanken auf, um maschinell hergestellte Zahnspulenwicklungen (Abb. 1) einfach auf das fertige Statorblechpaket montieren zu können. Die konzentrierten Wicklungen erlauben sehr kompakte Wickelköpfe und damit eine möglichst geringe Maschinenlänge. In Hinblick auf geringes Nutrastmoment wurde eine Bruchlochwicklung mit 36 Zähnen bei 30 Polen gewählt. Die aktive Eisenlänge beträgt 50 mm bei einem Rotoraußendurchmesser von 400 mm.

Demmelmayr, Florian, Dipl.-Ing., Schrödl, Manfred, O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr., Eilenberger, Andreas, Dipl.-Ing. Dr., Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 25-29, 1040 Wien, Österreich (E-Mail: florian.demmelmayr@tuwien.ac.at)

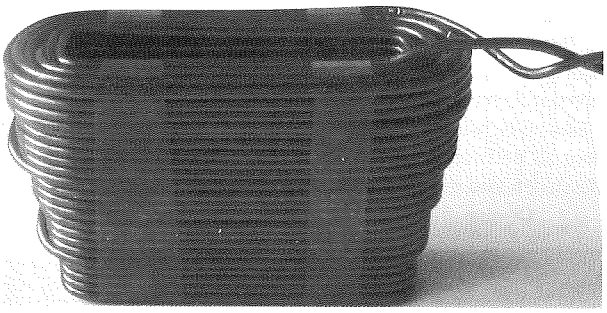


Abb. 1. Spulenausführung als konzentrierte Wicklung

2.2 Maschinengeometrie

Nach der Dimensionierung der Maschine mittels analytischer Berechnung erfolgte eine Simulation mittels des Finite Elemente Tools „Maxwell 12.2" zur magnetischen Optimierung der Maschinengeometrien.

Als Ergebnis der numerischen Berechnung ist die Flussdichte im Stator bei Nennstrom in q-Richtung in Abb. 2 dargestellt.

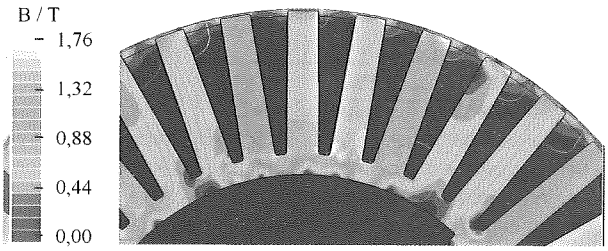


Abb. 2. Flussdichte im Stator bei Nennstrom in q-Richtung und Dauermagnet Erregung mit NdFeB-Magneten (Rotor nicht in der Zeichnung dargestellt)

Ziel der Simulation war zudem die Optimierung der Drehmomentausbeute bei möglichst geringem Rastmoment. Die Ergebnisse aus analytischer Berechnung und numerischer Simulation führten so zur realisierten Motorgeometrie. Abbildung 3 zeigt den Blechschnitt des Stators.

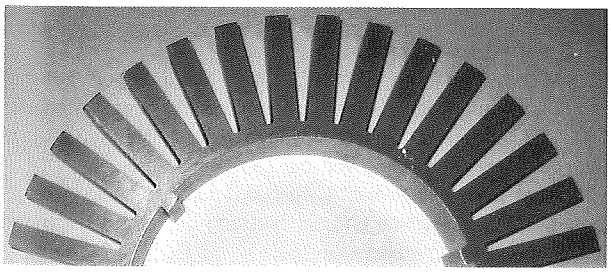


Abb. 3. Statorblechschnitt

2.3 Verschaltung

Die Wicklung des Antriebs wurde mittels des Tingleyschemas (*Tingley, 1915*) entwickelt. In Abb. 4 werden die Verhältnisse innerhalb einer Urwicklung betrachtet. Der Winkel zwischen zwei benachbarten Nuten entspricht einer Nutteilung und besteht aus fünf Rechtecken.

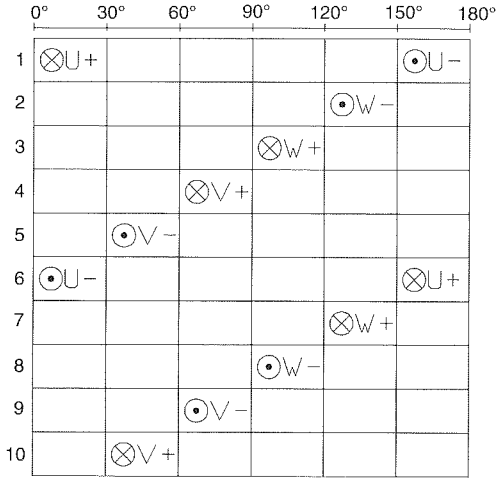


Abb. 4. Tingleyschema der Urwicklung

Die Wicklung wird als 6-Zonen-Einschichtwicklung ausgeführt. Es ergibt sich eine Zonenbreite von 300°.

