

EIGENSCHAFTEN PM-ERREGTER SCHENKELPOL-SYNCHRONMASCHINEN

H. Wöhl-Bruhn

1 EINLEITUNG

Permanentmagneterregte Synchronmaschinen haben insbesondere im Teillastbetrieb und bei niedrigen Drehzahlen Vorteile gegenüber alternativen Maschinentypen. Ermöglicht werden ein selbstständiger Anlauf und der Einsatz dieser Maschinen bei unterschiedlichen Drehzahl- und Drehmomentzuständen erst durch den Betrieb am Wechselrichter. Liegt keine Beschränkung der verfügbaren Zwischenkreisspannung vor, kann die Maschine ohne Schwächung des Erregerfeldes gefahren werden. Problematischer sind dagegen Anwendungen, die einen großen Drehzahlstellbereich fordern sowie Zwischenkreisspannung und maximalen Phasenstrom limitieren. Diese Anforderungen führen zu einem Maschinendesign und einer Wechselrichtersteuerstrategie, die sowohl die maximalen Drehmomentanforderungen befriedigt, als auch die induzierte Spannung der Maschine bei hohen Drehzahlen verringert (Feldschwächbetrieb). Wird dabei auf separate Spulen [1], [2] oder mechanische Verstellverfahren [3], [4] verzichtet, erfolgt die Verstellung der Maschine allein durch den Strom in der Statorwicklung. Das übliche Verfahren stellt hierzu ein Vorzünden des Statorstroms dar, während die Verstellung der Permanentmagneterregung durch Strompulse [5], [6] eine Sonderform darstellt.

In diesem Bericht wird auf die Besonderheiten bei dem Einsatz von Maschinen mit eingebetteten Magneten eingegangen, die mit einer klassischen Drehstromwicklung ausgeführt sind. Dies ermöglicht eine physikalische Erklärung des Maschinenverhaltens, die auf der klassischen Grundwellentheorie basiert. Am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen werden auch Untersuchungen an Synchronmaschinen mit eingebetteten Magneten und anderen Wicklungstopologien durchgeführt, die allerdings nicht Gegenstand dieses Berichts sind.

2 FELDSCHWÄCHUNG BEI PERMANENTMAGNETERREGTEN SCHENKELPOLMASCHINEN

Während bei klassischen Schenkelpolmaschinen durch die Ausführung mit konzentrierten, bewickelten Polen die Induktivität der Maschine in der Polachse (d-Achse) größer ist als in der Pollücke (q-Achse), werden permanentmagneterregte Schenkelpolmaschinen sinnvollerweise mit entgegengesetztem Verhalten ausgelegt. Grund dafür ist die niedrige magnetische Permeabilität der Magnete, die einen großen magnetischen Spannungsabfall in der d-Achse des Rotors verursachen. Werden die Magnete in ein Blechpaket ohne weitere Ausbrüche eingeschoben, sorgt das Blech zwischen den Polen für die magnetische Anisotropie.

Das Einschieben der Magnete in das Blechpaket ermöglicht einen geringen Luftspalt, so dass die Ankerrückwirkung im Feldschwächbetrieb im Vergleich zu einer Oberflächenmagnetmaschine mit einer Bandage bei gegebenem Statorstrom größer ist. Als günstig erweisen sich auch die magnetisch leitenden Pollücken und die Polkappen. Diese verringern bei Feldschwächung den magnetischen Widerstand in der Polachse, da der Fluss von der Kappe über die magnethaltenden Stege und die Pollücken an den Magneten vorbeigeführt wird. Von großer Bedeutung sind auch die Bereiche unterschiedlicher Sättigung unter den Magneten: Die Überlagerung des Streuflusses der Magnete und die ausgeprägte Ankerrückwirkung führen zu einer Verschiebung von Bereichen hoher Sättigung im Rotor, die bereits im Leerlauf existieren und die Reluktanz verstärken. Als Beispiel zur Darstellung der Effekte werden in **Bild 1** zwei Pole einer zehnpoligen Maschine gezeigt.

