Ansätze zur Parameteridentifikation einer PMSM

Benjamin Ternes

Hochschule Bochum
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik

24. November 2014

GitHub

GitHub: `http://github.com/benjiternes/ident.git`

Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM
Linearisierte Gleichungen
Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation
Bestimmung der Rotorlage
Identifikation der Induktivitäten und des Ständerwiderstandes

4. Parameterfehler

Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM
Linearisierte Gleichungen
Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation
Bestimmung der Rotorlage
Identifikation der Induktivitäten und des Ständerwiderstandes

4. Parameterfehler

Allgemeines

- PMSM in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen (vorallem kleinen bis mittleren Leistungen)
- Hochdynamische Antriebsmotoren (hochdynamische Regelung)
- Hochdynamische Regelungen benötigen die »Induktivitäten« der Maschine (abh. vom momentanen Strom)
- Flussverkettung Ψ ändert sich aufgrund von Alterungserscheinungen und Temperaturveränderungen
- Ohmscher Ständerwiderstand kann sich im Betrieb fast verdoppeln

Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM

Linearisierte Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation

Bestimmung der Rotorlage

Identifikation der Induktivitäten und des Ständerwiderstandes

4. Parameterfehler

Koordinatensysteme

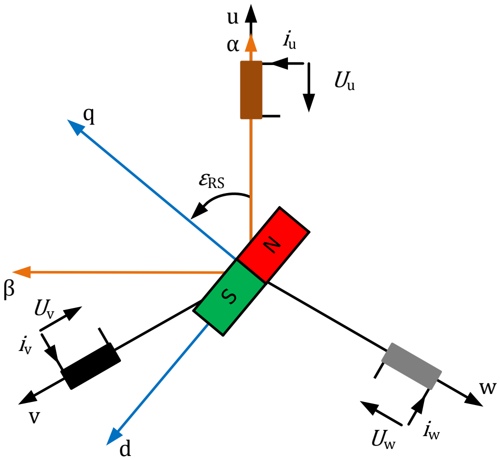


Abbildung: Graphische Veranschaulichung der verschiedenen Koordinatensysteme, ständerfest (α, β) und rotorfest (d, q).

Linearisierte Gleichungen

Linearisierte Gleichungen

- Definitionsgemäß sind keine Sättigungserscheinungen vorhanden (Müller, Vogt und Ponick 2008; Schröder 2001)

Linearisierte Gleichungen

- Definitionsgemäß sind keine Sättigungserscheinungen vorhanden (Müller, Vogt und Ponick 2008; Schröder 2001)
- Alle elektrischen Parameter einer PMSM und damit auch die Induktivitäten sind konstant

Linearisierte Gleichungen

Spannungsgleichungen des linearisierten Modells

$$u_\mathrm{d} = R_1 i_\mathrm{d} + L_\mathrm{d} \frac{\mathrm{d} i_\mathrm{d}}{\mathrm{d} t} - \omega_\mathrm{el} L_\mathrm{q} i_\mathrm{q} \tag{1}$$

$$u_\mathrm{q} = R_1 i_\mathrm{q} + L_\mathrm{q} \frac{\mathrm{d} i_\mathrm{q}}{\mathrm{d} t} + \omega_\mathrm{el} L_\mathrm{d} i_\mathrm{d} + \omega_\mathrm{el} \Psi_\mathrm{pm} \tag{2}$$

$$M_\mathrm{i} = \frac{3p}{2} (\Psi_\mathrm{pm} i_\mathrm{q} + (L_\mathrm{d} - L_\mathrm{q}) i_\mathrm{d} i_\mathrm{q}) \tag{3}$$

(vgl. Schröder (2001))

Linearisierte Gleichungen

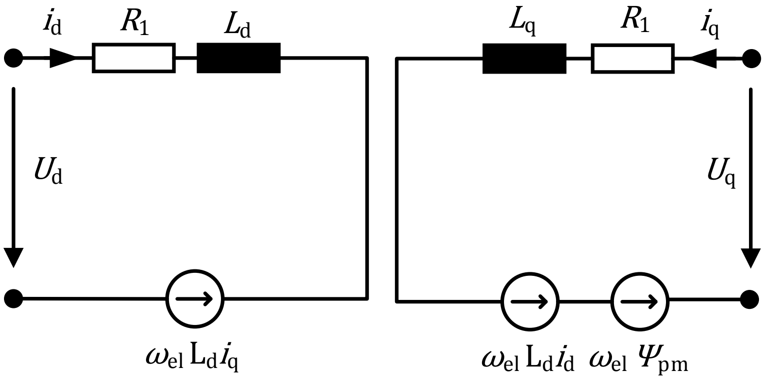


Abbildung: Graphische Darstellung der Gleichungen Gl. (1) und Gl. (2).

