

Ansätze zur Parameteridentifikation der PMSM

Benjamin Ternes
Hochschule Bochum
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
Bochum, Germany
E-mail: benjamin.ternes@hs-bochum.de

Jan Feldkamp
Hochschule Bochum
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
Bochum, Germany
E-mail: jan.feldkamp@hs-bochum.de

Zusammenfassung—Synchronmaschinen mit Permanentmagneterregung werden in vielen Anwendungen eingesetzt. Oftmals sind dies Anwendungen, die eine hochdynamische Regelung erfordern. Aus Kosten- und Wartungsgründen wird oft auf einen Drehgeber verzichtet, die Lage wird dann „geberlos“ aus den Kenngrößen geschätzt. Die hochdynamischen „geberlosen“ Regelungen benötigen die Induktivitäten der Maschine nicht nur als konstante Größen, sondern abhängig von den momentanen Strömen [15]. Die Flussverkettung der Permanentmagnete ändert sich aufgrund von Alterungserscheinungen und Temperaturveränderungen im Laufe des Betriebs. Der ohmsche Ständerwiderstand, der sich durch Erwärmung des Ständers im Laufe des Betriebs verdoppeln kann, wird zur Drehmomentsberechnung benötigt. Induktivitäten können auf verschiedene Arten gemessen werden. Im Rahmen der Maschinenauslegung durchgeführten Finite-Elemente-Methode und Berechnung der Induktivitäten auf dieser Basis. Auf der Basis berechnete Induktivitäten entstanden im Zusammenhang mit einem vereinfachten Modell, das dennoch realistische Werte liefern soll. Bei realen Maschinen können in der Fertigungstoleranzen auftreten und zum anderen werden die Wickelköpfe der Maschinen in der FEM-Berechnung nicht berücksichtigt. Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, die Induktivitäten an der realen Maschine zu messen. Dazu werden im Folgenden zwei Ansätze zur Berechnung dargestellt: Injektion von Testsignalen im Stillstand der Maschine, die sog. differentiellen Induktivitäten zu bestimmen und bei konstanter Drehzahl die absoluten Induktivitäten zu identifizieren. Sind diese Induktivitäten gemessen, so können sie gespeichert und für die hochdynamische Regelung verwendet werden. Den ohmschen Ständerwiderstand der Synchronmaschine muss man während des Betriebes identifizieren.

Keywords—PMSM, Identifikation, Induktivitäten

I. MATHEMATISCHES MODELL DER PMSM

Grundlegende Beschreibungen elektrischer Maschinen liefern Standardwerke, wie z. B. [23, 22, 5, 32]. In der vorliegenden Arbeit sind die in der Regel verwendeten linearisierten Spannungsgleichungen mit konstanten elektrischen Parametern allerdings nicht mehr ausreichend. In dieser Arbeit werden Ansätze zur Erweiterung der linearisierten Gleichungen dargestellt. Einige Ansätze unterteilen die absoluten Induktivitäten L_d und L_q in zwei Selbst- und Gegeninduktivitäten. Bei [35] sind dabei sowohl die Selbst- als auch die Gegeninduktivität jeweils von den Strömen i_d und i_q abhängig. In dieser Arbeit wird eine absolute Induktivität in d - und q -Richtung verwendet. Dies hat den Vorteil, dass bei Vereinfachungen wieder ein lineares Gleichungssystem entsteht. Dabei werden allerdings die Eisenverluste nicht berücksichtigt. Diese sind aber notwendig, um Induktivitäten zu messen und insbesondere den ohmschen Ständerwiderstand zu identifizieren [15]. Alle

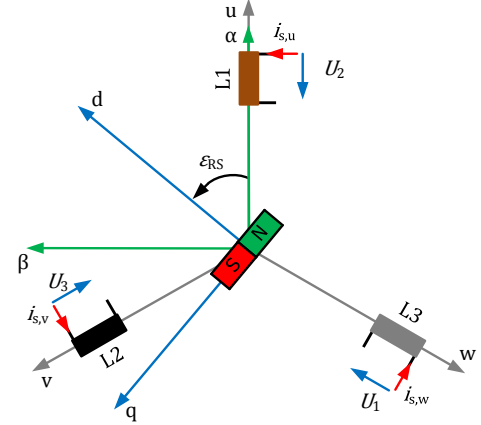


Abbildung 1. Graphische Veranschaulichung der verschiedenen Koordinatensysteme, ständerfest (α, β) und rotorfest (d, q).

folgenden Anpassungen des Maschinenmodells beziehen sich weiterhin nur auf das Grundwellenverhalten der Maschine. Eine zusätzliche Betrachtung der Oberwelleneffekte wird innerhalb dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Reduziert man die Synchronmaschine auf ihre grundlegenden elektrischen Eigenschaften so ergibt sich nach Abb. I: Drei Induktivitäten im Ständerblechpaket zusammen mit dem Permanentmagneten im Läufer.