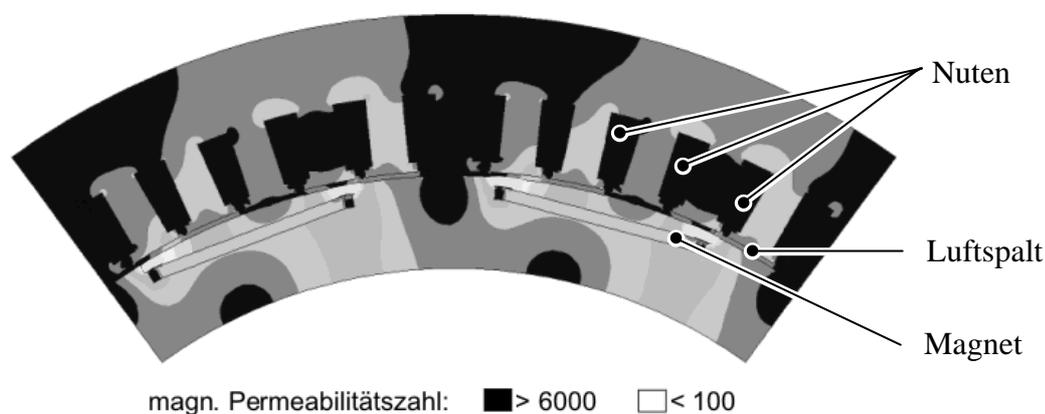


Bild 1: Sättigungszustand bei Feldschwächung

Für eine optimale Betriebsstrategie der Maschine ist der Statorstrom für einen maximalen Wirkungsgrad derart einzustellen, dass das maximale Drehmoment aus der erregerefeldbasierten Lorentzkraft und den magnetischen Anziehungskräften aus der Reluktanz erzielt wird. Für die ausgelegte Maschine bedeutet dies, dass das maximale Drehmoment nicht durch eine q-Stromkomponente allein, sondern in Kombination mit einer d-Stromkomponente erreicht wird. Dieser d-Stromanteil wirkt gleichzeitig feldschwächend, so dass der Bereich maximalen Drehmoments bei gegebener Zwischenkreisspannung im Vergleich zu einer Maschine mit Vollpoleigenschaften größer ist.

Der optimale Stromschwenkwinkel ist auch für diese Art von Schenkelpolmaschine analytisch berechenbar [7]. Allerdings ist hierfür die Kenntnis der Reaktanzen und der Polradspannung notwendig. Feldberechnungen zeigen, dass die Reaktanzen in der Polachse und der Achse in der Pollücke stark differieren können. Die Verzerrung oder Verschiebung des Erregerefeldes erschwert eine analytische Rechnung zusätzlich. Alternativ können mit numerischen Programmen Feldberechnungen für unterschiedliche Betriebspunkte durchgeführt werden. Diese gestatten es, die Verläufe der Selbst- und aller Gegeninduktivitäten über dem Drehwinkel der Maschine zu bestimmen. Die auf diese Art gewonnenen Daten lassen sich auf die Betrachtung der Grundwelle im bekannten d-q-System umrechnen. Sie werden genutzt, um auf verständliche Art Spannungsdifferenzen in Form von Zeigerdiagrammen für die Maschine darzustellen. Vergleiche mit Messungen zeigen, dass

somit trotz der variablen, stromabhängigen Sättigungszustände dieser Maschine, Spannungen und Drehmomente zuverlässig mit den klassischen Gleichungen der Schenkelpolmaschine berechenbar sind. **Bild 2** zeigt den Prüfstand, mit dem Vergleichsmessungen durchgeführt wurden und ein Zeigerdiagramm für den Feldschwächbetrieb.

