Effizienter, kurzschlussfester Direktantrieb mit Außenläufer-PSM für geberlosen Betrieb einschließlich Stillstand und Überlast

Efficient outer-rotor permanent magnet motor direct drive with limited short-circuit current for sensorless operation including standstill and overload

Univ.-Prof. Dr. Manfred Schrödl, Dipl.-Ing. Andreas Eilenberger, Dipl.-Ing. Florian Demmelmayr, Technische Universität Wien, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, A-1040 Wien, Österreich, manfred.schroedl@tuwien.ac.at

Kurzfassung

Es wird ein Antrieb mit permanenterregter Synchronmaschine (PSM) vorgestellt, der sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet: Hohes Drehmoment pro Volumen bzw. Aktivteil-Masse, Dauerkurzschlussfestigkeit, Fähigkeit zur sensorlosen Regelung bis Stillstand (INFORM®-Verfahren) und Überlast bis 3-fachen Dauerstrom. Die Maschine ist luftgekühlt ausgeführt und eignet sich sehr gut zum Einsatz in Direktantrieben für Industrie und Traktion. Im Bericht werden charakteristische INFORM-Ortskurven zur Beurteilung der Sensorlos-Fähigkeit, die implementierte Regelstruktur und Messungen von Wirkungsgrad und dynamischem Verhalten des Antriebs angegeben.

Abstract

A drive with permanent magnet synchronous machine (PSM) is presented, which is characterized by the following properties: High torque per volume ratio (or torque per mass), short circuit strength, ability of being controlled with sensorless methods down to standstill (INFORM® method) and overload up to three-times rated current. The motor is air-cooled and can preferably be used in direct drives for industry and traction. In the paper, characteristic INFORM curves are given for evaluating the ability for sensorless control. Furthermore, the implemented control structure and efficiency measurements as well as dynamical properties of the drive are presented.

1 Einleitung

Permanentmagnet-Synchronmaschinen (PSM) gewinnen aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und ihrer kompakten Bauweise immer größere Bedeutung für hochwertige Antriebe. Für getriebelose Direktantriebe kann die PSM als Außenläufer ausgeführt werden. Die Regelung solcher Antriebe erfordert normalerweise die Erfassung der Rotorposition mittels Lagegebern, die zur Feldorientierung des Stromes verwendet werden, es wird jedoch viel Forschung für sensorlose Antriebstechnik betrieben [1]-[6]. In diesem Bericht wird das INFORM-Verfahren zur sensorlosen Positionsbestimung bei niedrigen Drehzahlen und Stillstand sowie ein EMK-Verfahren zur Positionserfassung bei hohen Drehzahlen eingesetzt. In Verbindung mit Zahnspulenwicklungen wird ein Antriebskonzept mit hohem Automatisierungspotenzial in der Fertigung vorgestellt.

2 Maschinenentwurf

2.1 Geometrische Randbedingungen

Die geometrischen Randbedingungen für die entworfene Maschine lauten: Rotor mit Permanentmagneten in vergrabener Bauweise (Montagefreundlichkeit, keine Probleme mit dem Abfangen von Fliehkräften, Stoßbelastungen sowie Korrosionsgefahr), Außendurchmesser 400 mm. Stator mit Zahnspulenwicklungen, Innendurchmesser 200 mm. Im Hinblick auf geringes Nutrastmoment wurde eine Bruchlochwicklung mit 36 Zähnen bei 30 Polen gewählt, Um eine Vorfertigung der Zahnwicklungen und einfaches Aufstecken auf die Statorzähne zu ermöglichen, wurden die Zähne mit parallelen Flanken ausgeführt. Der Luftspalt wurde mit 1,5 mm vorgegeben. Die aktive Blechlänge beträgt 50 mm. Aufgrund der konzentrierten Wicklungen sind sehr kompakte Wickelköpfe möglich. Um möglichst sichere Isolation zwischen den Phasen zu gewährleisten, wurde nur jeder zweite Zahn bewickelt. Somit treffen nirgendwo zwei Phasen aufeinander.

2.2 Numerische Feldberechnung

Die Auslegung erfolgte nach einem ersten Schritt mit klassischer Auslegung unter Verwendung magnetischer Ersatzschaltbilder mittels numerischer Simulation (FEM-Programm Maxwell 2D). Damit kann die Drehmomentausbeute unter Berücksichtigung des Rastmomentes optimiert werden. Es ergibt sich aus der Forderung nach maximalem Moment pro Strom eine Geometrie im Stator gemäß Bild 1.