Allgemeine Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

- Induktivitäten ändern sich $\rightarrow$ abhängigkeit: Belastung

Allgemeine Gleichungen

- Induktivitäten ändern sich $\rightarrow$ abhängigkeit: Belastung
- Grund: Sättigungseffekte, Kreuzkopplung – entsteht durch Beeinflussung der verkoppelten Induktivitäten

Allgemeine Gleichungen

- Induktivitäten ändern sich $\rightarrow$ abhängigkeit: Belastung
- Grund: Sättigungseffekte, Kreuzkopplung – entsteht durch Beeinflussung der verkoppelten Induktivitäten
- z. B. in der realen Maschine verlaufen die Ströme i_d und i_q in dem gleichen Ständerblech

Allgemeine Gleichungen

- Induktivitäten ändern sich → abhängigkeit: Belastung
- Grund: Sättigungseffekte, Kreuzkopplung – entsteht durch Beeinflussung der verkoppelten Induktivitäten
- z. B. in der realen Maschine verlaufen die Ströme i_{d} und i_{q} in dem gleichen Ständerblech
- Bei Verwendung der linearen Gleichungen (s. h. Folie 9) werden Sättigungseffekte vernachlässigt

Allgemeine Gleichungen

- Induktivitäten ändern sich → abhängigkeit: Belastung
- Grund: Sättigungseffekte, Kreuzkopplung – entsteht durch Beeinflussung der verkoppelten Induktivitäten
- z. B. in der realen Maschine verlaufen die Ströme i_{d} und i_{q} in dem gleichen Ständerblech
- Bei Verwendung der linearen Gleichungen (s. h. Folie 9) werden Sättigungseffekte vernachlässigt
- Unter Berücksichtigung der Eisenverluste bzw. Wirbelstromverluste reichen die Gleichungen nicht mehr aus (Müller, Vogt und Ponick 2008)

Neue Gleichungen für Ψ_{d} und Ψ_{q}

Neue Gleichungen für Ψ_d und Ψ_q

- Einige Ansätze unterteilen die Induktivitäten in Selbst- und Gegeninduktivitäten (Stumberger u. a. 2003)

Neue Gleichungen für Ψ_d und Ψ_q

- Einige Ansätze unterteilen die Induktivitäten in Selbst- und Gegeninduktivitäten (Stumberger u. a. 2003)
- Dabei sind sowohl die Selbst- als auch die Gegeninduktivität jeweils von den Strömen abhängig $\rightarrow$ Hysterese

Neue Gleichungen für Ψ_d und Ψ_q

- Einige Ansätze unterteilen die Induktivitäten in Selbst- und Gegeninduktivitäten (Stumberger u. a. 2003)
- Dabei sind sowohl die Selbst- als auch die Gegeninduktivität jeweils von den Strömen abhängig → Hysterese

$$\Psi_\mathrm{d} = \Psi_\mathrm{pm} + L_\mathrm{dd}^{\xi}(i_\mathrm{d}) \cdot i_\mathrm{d} + L_\mathrm{dq}^{\xi}(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q}) \cdot i_\mathrm{q} \tag{4}$$

$$\Psi_\mathrm{q} = L_\mathrm{qq}^{\xi}(i_\mathrm{q}) \cdot i_\mathrm{q} + L_\mathrm{qd}^{\xi}(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q}) \cdot i_\mathrm{d} \tag{5}$$

(vgl. Stumberger u. a. (2003))

Darstellungsweise der Induktivitäten

Darstellungsweise der Induktivitäten

Nach Kellner (2012) ist es möglich die Induktivitäten intuitiv darzustellen als:

Darstellungsweise der Induktivitäten

Nach Kellner (2012) ist es möglich die Induktivitäten intuitiv darzustellen als:

$$L_{\mathrm{d}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} = L_{\mathrm{dd}}^{\xi}(i_{\mathrm{d}}) + L_{\mathrm{dq}}^{\xi}(i_{\mathrm{d}}, i_{\mathrm{q}}) \cdot \frac{i_{\mathrm{q}}}{i_{\mathrm{d}}} \tag{6}$$

$$L_{\mathrm{q}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} = L_{\mathrm{qq}}^{\xi}(i_{\mathrm{q}}) + L_{\mathrm{qd}}^{\xi}(i_{\mathrm{d}}, i_{\mathrm{q}}) \cdot \frac{i_{\mathrm{d}}}{i_{\mathrm{q}}} \tag{7}$$

Darstellungsweise der Induktivitäten

Nach Kellner (2012) ist es möglich die Induktivitäten intuitiv darzustellen als:

$$L_{\mathrm{d}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} = L_{\mathrm{dd}}^{\xi}(i_{\mathrm{d}}) + L_{\mathrm{dq}}^{\xi}(i_{\mathrm{d}}, i_{\mathrm{q}}) \cdot \frac{i_{\mathrm{q}}}{i_{\mathrm{d}}} \quad (6)$$

$$L_{\mathrm{q}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} = L_{\mathrm{qq}}^{\xi}(i_{\mathrm{q}}) + L_{\mathrm{qd}}^{\xi}(i_{\mathrm{d}}, i_{\mathrm{q}}) \cdot \frac{i_{\mathrm{d}}}{i_{\mathrm{q}}} \quad (7)$$

$\rightarrow$ Mehrwert wegen Trennung der Selbst- und Gegeninduktivität?

Anhand Folie 13 lassen sich damit die Flussverkettung von Folie 12 vereinfachen:

Anhand Folie 13 lassen sich damit die Flussverkettung von Folie 12 vereinfachen:

Flussverkettungen der allgemeinen Maschinengleichungen

$$\Psi_{\mathrm{d}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} = \Psi_{\mathrm{pm}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} + L_{\mathrm{d}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} \cdot i_{\mathrm{d}} \tag{8}$$

$$\Psi_{\mathrm{q}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} = L_{\mathrm{q}}^{(i_{\mathrm{d}},i_{\mathrm{q}})} \cdot i_{\mathrm{q}} \tag{9}$$

Diese Darstellungsweise ist kürzer und übersichtlicher

Allgemeine Maschinengleichungen in Zustandsform

$$\begin{pmatrix} u_\mathrm{d} \\ u_\mathrm{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & -\omega_\mathrm{el} L_\mathrm{q}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} \\ \omega_\mathrm{el} L_\mathrm{d}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} & R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\mathrm{d} \\ i_\mathrm{q} \end{pmatrix} \tag{10}$$

$$\ldots + \underbrace{\begin{pmatrix} L_\mathrm{dd}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} & L_\mathrm{dq}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} \\ L_\mathrm{qd}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} & L_\mathrm{qq}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} \end{pmatrix}}_{\text{differentielle Induktivitäten}} \begin{pmatrix} \dot{i}_\mathrm{d} \\ \dot{i}_\mathrm{q} \end{pmatrix}$$

$$\ldots + \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \Psi_\mathrm{pm}^{(i_\mathrm{q})} \\ \omega_\mathrm{el} \Psi_\mathrm{pm}^{(i_\mathrm{q})} \end{pmatrix}$$

in Anlehnung an (Kellner 2012).

Spannungsgleichungen der allgemeinen Maschinengleichungen

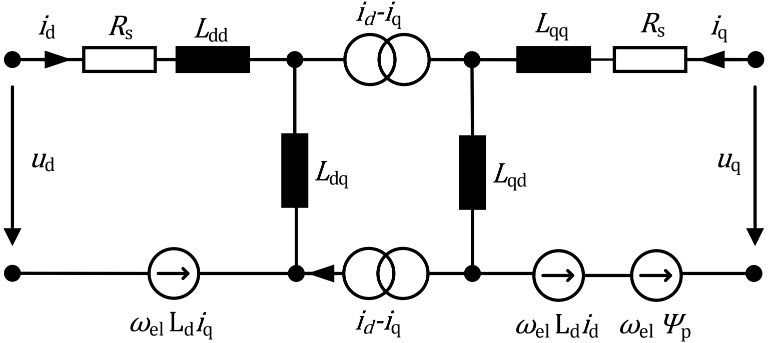


Abbildung: Graphische Darstellung der Gleichungen (Gl. 10).