2.4 Kurzschlussfestigkeit

Die Kurzschlussfestigkeit ist vor allem bei Traktionsanwendungen ein entscheidendes Kriterium für die Auslegung eines Antriebs. Dabei muss ein Wicklungskurzschluss auf Dauer in jedem Betriebsfall zulässig sein. Dies erfordert eine entsprechende Auslegung der Induktivitäten in Längs- (d) und Querachse (q).

Nachfolgende Berechnungen basieren auf Veröffentlichungen (*Kleinrath, 2006*) und (*Eilenberger et al., 2009*). Die normierte, komplexe Statorspannungsgleichung einer PSM im rotorfesten dq-Koordinatensystem kann dargestell werden mittels

$$\underline{u}_{s,dq} = r_s \underline{i}_{s,dq} + j\omega \underline{\psi}_{s,dq} + \frac{d\underline{\psi}_{s,dq}}{d\tau}. \qquad (1)$$

Wobei r_s den Statorwiderstand, $\underline{i}_{s,dq}$ den komplexen Statorstrom, ω die elektrische Winkelgeschwindigkeit, $\underline{\psi}_{s,dq}$ die komplexe Statorflussverkettung und τ die Zeit repräsentieren. Die Größen werden jeweils in normierter Darstellung betrachtet (*Kovacs, 1984*).

Die komplexe Statorflussverkettung einer PSM ist gegeben durch

$$\underline{\psi}_{s,dq} = (l_{s,d} i_{s,d} + j l_{s,q} i_{s,q}) + \underline{\psi}_{PM}, \qquad (2)$$

wobei $l_{s,d}$ und $l_{s,q}$ die Induktivitäten in d- und q-Richtung beschreiben und ψ_{PM} die Flussverkettung der Dauermagnete (mit $\underline{\psi}_{PM} = \psi_{PM,d} = \psi_{PM}$).

Im stationären Zustand verschwindet der letzte Term von (1), und die Statorspannung kann zudem in folgende Komponenten aufgespaltet werden

$$u_{s,d} = r_s i_{s,d} - \omega l_{s,q} i_{s,q}, \qquad (3)$$

$$u_{s,q} = r_s i_{s,q} + \omega l_{s,d} i_{s,d} + \omega \psi_{PM}. \qquad (4)$$

Im Kurzschlussfall werden diese beiden Spannungen Null, und der stationäre Statorkurzschlussstrom in d- und q-Richtung berechnet sich zu

$$i_{s,d,sc} = -\frac{\omega^2 \psi_{PM} l_{s,q}}{r_s^2 + \omega^2 l_{s,d} l_{s,q}}, \qquad (5)$$

$$i_{s,q,sc} = -\frac{\omega \psi_{PM} r_s}{r_s^2 + \omega^2 l_{s,d} l_{s,q}}. \qquad (6)$$

Simulationen zur Kurzschlussfestigkeit, durchgeführt mit den Parametern $\psi_{PM} = 1$, $l_{s,d} = 1{,}35$, $l_{s,q} = 2{,}0$ und $r_s = 0{,}05$, ergeben

© Springer Verlag

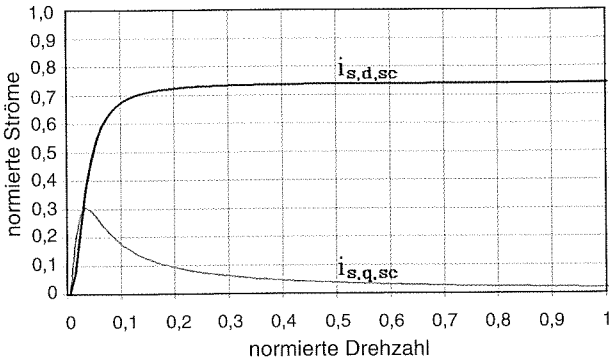


Abb. 5. Simulation des stationären Kurzschlussstroms im rotorfesten dq-Koordinatensystem über die Motordrehzahl

einen maximalen stationären Kurzschlussstrom von ca. 75 % (Abb. 5).

3. Aufbau von PSM und Prüfstand

3.1 Aufbau der Aktivteile

Basierend auf Erkenntnissen der analytischen Berechnung und der numerischen Simulation wurden die Aktivteile der Maschine gefertigt. Die Spulen weisen eine Windungszahl von 92 auf. Sie sind untereinander mittels eines eigens konzipierten Schaltrings verbunden.

Die Aktivteilmasse des Stators beträgt inklusive Verschaltung ca. 28 kg, die des Rotors ca. 11 kg. Abbildung 6 zeigt den fertigen Stator der Traktionsmaschine.