978-3-8007-3195-4 © VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

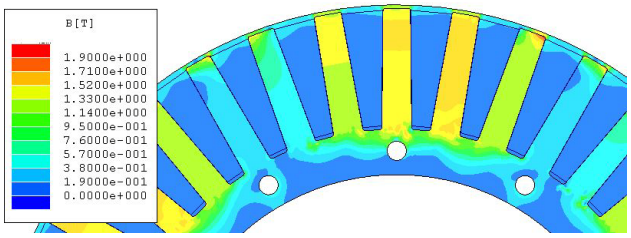

Bild 1 Flussdichte im Stator bei Nennstrom in q-Richtung und Dauermagneterregung mit NdFeB-Magneten (Rotor nicht in der Zeichnung dargestellt)

Aus der Simulation ergab sich eine Drehmomentausbeute, die mit den später durchgeführten Messungen auf ca. 10 Prozent Genauigkeit übereinstimmte.

2.3 Auslegung auf Kurzschlussfestigkeit

Für viele Anwendungen ist Kurzschlussfestigkeit gefordert, d.h. ein Wicklungskurzschluss muss auf Dauer in jedem Betriebsfall zulässig sein. Dies erfordert eine entsprechende Auslegung – vor allem der Induktivität in der d-Achse. Wie die Messung in Kapitel 5.3 zeigt, konnte der Kurzschlussstrom auf ca. 70 % des Dauerstroms begrenzt werden.

3 Maschinenaufbau

3.1 Aufbau der Aktivteile

Auf Basis der Finite-Elemente-Berechnungen wurde ein Prototyp der PSM gefertigt. Die Aktivteilmasse beträgt 37 kg, davon entfallen auf den Stator 26 kg und auf den Rotor 11 kg. Das folgende Bild 2 zeigt den Stator mit konzentrierten Wicklungen.

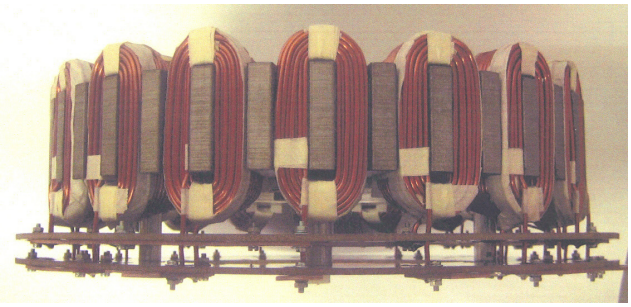

Bild 2 Stator der PSM mit konzentrierten Wicklungen

3.2 Versuchsaufbau am Prüfstand

Die realisierte Maschine wurde auf einem Prüfstand aufgebaut, der mit einer Belastungsmaschine (Gleichstrommaschine, 600 Nm), Drehmomentmesswelle und Verbindung zum Prüfling über Kardanwelle ausgestattet war (Bild 3).

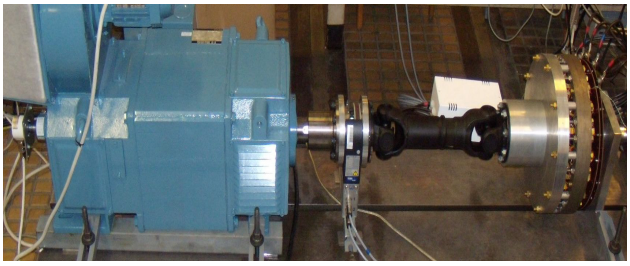

Bild 3 Aufbau des Belastungsprüfstandes
(links: 600 Nm Gleichstrommaschine,
Mitte: Drehmomentmessung, rechts: Prüfling)

4 Sensorlose Regelungsstruktur

Nachfolgend wird ein Übersichtsblockschaltbild der Regelung sowie ein kurzer Überblick über das INFORM-Verfahren sowie das Beobachterkonzept [7] gegeben.