Nach Ternes und Feldkamp [38] und Transformation in das ständerfeste (α, β)-Koordinatensystem ergibt sich die Spannungsleichung im rotorfesten System zu

$$u_d = R_1 i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_{el} \Psi_q \quad (1)$$

$$u_q = R_1 i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_{el} \Psi_d \quad (2)$$

Allgemein lässt sich das daraus resultierende innere Drehmoment als

$$M_i = \frac{3}{2} P_{si}^{d,q} \times \underline{i}^{d,q} \quad (3)$$

beschreiben. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Ständerwicklung symmetrisch und dreiphasig ist, der Strombelag nach

Ternes und Feldkamp [38] sinusförmig über dem Umfang verteilt und kein Nullsystem vorliegt. Das innere Drehmoment M_i für eine Maschine mit p Polpaaren kann nach der Berechnung des Vektorproduktes als

$$M_i = \frac{3p}{2}(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (4)$$

definiert werden. Um das System vollständig zu beschreiben fehlt noch die Bewegungsgleichung nach Müller [22].

$$M_i - M_L = J \frac{d}{dt} \omega_{mech} \quad (5)$$

Bei diesem Modell sind alle Parameter konstant, die Ableitungen der Flussverkettungen, die in Gl. 1 und Gl. 2 verwendet werden unkompliziert zu bestimmen. Aufgrund von Sättigungseffekten des Eisens sind insbesondere bei hochausgenutzten Maschinen die Induktivitäten der Synchronmaschine nicht mehr konstant, sondern vom Motorstrom abhängig [15].

A. Linearisierte Gleichungen

Bei dem linearisierten Modell sind definitionsgemäß [23] keine Sättigungserscheinungen vorhanden. Alle elektrischen Parameter der Permanentmagnet-erregten Synchronmaschine und damit auch die Induktivitäten sind damit konstant. Aus dieser Annahme folgt nach Ternes und Feldkamp [38], dass sich in läuferfesten d, q -Komponenten

$$\Psi_d = \Psi_p m + L_d i_d \quad (6)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (7)$$

ergeben. Die in d -Achse ausgerichteten Permanentmagnete rufen eine als konstant angenommene Flussverkettung $\Psi_p m$ hervor. Daraus ergeben sich in Gl. 1, Gl. 2 und Gl. 3 eingesetzt – die Grundgleichungen des linearen Maschinenmodells

$$u_d = R_1 i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_{el} L_q i_q \quad (8)$$

$$u_q = R_1 i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_{el} L_d i_d + \omega_{el} \Psi_p m \quad (9)$$

$$M_i = \frac{3p}{2}(\Psi_p m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (10)$$

Die Spannungsgleichungen lassen sich gemäß Abb. I-A graphisch darstellen.

LITERATUR

- [1] Andreas Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Übungsbuch - Aufgaben mit Lösungsweg*. Berlin: Springer, 2012.
- [2] Ekkehard Bolte. *Elektrische Maschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. (Besucht am 14.07.2014).
- [3] I. N. Bronstein u. a. *Taschenbuch der Mathematik*. 8. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2012.

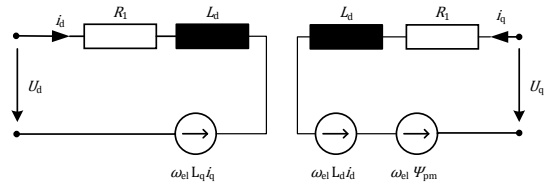


Abbildung 2. Graphische Darstellung der Gleichungen 9 und 8.