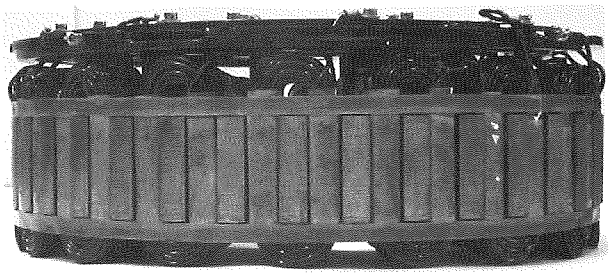


Abb. 6. Stator der PSM mit konzentrierten Wicklungen und Verschaltung

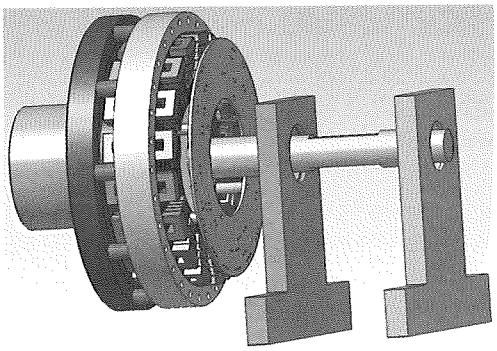


Abb. 7. Zeichnung der Maschine inkl. Aufhängung (ohne Hebel zur Momentenmessung)

3.2 Versuchsaufbau am Prüfstand

Die Maschine wurde als Pendelmaschine ausgeführt, um mittels einer Hebel-Kraftmessbuchsen-Kombinaton das auftretende Drehmoment zu messen (Abb. 7).

Eine Gleichstrommaschine (GSM) mit 600-Nm-Dauermoment dient als Belastungsmaschine zum Testen des Prüflings. Die beiden Maschinen sind mittels Kardanwelle gekoppelt (Abb. 8).

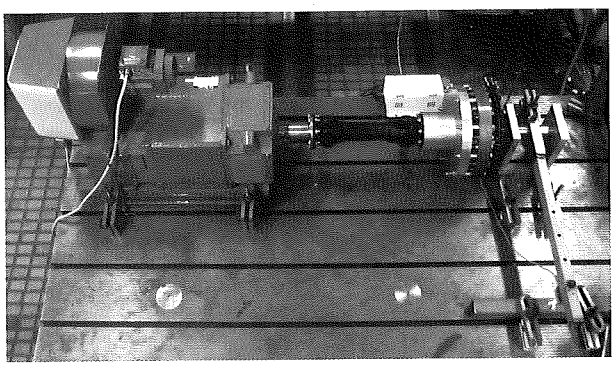


Abb. 8. Prüfstandsaufbau, GSM (links), PSM (rechts)

4. Sensorlose Regelung

4.1 Blockschaltbild der Regelung

Grundkonzept der Regelung (Abb. 9) (*Schrödl, Staffler, 2009*) ist die getrennte Vorgabe von d- und q-Strom und Einprägung dieser Komponenten mittels PI-Stromregler.

Die Ermittlung der Rotorposition erfolgt mittels einer kombinierten INFORM/EMK-Methode. Ein mechanischer Beobachter verbessert die Positionsinformation und berechnet die aktuelle Drehzahl ($\hat{\omega}$). Diese dient als Entscheidungskriterium bei der Auswahl des sensorlosen Verfahrens. Im Stillstand und bei geringen Drehzahlen, bis etwa 15 % der Nenndrehzahl, verwendet man INFORM, darüber das EMK-Modell. Die berechnete Drehzahl dient zudem als Eingang für den Drehzahlregler.

Die Umrechnung zwischen statorfestem (α, β) und rotorfestem (d, q) Koordinatensystem basiert auf der mit dem Beobachter ermittelten Rotorposition ($\hat{\gamma}$). Das INFORM-Verfahren kann entweder auf Basis von, wie hier dargestellt, Phasen- oder mit Zwischenkreisstrommessung implementiert werden.

4.2 Das INFORM-Verfahren

Das INFORM-Verfahren (*Schrödl, 1992, 1996*) basiert auf mit der Rotorposition variierenden magnetischen Eigenschaften der PSM. Die Induktivität ändert sich dabei durch Sättigungs- und Reluktanzeffekte abhängig von der Lage des Rotors.

Die „komplexe Induktivität" $\underline{l}_{\mathrm{INFORM}}$ wird durch kurze Spannungssprünge an der Maschine und der Messung der darauf folgenden Stromantworten ermittelt.

$$\underline{l}_{\mathrm{INFORM}} := \frac{\underline{u}_S}{d\underline{i}_S/d\tau} \tag{7}$$

Diese Testpulse im Zeitbereich können entweder in das PWM-Pulsmuster des Umrichters integriert werden oder übernehmen für kurze Zeit die Umrichter-Schaltbefehle. Die Testpulse werden auf den aktuellen Phasenstrom aufgeschalten und führen somit nicht zu einer wesentlichen Verschiebung des Arbeitspunktes. Das INFORM-Verfahren verwendet anstelle absoluter Induktivitäten inkrementelle Induktivitäten (Abb. 10). Dies sind durch Stromänderungen