4.1 Blockschaltbild der Regelung

Bild 4 zeigt das Blockschaltbild der Regelung. Grundkonzept ist die getrennte Vorgabe von d- und q-Strom und Einprägung dieser Komponenten mittels PI-Stromreglern. Die Rotorpositionserfassung erfolgt sensorlos über INFORM- bzw. EMK-Modell in Kombination mit einem mechanischen Beobachter. Dieser ermittelt neben einer verbesserten Rotorlage auch die momentane Drehzahl, welche sowohl als Istwert für den Drehzahlregelkreis als auch als Umschaltkriterium zwischen INFORM- und EMK-Modell dient. Die Strommessung erfolgt entweder in den Phasen (wie im Bild dargestellt) oder alternativ im Zwischenkreis in Verbindung mit einer Phasenstromrekonstruktion aus Zwischenkreisstrominformation. Das INFORM-Verfahren kann entweder auf Basis von Phasen- oder mit Zwischenkreisstrommessung implementiert werden.

4.2 Das INFORM®-Verfahren

Grundidee des INFORM-Verfahrens [8] ist, mittels des Umrichters generierte Spannungssprünge $\underline{u}_S$ an die Maschine zu legen und die Stromreaktion $d\underline{i}_S / d\tau$ zu erfassen. Dabei können die Testimpulse entweder in das PWM-Pulsmuster integriert werden oder die INFORM-Tests übernehmen für kurze Zeit die Vorgabe der Umrichter-Schaltbefehle. Letzteres vereinfacht die Implementierung und die Auswertung der Tests. Definiert man

$$\underline{\ell}_{INFORM} := \frac{\underline{u}_S}{d\underline{i}_S / d\tau} \qquad (1)$$

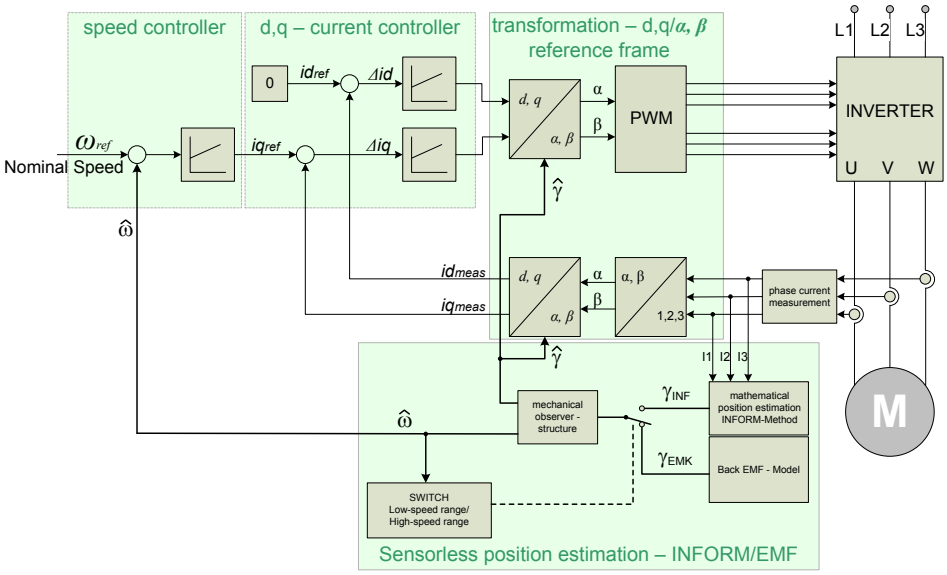

Bild 4 Struktur der sensorlosen Regelung

so kann der Parameter $\underline{\ell}_{INFORM}$ als komplexe (bezogene) INFORM-Reaktanz interpretiert werden, die bei ungleichen d- und q-Induktivitäten eine Information über die Rotorposition enthält.

Bei dreiphasigen Umrichtern sind sechs verschiedene Testspannungsraumzeiger mit den Argumenten arg ($\underline{u}_S$) = $\gamma_u = k \cdot \pi/3$, (k=0,1,2,..) möglich, wobei gegenüberliegende Zeiger linear abhängige Gleichungen liefern und daher keine Zusatzinformation bringen. Da die magnetischen Eigenschaften aufgrund von Sättigung und Reluktanz einen 180°-periodischen Verlauf zeigen, ist der Parameter $\underline{\ell}_{INFORM}$ ebenso eine 180°-periodische Funktion:

$$\underline{\ell}_{INFORM} = \underline{\ell}_{INFORM}(2\gamma_m - 2\gamma_U)) \quad (2)$$