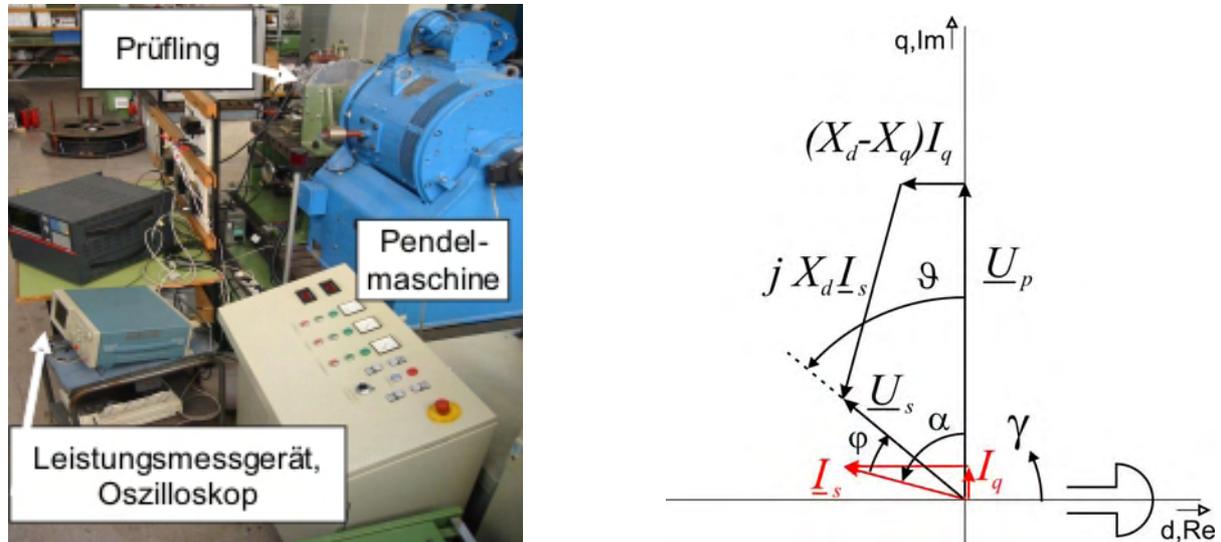


Bild 2: Prüfstand mit Messaufbau, Zeigerdiagramm für Feldschwächbetrieb

Während der Polradwinkel ϱ bei Betrieb mit niedrigen Drehzahlen noch größer als der Stromschwenkwinkel α ist, wächst der Stromwinkel mit zunehmender Drehzahl so an, dass der Leistungsfaktor 1 erreicht wird. Insgesamt wird die Maschine also im Feldschwächbereich trotz Existenz der Stromkomponente I_d mit exzellenten Leistungsfaktoren betrieben.

3 VERLUSTKENNFELD

Die Verluste in der Wicklung eines dreisträngigen Motors stellen bei niedrigen Drehzahlen den bei weitem größten Anteil der Gesamtverluste dar. Allgemein lassen sich für einen Effektivstrom I durch den Strang mit dem Widerstand R_S die ohmschen Verluste $P_{v,ohm}$ berechnen (1).

$$P_{v,ohm} = 3 \cdot I^2 R_S \quad (1)$$

Eisenverluste werden in Form von Hysterese- und Wirbelstromverlusten berücksichtigt. Ihre Berechnung kann nach [8] erfolgen und ist von den Parametern Zuschlagsfaktor k , der auf die Netzfrequenz 50 Hz und die Flussdichte 1 T normierten spezifischen Verluste σ , der Eisenmasse m_{fe} , der Flussdichte \hat{B} und der elektrischen Frequenz f abhängig (Gleichungen (2) und (3)).

$$P_{v,hys} = k_{hys} \sigma_{hys} \frac{f}{50 \text{ Hz}} \left(\frac{\hat{B}}{\text{T}} \right)^2 m_{fe} \quad (2)$$

$$P_{v,wb} = k_{wb} \sigma_{wb} \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}} \frac{\hat{B}}{\text{T}} \right)^2 m_{fe} \quad (3)$$

Solange die Zwischenkreisspannung ausreicht, kann die Maschine mit optimalem Stromschwenkwinkel gefahren werden. Erst wenn die Spannungsgrenze bei höheren Drehzahlen erreicht wird, bedarf es einer zusätzlichen Feldschwächung und daraus resultierend einer größeren Stromkomponente I_d . Für die Darstellung eines Kennfeldes wird daher die genaue Kenntnis der betriebspunktabhängigen Reaktanzen (X_d und X_q) der Maschine Voraussetzung. In **Bild 3** wird das normierte Verlustkennfeld für das ausgeführte Beispiel (maximales Drehmoment 450 Nm, maximale Drehzahl 6700 1/min) gezeigt: Im Gegensatz zu einer vergleichbaren Vollpolmaschine mit Oberflächenmagneten und Bandage fallen die Verluste bei hohen Drehzahlen deutlich geringer aus, während sie bei niedrigen Drehzahlen auf ähnlichem Niveau sind. Ein detaillierter Vergleich wird in [9] vorgenommen.