© Springer-Verlag

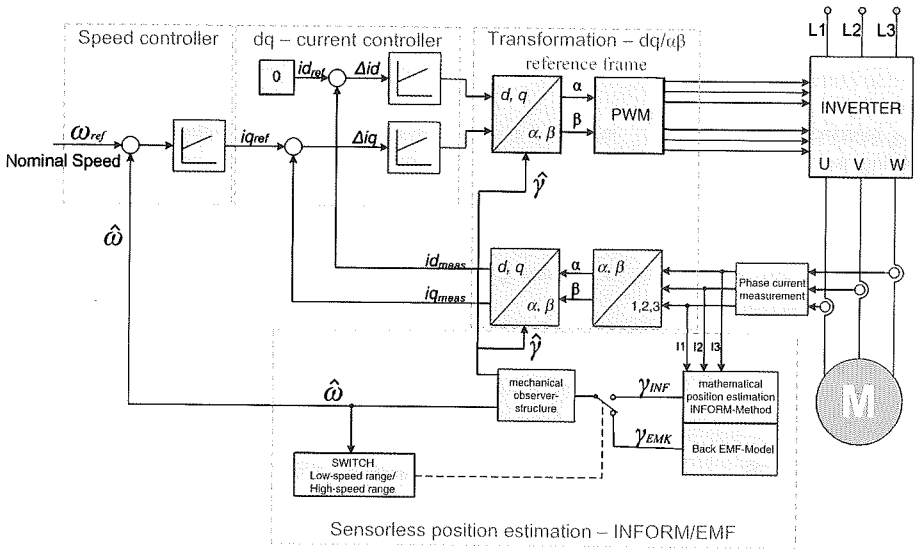


Abb. 9. Blockschaltbild der Regelungsstruktur (*Schrödl, Staffler, 2009*)

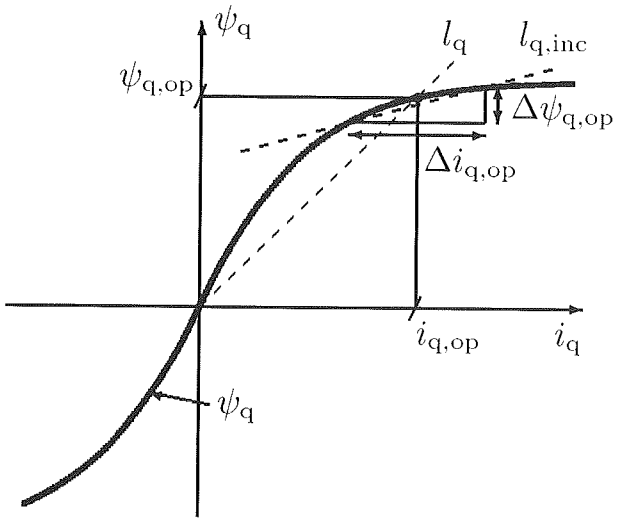


Abb. 10. Unterschied zwischen absoluter (l_q) und inkrementeller Induktivität ($l_{q,inc}$) als Beispiel in q-Richtung (*Eilenberger, 2011*)

hervorgerufene Kleinsignal-Induktivitätsänderungen in beliebiger Richtung x in einem aktuellen Arbeitspunkt (op)

$$l_{x,inc} := \frac{\Delta\psi_{x,op}}{\Delta i_{x,op}}. \tag{8}$$

Zur Vereinfachung verwendet man für weitere Betrachtungen die inverse INFORM-Reaktanz

$$\underline{y}_{INFORM} := \frac{1}{\underline{l}_{INFORM}}. \tag{9}$$

Sowohl die magnetische Sättigung als auch die Reaktanz zeigen einen 180°-periodischen Verlauf, daher weist auch die inverse INFORM-Reaktanz diesen Verlauf auf, sie kann modelliert werden als

$$\underline{y}_{INFORM} = y_0 - \Delta y \cdot e^{j(2\gamma_m - 2\gamma_u)}. \tag{10}$$

Die Funktion beschreibt einen Kreis in der komplexen Ebene mit dem Offset y_0, dem Radius Δy und dem Argument $(2\gamma_m - 2\gamma_u)$. γ_m gibt dabei den aktuellen Rotorwinkel und $\gamma_u = \arg(\underline{u}_S)$ den Winkel der Testspannung an. Bei dreiphasigen Umrichtern sind sechs verschiedene Testspannungsraumzeiger mit den Argumenten $\gamma_u = k.\pi/3$, $(k = 0,1,2,\ldots)$ möglich. Gegenüberliegende Zeiger liefern linear abhängige Gleichungen und bringen daher keine Zusatzinformation.

Durch die Bestimmung der drei komplexen Stromänderungen $\Delta\underline{i}|u$, $\Delta\underline{i}|v$ und $\Delta\underline{i}|w$ aus Abb. 11 ergeben sich sechs Informationen. Aus diesen werden aus zwei unterschiedlichen Methoden (Real- und Imaginärteilauswertung (*Schrödl, 1992*)) die drei unbekannten Größen y_0, Δy und $2\gamma_m$ berechnet.