Aus rechentechnischen Gründen ist es vorteilhaft, den Kehrwert

$$\underline{y}_{INFORM} = \underline{\ell}_{INFORM}^{-1} \quad (3)$$

zu verwenden, da damit Divisionen vermieden werden können. Die komplexe Kurve mit den Parametern arg($\underline{u}_S$) = γ_U und der Rotorposition γ_m kann wie folgt modelliert werden:

$$\underline{y}_{INFORM} = y_0 - \Delta y \cdot \exp[j(2\gamma_m - 2\gamma_U)] \quad (4)$$

Diese Funktion beschreibt einen Kreis in der komplexen Ebene mit Radius Δy and Offset y_0. (Bild 5). Zur Erklärung des Verlaufs von $\underline{y}_{INFORM}$ in Abhängigkeit von der Rotorposition stelle man sich wiederholte Tests mit einem Testspannungsraumzeiger „u+“ (horizontale Richtung in Bild 5) vor und messe jeweils die Stromreaktion $d\underline{i}_S / d\tau$, welche proportional zu $\underline{y}_{INFORM}$ ist. Dreht man dabei den Rotor um elektrisch 90° von POS1 nach POS3 in Bild 5, so folgt $\underline{y}_{INFORM}$ einem Halbkreis mit Radius Δy. Das Argument des Radiusvektors entspricht der doppelten Rotorposition. Je größer die Induktivitätsdifferenz zwischen Längs- und Querrichtung ist, desto größer wird der „INFORM-Radius“ Δy. Bei gleichen Induktivitätsparametern entartet der Kreis zu einem Punkt, dann ist keine Winkelauswertung möglich. Durch Kombination von mehreren Messungen in verschiedene Raumrichtungen kann ein offsetfreier Kreis $\underline{C}_{INFORM}$ konstruiert werden, der mit der Rotorposition wie folgt zusammenhängt:

$$\underline{C}_{INFORM} = \Delta y \cdot \exp[j(2\gamma_m)] \quad (5)$$

Dieser Kreis hängt nicht mehr von der mittleren Induktivität ab und ist daher robust gegen Schwankungen der Induktivitäten und der Zwischenkreisspannung. Die aus den Testmessungen ermittelten Rotorpositionen sind mehr oder weniger verrauscht und können mit statistischen Methoden beschrieben werden. Die daraus ermittelbare Standardabweichung ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität der sensorlosen Winkelerfassung.