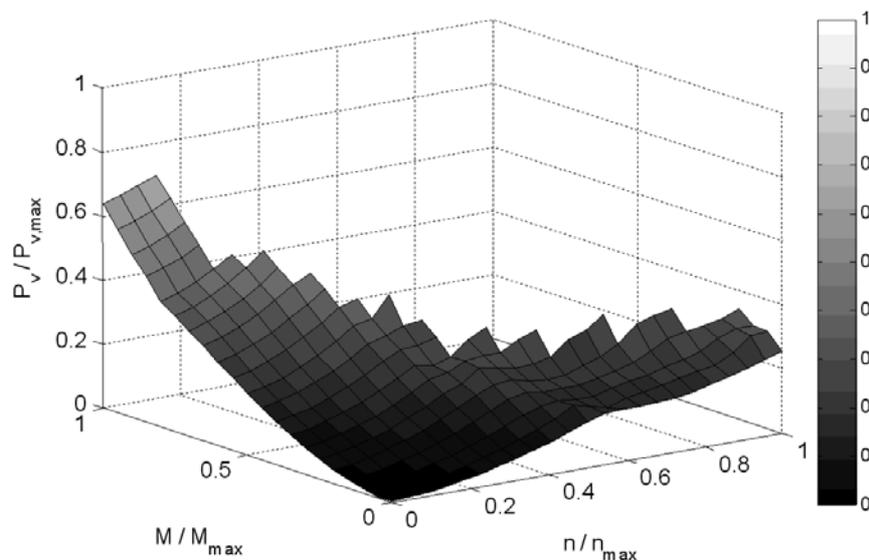


Bild 3: Berechnetes Verlustkennfeld für eine Schenkelpolmaschine mit eingebetteten Magneten und klassischer Drehstromwicklung

4 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht wurden anhand einer Beispielmachine mit eingebetteten Magneten wichtige Eigenschaften einer permanentmagneterregten Maschine mit Schenkelpolcharakter skizziert. Kombinationen mit anderen Statoren und andere Ausführungen des magnetischen Kreises im Rotor sind möglich und werden derzeit erforscht. Zusätzlich stehen für eine Optimierung eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung: Beispielsweise führen die Veränderungen von Form und Anordnung der Magnete zu anderen Maschineneigenschaften. Zusätzlich ist das Einfügen von Luftspalten aber auch die Kombination der genannten Möglichkeiten mit Optimierungsmöglichkeiten klassischer Vollpolmaschinen denkbar.

LITERATUR

- [1] J. A. Tapia, F. Leonardi, T. A. Lipo: *Consequent-Pole Permanent-Magnet Machine with extended field-weakening capability*, IEEE transactions on industry applications, Bd. 39, S. 1704 - 1709, 2003
- [2] T. Kosaka, Y. Kano, N. Matsu, C. Pollock: *A novel Multi-pole Permanent Magnet Synchronous Machine with SMC Bypass Core for magnet flux and SMC Field-pole Core with Toroidal Coil for independent field strengthening/weakening*, EPE Dresden, 2005
- [3] W. Steiger, T. Böhm, B.-G. Schulze: *Direkthybrid – eine Kombination von Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Getriebe*, VDI Berichte, Nr. 1975, S. 155 - 173, 2006
- [4] B. Krasser: *Optimierte Auslegung einer modularen Dauermagnetmaschine für ein autarkes Hybridfahrzeug*, Dissertation, TU München, 2000
- [5] A. Weschta: *Entwurf und Eigenschaften permanenterregter Synchron-Servomotoren*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1983
- [6] R. Kruse: *Neuartiger elektrischer Antrieb mit variablem Permanentmagnetfeld für Hybridfahrzeuge*, Siemens VDO, 2005
- [7] H. Wöhl-Bruhn, W.-R. Canders, R. Kube: *Trägheitsarme Elektromaschinen für Hybridfahrzeuganwendungen*, 3. Braunschweiger Symposium: Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, S. 209 - 228, 2006
- [8] K. Vogt: *Berechnung elektrischer Maschinen*, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo, 1996
- [9] H. Wöhl-Bruhn, W.-R. Canders: *Einsatz von Synchronmaschinen in leistungsverzweigten Antriebssystemen*, VDE-Kongress: Hybridantriebstechnik, Karlsruhe, S. 37 - 46, 2007