Die „charakteristischen INFORM-Kurven" stellen die aktuelle Rotorposition in der komplexen Ebene dar

$$\underline{C}_{INFORM} = \Delta y \cdot e^{j2\gamma_m}. \tag{11}$$

Je größer die Differenz zwischen inkrementeller Längs- und Querinduktivität ist, desto größer wird der Radius des Kreises (Δy). Bei

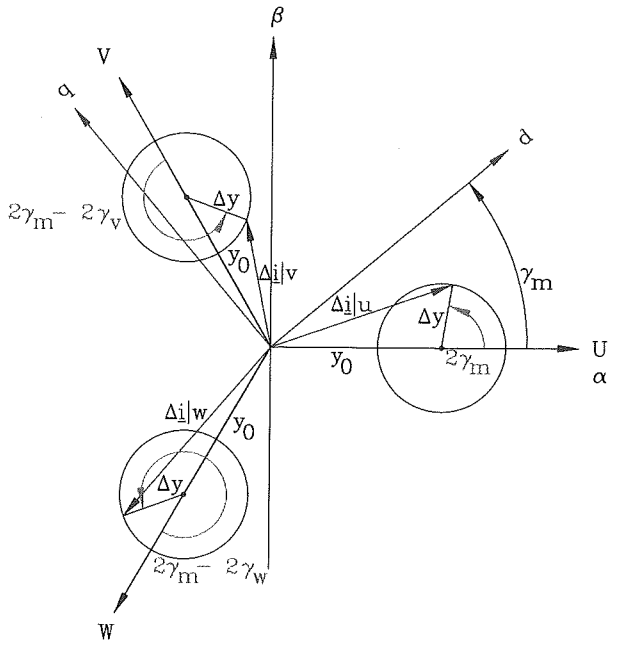


Abb. 11. Stromänderungen in Abhängigkeit der Rotorposition bei Testspannungen in den Phasen u, v und w

© Springer-Verlag

gleichen Induktivitätsparametern entartet der Kreis zu einem Punkt, es ist keine Winkelauswertung mehr möglich.

4.3 Lastabhängigkeit der INFORM-Auswertung

Infolge der Sättigung weist der Winkel der sensorlosen Lageerfassung eine Lastabhängigkeit auf. Diese Abhängigkeit berücksichtigt man durch Erweiterung von Gleichung (2) um die Gegeninduktivität *m* (*Eilenberger, 2011*).

$$\psi_d = l_d i_d + m i_q + \psi_{PM}, \tag{12}$$

$$\psi_q = l_q i_q + m i_d. \tag{13}$$

Die Phasenverschiebung ε der Induktivität aufgrund der Lastabhängigkeit berechnet sich mit

$$l_\Delta := \frac{l_d - l_q}{2} \tag{14}$$

zu

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{m}{l_\Delta}\right). \tag{15}$$

In Abb. 12 ist dieses Verhalten mit der mittleren Induktivität l_m dargestellt.

$$l_m := \frac{l_d + l_q}{2}. \tag{16}$$

5. Messungen

5.1 Kurzschlussfestigkeit

Um die Kurzschlussfestigkeit des Antriebs zu überprüfen, wurden die Ströme sowie das auftretende Drehmoment im dreipoligen Kurzschlussfall gemessen. Der Strom erreicht einen Maximalwert von 74 %, die Maschine ist somit kurzschlussfest. Das Moment hat seinen Maximalwert bei sehr geringer Drehzahl, d. h. der Antrieb liefert bei Kurzschluss erst nahe dem Stillstand deutlich erkennbares Bremsmoment. Die Erkenntnisse aus der Simulation (Abb. 5)

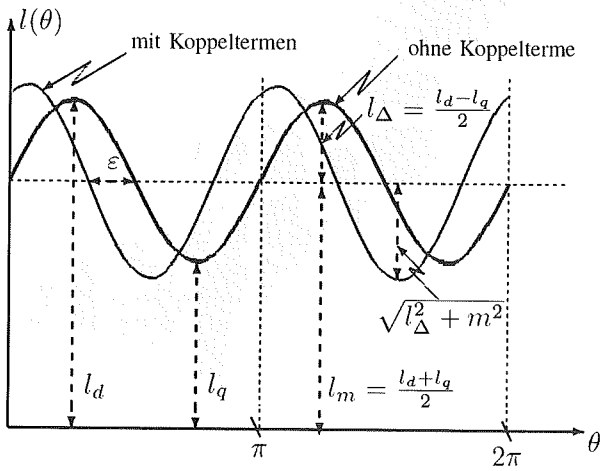


Abb. 12. Verlauf der Induktivität mit und ohne Koppelterme über eine elektrische Periode (*Eilenberger, 2011*)

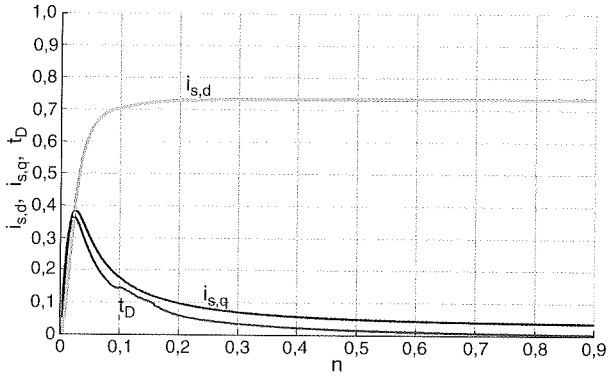


Abb. 13. Kurzschlussmessung: Statorstrom in d- und q-Richtung sowie Moment t_D über der Drehzahl (normiert)