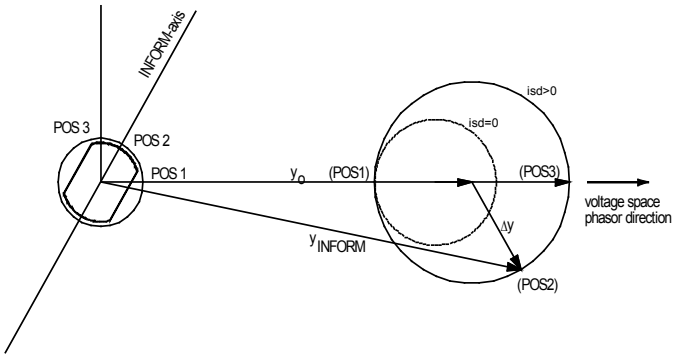

Bild 5 Abhängigkeit der Stromänderung von der Rotorposition

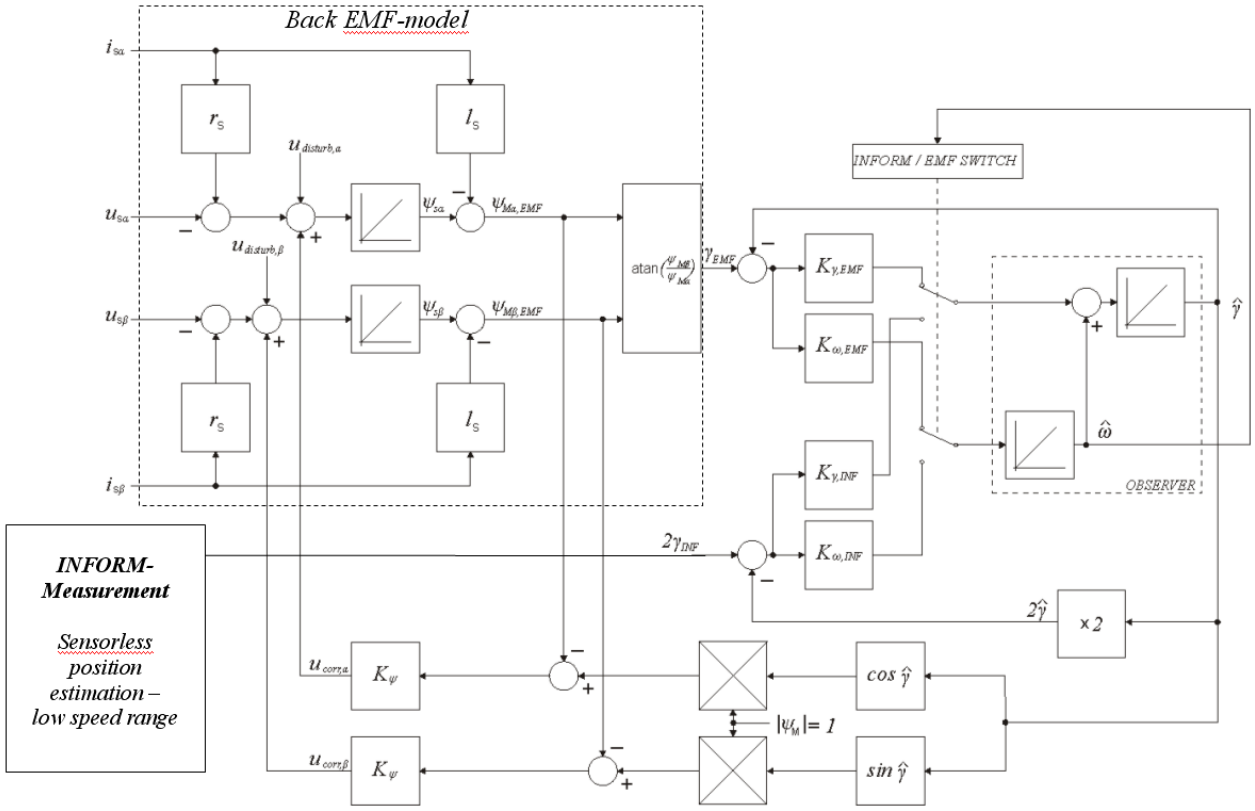

Bild 6 Beobachter für Drehzahl-und Winkelschätzung basierend auf Messwerten aus INFORM- und EMK-Modell [7].

4.3 Beobachter für Drehzahl und Lage

Die in Bild 6 dargestellte Beobachterstruktur liefert sensorlose Information über Drehwinkel und Drehzahl basierend auf der Integration der Statorspannungsgleichung „EMK-Modell“, im Bild links oben sowie bei tiefen Drehzahlen zusätzlich aus den INFORM-Tests (Bildteil links unten). Beide Teilmodelle liefern einen Schätzwert für den Winkel bzw. den doppelten Winkel, welcher im linearen Beobachter (rechter Bildteil) zur Ermittlung einer verbesserten Lageinformation sowie der Drehzahl dient. Die Rückkopplung im Bild unten dient zur Stabilisierung der offenen Integration des EMK-Modells.

5 Messungen

5.1 Drehmoment über Strombetrag

In Bild 7 ist die Drehmomentausbeute in Abhängigkeit des Strombetrags für Motor- und Generatorbetrieb angegeben. Dabei wird nicht reiner q-Strom, sondern (lastabhängig) ein gewisser negativer d-Strom eingeprägt, der die maximale Momentenausbeute bei gegebenem Strombetrag gewährleistet. Ab einer gewissen Drehzahl wird die induzierte Spannung so hoch, dass der gewünschte Strom nicht mehr einprägbar ist. Zur weiteren Steigerung der Drehzahl ist dann Feldschwächung durch verstärkten negativen d-Strom nötig. Dadurch ergibt sich eine etwa hyperbolische Abnahme des maximalen Drehmoments über der Drehzahl (Konstantleistungsbereich zwischen -26 und +17 kW).

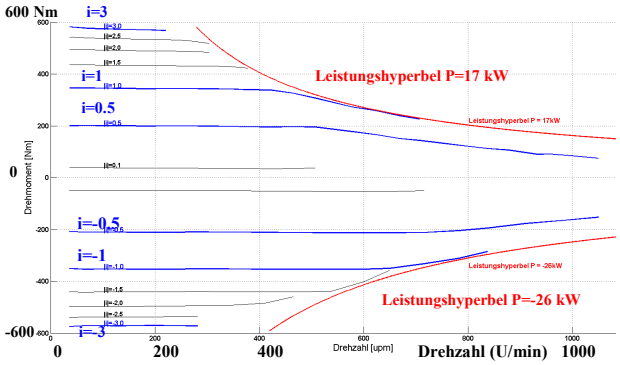

Bild 7 Moment über der Drehzahl in Abhängigkeit vom Strombetrag zwischen +/- 3 fachem Nennstrom