- [4] Rainer Felderhoff und Udo Busch. *Leistungselektronik*. 4. Aufl. München: Hanser, 2006.
- [5] Rolf Fischer. *Elektrische Maschinen*. 14. Aufl. München: Hanser, 2009.
- [6] Klaus Fuest und Peter Döring. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Lehr- und Arbeitsbuch ; mit zahlreichen durchgerechneten Beispielen und Übungen sowie Fragen und Aufgaben zur Vertiefung des Lehrstoffes*. Wiesbaden: Vieweg, 2004.
- [7] Fabio Genduso u. a. „Back-EMF Sensorless Control Algorithm for High Dynamics Performances PMSM“. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions* 57 (2010), S. 2092–2100.
- [8] Wolfgang Gerke. *Elektrische Maschinen und Aktoren: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 2012. (Besucht am 13.07.2014).
- [9] M. Glasl und B. Wittmann. „Feldorientierte Regelung der Permanentmagnet-Synchronmaschine auf Basis des Drehzahlwertes mit Winkelfehlerkorrektur“. In: *e & i* 120 (2003).
- [10] Rayk Grune. „Verlustoptimaler Betrieb einer elektrisch erregten Synchronmaschine für den Einsatz in Elektrofahrzeugen“. Dissertation. TU Berlin, 2012.
- [11] Gert Hagmann. *Grundlagen der Elektrotechnik*. 13. Aufl. Ulm: AULA, 2008.
- [12] Ulrich Hahn. *Physik für Ingenieure*. München: Oldenbourg, 2007.
- [13] Heino Henke. *Elektromagnetische Felder: Theorie und Anwendung*. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2011.
- [14] Wilfried Hofmann. *Elektrische Maschinen*. München [u.a.]: Pearson, 2013.
- [15] Sven Kellner. „Parameteridentifikation bei permanent-erregten Synchronmaschinen“. Dissertation. TU Erlangen-Nürnberg, 2012.
- [16] Michael Knorrenschild. *Mathematik für Ingenieure 2: Angewandte Analysis im Bachelorstudium*. München: Hanser, 2014.
- [17] K. Kovács und I. Rácz. *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*. Budapest: Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften, 1959.
- [18] Andreas Kremser. *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Stuttgart [u.a.]: Teubner, 2004.
- [19] W. Leitgeb. „Eine Möglichkeit der Feldschwächung dauermagnet-erregter Maschinen und ihre Auswirkung auf die Bemessungsleistung des Stromrichters“. In: *Archiv für Elektrotechnik* 76 (1993), S. 293–299.
- [20] Holger Lutz und Wolfgang Wendt. *Taschenbuch der Regelungstechnik*. 9. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2012.

- [21] H. Mosebach. „Einfache analytische Rechenmodelle für permanentmagneterrregte Synchronmaschinen“. In: *Electrical Engineering* 81 (1998), S. 171–176.
- [22] Gernar Müller. *Elektrische Maschinen*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [23] Gernar Müller, Karl Vogt und Bernd Ponick. *Berechnung elektrischer Maschinen*. Weinheim: Wiley-VCH-Verl., 2008.
- [24] Uwe Nuss. *Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe*. Berlin; Offenbach: VDE-Verl., 2010.
- [25] Lothar Papula. *Mathematische Formelsammlung*. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2003.
- [26] Lothar Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Band 1, Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium*. 12. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [27] Lothar Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Band 2, Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium*. 12. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
- [28] Hector Perassi. „Feldorientierte Regelung der permanenterrregten Synchronmaschine ohne Lagegeber für den gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand“. Dissertation. TU Ilmenau, 2006.
- [29] Jabid Quiroga, David Cartes und Chris Edrington. „NEURAL NETWORK BASED SYSTEM IDENTIFICATION OF A PMSM UNDER LOAD FLUCTUATION“. In: *Dyna* 160 (2009), S. 273–282.
- [30] Ulrich Riefenstahl. *Elektrische Antriebssysteme: Grundlagen, Komponenten, Regelverfahren, Bewegungssteuerung*. 3. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [31] Helmut Scherf. *Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme eine Sammlung von Simulink-Beispielen*. München: Oldenbourg, 2010.
- [32] Dierk Schröder. *Elektrische Antriebe: Grundlagen*. Berlin [u.a.]: Springer, 2000.
- [33] Dierk Schröder. *Regelung von Antriebssystemen*. Berlin [u.a.]: Springer, 2001.
- [34] Horst Stöcker. *Taschenbuch der Physik*. 6. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2010.
- [35] B. Sturmberger u. a. „Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor“. In: *Industrial Applications, IEEE Transactions* 39 (2003), S. 1264–1271.
- [36] Benjamin Ternes. „Beitrag zur internationalen ANSYS Konferenz in Kassel – Simulation des Synchronprozesses“. In: *Nutzung des Tools EM-Praktikum und ANSYS in den Lehrveranstaltungen der Elektrischen Maschinen*. CADFEM. 2012, S. 108–112.
- [37] Benjamin Ternes. „Softwaregestützte Berechnung von Stator- und Rotoroberströmen in Abhängigkeit der Drehzahl eines asynchronen Käfigläufermotors auf Basis der Oberfeldtheorie“. Bachelorarbeit. FH Dortmund, University of Applied Science und Arts, 2013.
- [38] Benjamin Ternes und Jan Feldkamp. „Modellbasierte Implementierung einer Feldorientierten Regelung“. Projektarbeit. HS Bochum, 2014.
- [39] Heinz Unbehauen. *Regelungstechnik I: Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*. 15. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [40] Heinz Unbehauen. *Regelungstechnik II: Zustandsregelungen, digitale und nichtlineare Regelsysteme*. Auflage: 9., durchges. u. korr. Aufl. 2007. 2., korr. Nachdruck 2009. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009. 447 S.
- [41] Heinz Unbehauen. *Regelungstechnik III: Identifikation, Adaption, Optimierung*. Auflage: 7., korr. Aufl. 2011. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. 616 S.
- [42] Henning Wökl-Bruhn. „Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe“. Dissertation. TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2009.