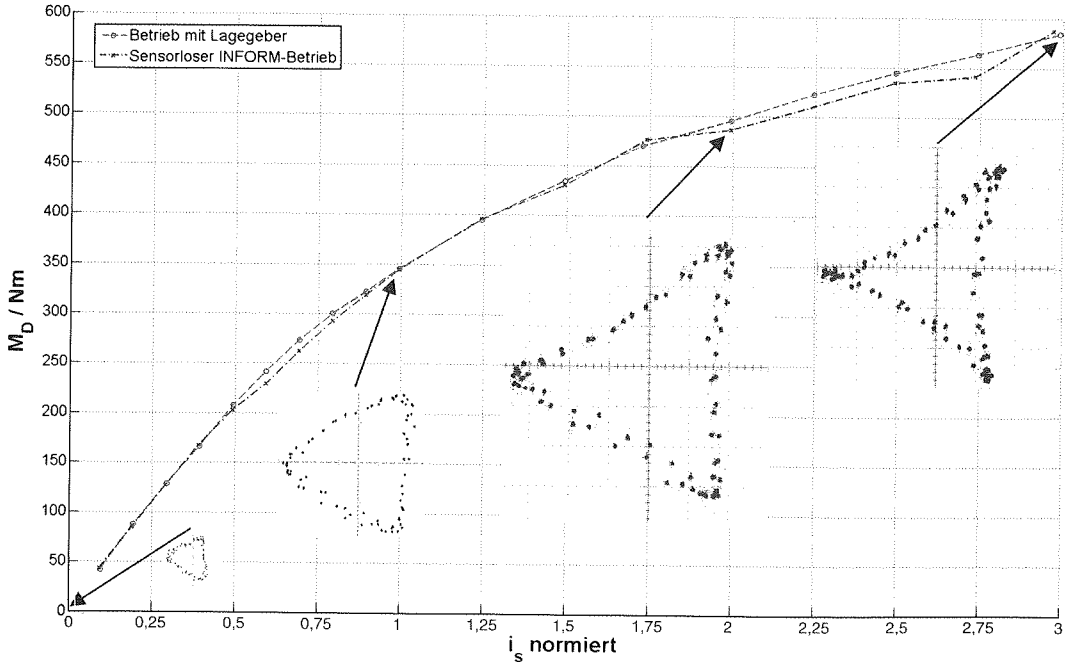


Abb. 14. Vergleich der Drehmomentausbeute bei Betrieb mit Lagegeber und sensorloser INFORM-Methode sowie INFORM-Ortskurven in ausgewählten Betriebsmodi (gleiche Zoomfaktoren)

© Springer-Verlag

stimmen sehr gut mit der Messung (Abb. 13) überein (*Demmelmayr, Eilenberger, Schroedl, 2010*).

5.2 Messungen im sensorlosen Betrieb

Die INFORM-Ortskurven präsentieren die komplexe Funktion mit dem Winkelwert $2\gamma_m$ aus Gleichung (10). Abbildung 15 zeigt die Kurven mit unterschiedlichen Zoomfaktoren, repräsentiert durch die Skalen auf der jeweiligen rechten Bildseite. Es zeigen sich größere Radien der Ortskurven mit steigender Belastung und daher auch zunehmende Qualität der Sensorlos-Fähigkeit.

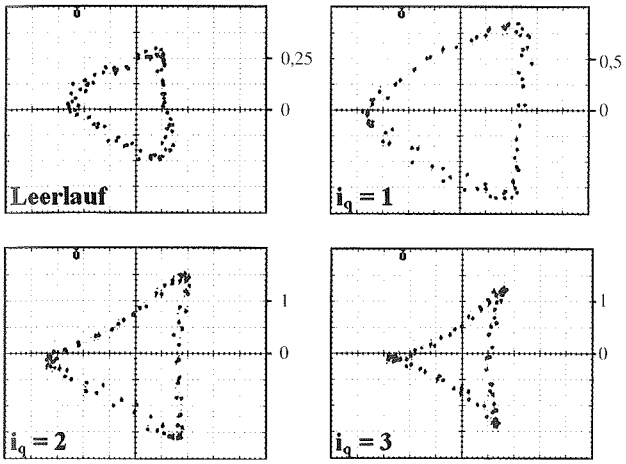


Abb. 15. INFORM-Ortskurven in ausgewählten Betriebsmodi mit unterschiedlichen Zoomfaktoren (siehe Skala)

Die INFORM-Tauglichkeit des vorgestellten Antriebs ist bei dreifachem Nennstrom sogar besser als bei Nennstrom. Es liegt ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis vor.

Die dreiecksähnliche Form kommt aufgrund höherer Harmonischer zustande. Diese können rechnerisch korrigiert werden und haben so kaum Einfluss auf die Positionsbestimmung.

Die INFORM-Testsignale wirken sich kaum auf die Drehmomentausbeute aus (Abb. 14). Die Abweichungen zum Betrieb mit Lagegeber ergeben sich nur durch die Breite der INFORM-Ortskurven (Rauschen). Abbildung 14 zeigt die INFORM-Ortskurven zu ausgewählten Betriebspunkten im Verhältnis ihrer tatsächlichen Größe.