5.2 INFORM-Ortskurven

Beim Entwurf auf gute Sensorlos-Fähigkeit („INFORM-Tauglichkeit“) ist auf den Verlauf der Induktivitäten über der Belastung großer Wert zu legen. Dabei ist es erforderlich, dass das Verhältnis von Längs- zu Querinduktivität ein Verhältnis ungleich 1 im gesamten Lastbereich aufweist. Durch die Auslegung des Magnetkreises wurde bei der vorgestellten PSM gewährleistet, dass dieses Verhältnis unter Last sogar ansteigt. Dies kommt auch in den charakteristischen INFORM-Ortskurven in

Bild 8 zum Ausdruck, die mit steigender Belastung einen zunehmenden Radius aufweisen.
Aus den INFORM-Testmessungen werden aus den Stromauswertungen auf mathematischem Wege gemäß Gleichungen (1) bis (5) charakteristische komplexe INFORM-Ortskurven (Bild 8) berechnet, deren Argument dem doppelten elektrischen Winkelwert entspricht.

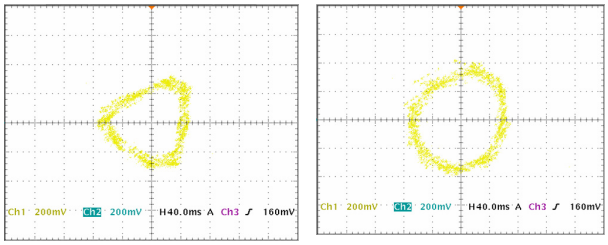

Bild 8 INFORM-Ortskurve bei Nennstrom (links) sowie bei dreifachem Nennstrom (rechts).

Aus dem Vergleich der beiden Ortskurven ersieht man, dass die INFORM-Tauglichkeit bei der präsentierten Maschine bei 3-fachem Nennstrom sogar besser als bei einfachem Nennstrom ist und dass ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis vorliegt.

5.3 Prüfung der Kurzschlussfestigkeit

Um die Kurzschlussfestigkeit zu prüfen, wurde die PSM kurzgeschlossen und die d- und q-Stromaufnahme sowie das Drehmoment während eines langsamen Hochfahrvorganges von 0 auf 180 U/min untersucht. (Für höhere Drehzahlen ändert sich das Verhalten nur gering). Die Messungen in Bild 9 zeigen einen maximalen d-Strom von 70 % des Nennstroms. Der q-Strom erreicht vorübergehend 30 % des Nennstroms (dort tritt das maximale Bremsmoment von ca. -100 Nm auf (30 % des Nennmoments) und klingt dann wieder rasch ab.

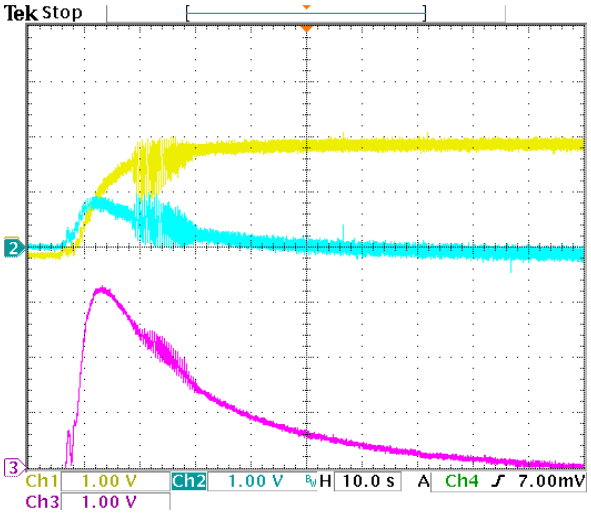

Bild 9 Längsstrom id (oben), Querstrom iq (Mitte) und Moment (unten) während des Hochfahrens der kurzgeschlossenen PSM (Drehzahl von Null auf 180 U/min) (id < 70 % des Dauerstroms, iq->0, Moment < 100 Nm)

5.4 Wirkungsgradkurven

Es wurden motorischer und generatorischer Betrieb einschließlich Feldschwächbereich untersucht. Der Wirkungsgrad der Maschine liegt in weitem Bereich über 92 % und erreicht im Bestpunkt knapp 95 %. (Bild 10).