5.3 Messungen zur Lastabhängigkeit des INFORM-Verfahrens

Der Abweichung ε zwischen Lagegeberwinkel und sensorlos berechnetem INFORM-Winkel durch Einfluss der Sättigung stellt Abb. 16 dar. Dabei wurde der q-Strom von 0 bis zu dreifachem Nennstrom erhöht.

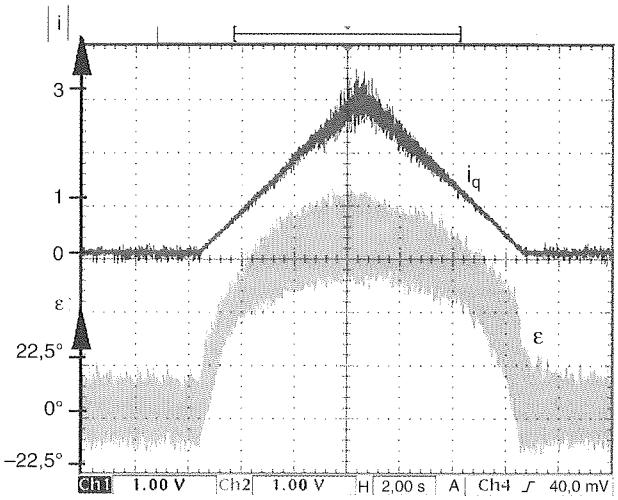


Abb. 16. Differenz ε zwischen elektrischem Winkel (Encoder) und INFORM-Winkel, Strom in q-Richtung (i_q) bei einer normierten Drehzahl von $\omega = 0{,}08$

Der Einfluss der Belastung auf die sensorlose Regelung kann durch eine einfache Korrekturfunktion fc eliminiert werden (Abb. 18).

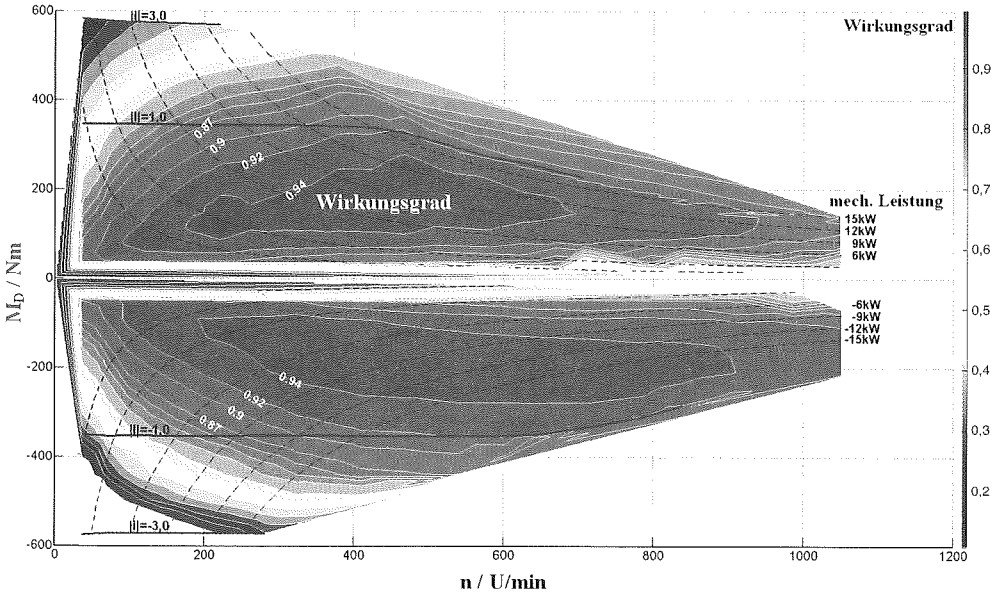


Abb. 17. Muschelkurve in Motor- und Generatorbetrieb

© Springer-Verlag

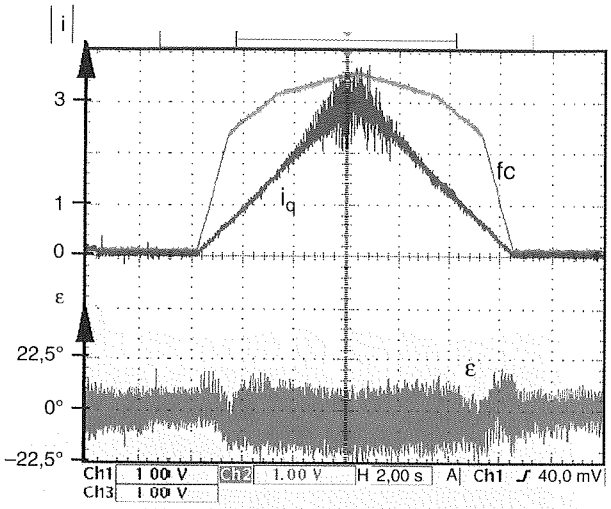


Abb. 18. Korrigierte Differenz ε zwischen elektrischem Winkel (Encoder) und INFORM-Winkel mit der Korrekturfunktion fc, Strom in q-Richtung (i_q) bei einer normierten Drehzahl von $\omega = 0{,}08$

5.4 Muschelkurve

Die Muschelkurve des Antriebs stellt das Moment über der Drehzahl inklusive des jeweiligen Wirkungsgrades dar. In Abb. 17 sind zudem die Isolinien konstanter mechanischer Leistung abgebildet. Die Maschine erreicht bei Nennstrom ($|i| = 1$) ein Dauermoment von 346 Nm und bei dreifachem Überstrom ein Moment von ca. 580 Nm. Die Kennlinien beinhalten die Ausnützung des Reluktanzmomentes. In großen Bereichen ist ein Wirkungsgrad von 94 %, bis weit in den Feldschwächbetrieb möglich.

6. Zusammenfassung

In diesem Bericht wurde ein Traktionsantrieb mit Permanentmagnet erregter Synchronmaschine (PSM) vorgestellt. Er zeichnet sich durch hohes Moment bei kompaktem Bauraum, großen Feldschwächbereich und hohen Wirkungsgraden in weiten Betriebsbereichen aus. Eine Besonderheit ist die zunehmende Qualität der sensorlosen Regelung bei steigender Belastung. Die Maschine kann bis zum dreifachen Nennstrom auch im Stillstand mit dem INFORM-Verfahren betrieben werden.

Literatur

Demmelmayr, F., Eilenberger, A., Schroedl, M. (2010): Sensorless Electric Traction Drive with 500 Nm Outer Rotor Permanent Magnet Synchronous Machine. ICEM, Rome, Italy, 2010.

Eilenberger, A. (2011): Permanent Magnet Synchronous Machines With Tooth Coils for Sensorless Control Including Overload Range. Doctoral thesis, Vienna University of Technology.

Eilenberger, A., Heissenberger, J., Kogler, F., Schrödl, M. (2009): Comparison of outer rotor PMSM with different pitch factors of q=1/2 and q=1/4 at same rotor geometry. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf., Miami, USA.

Kleinrath, H. (2006): Das Kurzschlussverhalten kleiner permanenterregter Synchronmaschinen. e&i, 123 (9): 296–401.

Kovacs, K. P. (1984): Transient phenomena in electrical machines. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier.

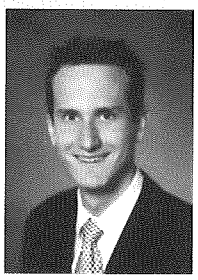
Schrödl, M. (1992): Sensorless Control of AC machines. Habilitation thesis. (=VDI-Fortschrittsberichte. Bd 117, Reihe 21). Düsseldorf: VDI-Verlag Düsseldorf.

Schrödl, M. (1996): Sensorless control of AC machines at low speed and standstill based on the "INFORM" method. IEEE IAS Conf. San Diego, USA. Proc., Vol. 1, pp. 270–277.

Schrödl, M., Staffler, W. (2009): Sensorless Control of a Double-Stator Disc Rotor PM Synchronous Motor Using a Combined INFORM/EMF Model. Power Conversion Intelligent Motion (PCIM), Nürnberg, Germany, May 2009.

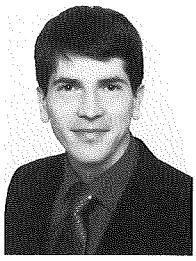
Tingley, E. M. (1915): Two-phase and three-phase lap windings in unequal groups. Electrical Review and Western Electrican, 66 (4): 166–168.

Autoren



Florian Demmelmayr
geboren 1982 in Haag a. H., Österreich, schloss sein Bakkalaureatsstudium der Elektrotechnik (2006) bzw. sein Diplomstudium im Studienzweig Automatisierungstechnik (2008) an der TU Wien ab. Seit Februar 2009 absolviert er als Projekt- bzw. Universitätsassistent ein Doktoratsstudium am Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe der TU Wien mit den Forschungsschwerpunkten Konstruktion und sensorlose Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen.

Manfred Schrödl
Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Wien, Studienzweig Industrielle Elektronik und Regelungstechnik; Abschluss 1982. Universitätsassistent am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der TU Wien, 1987 Promotion zum Dr. techn., 1992 Habilitation für Elektrische Antriebe und Leistungselektronik in der Antriebstechnik. 1993 bis 1996 Leiter F&E bei Elin Verkehrstechnik Wien, 1996 bis 1998 Bereichsleiter Zentrale Technik bei Flender ATB, Spielberg, Steiermark. Seit 1998 Ordentlicher Universitätsprofessor für Elektrische Antriebe und Maschinen sowie Vorstand des Instituts für Energiesysteme und Elektrische Antriebe an der TU Wien.



Andreas Eilenberger
Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Wien, Studienzweig Energietechnik; Abschluss 2006. Universitätsassistent am Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe der TU Wien, 2011 Promotion zum Dr. techn. mit Auszeichnung. Forschungsschwerpunkt in der Auslegung, Konstruktion und sensorlosen Regelung von elektrischen Maschinen.

© Springer-Verlag