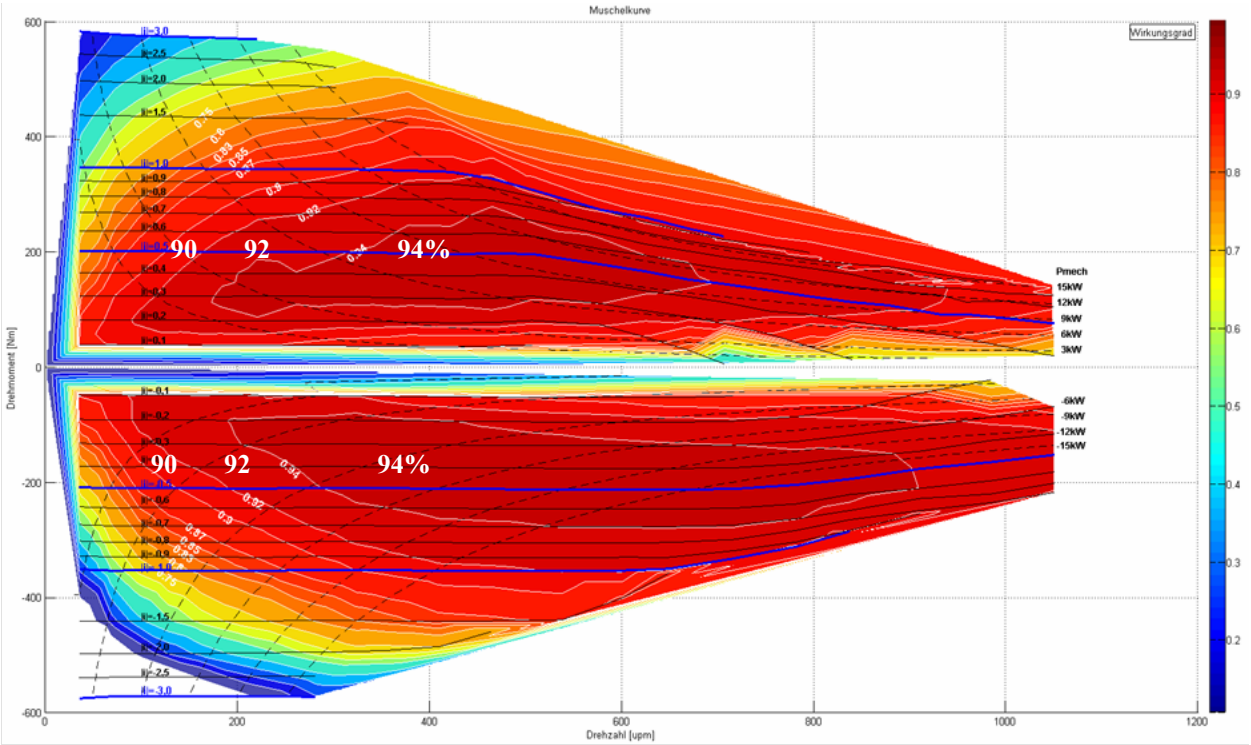

Bild 10 Wirkungsgrad im Drehmoment/Drehzahl-Kennfeld (Motor- und Generatorbetrieb inkl. Feldschwächung)

5.5 Erwärmungsmessung

Zur Bestimmung des maximal zulässigen Dauerstroms wurde die luftgekühlte Maschine bestromt und der Temperaturanstieg im Wickelkopf bestimmt. Das folgende Bild 11 zeigt die Erwärmung bei 70 % und 100 % des Nennstroms, dabei stellt sich mit einer näherungsweisen Zeitkonstante von etwa 25 Minuten eine Übertemperatur von ca. 60 K bzw. von 130 K ein.

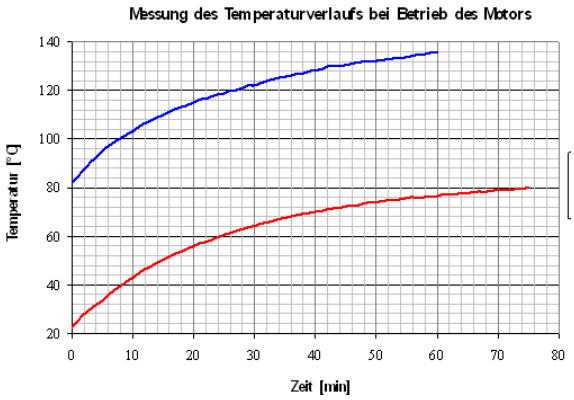

Bild 11 Erwärmungsverlauf im Wickelkopf unter 70 % Nennstrom (rot) während 75 min sowie anschließend unter 100 % Nennstrom (entspricht 350 Nm) (blau).

5.6 Dynamisches Verhalten (sensorlos)

In Bild 12 ist exemplarisch das dynamische Verhalten des sensorlos geregelten Systems (hohes Trägheitsmoment durch die gekoppelte Gleichstrommaschine) anhand eines Drehzahlsprunges von Stillstand auf 30 % der Nenndrehzahl gezeigt. Dabei wird der momentenbildende Strom vom Drehzahlregler bis zum doppelten Nennstrom (entspricht Drehmoment von 500 Nm) eingestellt. Der sensorlos ermittelte Winkel (grün) stimmt auch während des dynamischen Zustands gut mit dem zur Verifikation vorhandenen Lagegeberwinkel (rot) überein. Die Solldrehzahl wird nach ca. 100 ms erreicht

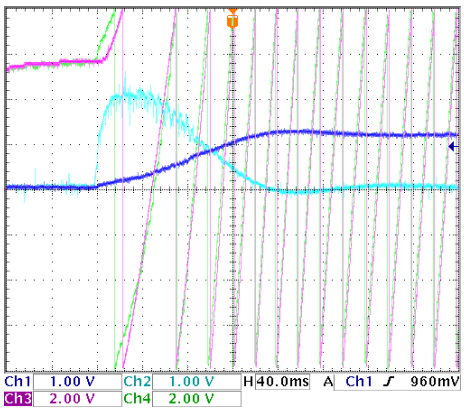

Bild 12 Solldrehzahlsprung von Stillstand auf 30 % der Nenndrehzahl (grün bzw. rot: sensorlos bzw. mit Sensor ermittelter Winkel, hellblau: Iststrom (Nennstrom pro div., blau: Istdrehzahl aus Beobachter)

6 Zusammenfassung

Im vorgelegten Artikel wurde eine Permanentmagnet-Synchronmaschine entworfen und aufgebaut, die hohes Drehmoment pro Volumen auch bei Luftkühlung ermöglicht. Als besondere Eigenschaften weist sie Kurzschlussfestigkeit, sehr gute Feldschwächfähigkeit und hohen Wirkungsgrad in weitem Betriebsbereich auf. Aus der Sicht einer automatisierbaren Fertigung ist sie mit Einzelzahnwicklung und vergrabenen Magneten ausgeführt. Ein besonderes Merkmal ist die Fähigkeit, sensorlos mit dem INFORM-Verfahren bis zum 3-fachen Nennstrom auch im Stillstand betrieben zu werden.

7 Literatur

[1] Rajashekara, K., Kawamura, A., Matsuse, K. (editors), "Sensorless Control of AC Motor Drives" (Selected reprints). IEEE Press, New York, 1996. ISBN 0-7803-1046-2.

[2] Johnson, J. P., Ehsani, M., Güzelgünler, Y., "Review of Sensorless Methods for Brushless DC". IEEE-IAS meeting 1999, pp. 143-150.

[3] Linke, M., Kennel, R., Holtz, J.: "Sensorless position control of permanent magnet synchronous machines without limitation at zero speed" IECON 2002, Sevilla (Spain), pp. 674-679.

[4] Schroedl M.: "Detection of the Rotor Position of a Permanent Magnet Synchronous Machine at Standstill", International Conference on Electrical Machines, ICEM, Italy, 1988

[5] Sepe, R. B.; Lang, J. H.: "Realtime observer-based adaptive-control of a permanent-magnet synchronous motor without mechanical sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 6, 1992

[6] Corley, M; Lorenz, R.: "Rotor position and velocity estimation for permanent magnet synchronous machines at standstill and high speed". IEEE IAS Conf. Proc. 1996, S.36-41.

[7] Schroedl, M.; Hofer, M.; Staffler, W.: "Combining INFORM method, voltage model and mechanical observer for sensorless control of PM synchronous motors in the whole speed range including standstill", PCIM 2006, Nuremberg.

[8] Schroedl, M.: "Sensorless Control of AC machines". Habilitation thesis, VDI-Fortschrittsberichte Nr. 117 (VDI-Verlag Dusseldorf, Germany), Reihe 21 (1992).