Agenda

1. **Einleitung**

2. **Mathematisches Modell einer PMSM**
   Linearisierte Gleichungen
   Allgemeine Gleichungen

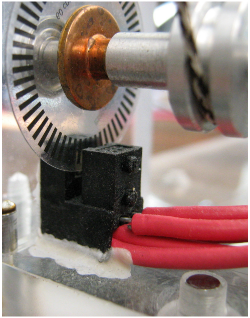
3. **Ansätze zur Identifikation**
   Bestimmung der Rotorlage
   Identifikation der Induktivitäten und des Ständerwiderstandes

4. **Parameterfehler**

Bestimmung der Rotorlage

- Geberlosen Regelung: Keinen Wartungsaufwand, geringere Kosten $\rightarrow$ keine Rotorposition bei niedrigen Drehzahlen? (Prinzip: Blockkommutierung durch das zurückmessen der im Motor induzierten Gegenspannung)
- Resolvers: Absolutwert der Rotorposition $\rightarrow$ Wartungsaufwand und höhere Kosten
- Inkrementalgeber: ist nicht sinnvoll, zu ungenau.

Überblick



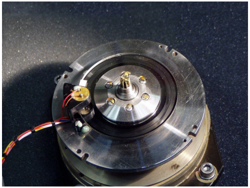


Abbildung: Links: Inkrementalgeber mit Gabellichtschranke, Autor: Tycho. Mitte: Resolver, Quelle: MICRONOR – Hollow Shaft Standard Resolver, Size 15: RE3616 . x. Rechts: Optischer Encoder, 16834 Impulse pro Umdrehung. Autor: Charly Whisky.

Geberlose Regelung

- Testsignalverfahren für niedrige Drehzahlen
- Differentieller Schenkligkeitskoeffizient
- EMK-Verfahren für hohe Drehzahlen

Online Identifikation?

- Ansätze dazu in (Underwood und Husain 2010)
- Zweifelhafte Stabilität und Genauigkeit in (Underwood und Husain 2010)
- → Bisherige Online Messverfahren gelangen an ihre Grenze, die Notwendigkeit wird in Frage gestellt:

»Zum einen ändern sich die Induktivitäten im Wesentlichen nur abhängig von den Strömen i_d und i_q, kaum aufgrund von anderen äußeren Umgebungseinflüssen beziehungsweise Prüfstandsparametern, wie zum Beispiel Temperatur oder Drehzahl des Systems (Kellner 2012, S. 79).«

Absolute und differentielle Induktivitäten

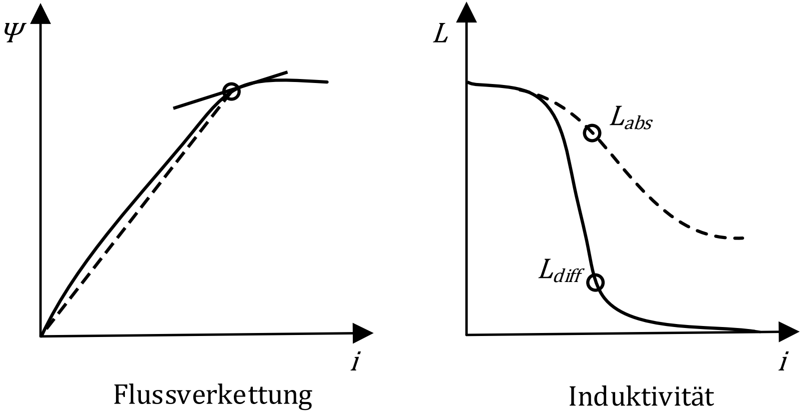


Abbildung: Prinzipielle Darstellung der Beziehung zwischen absoluter und differentieller Induktivität in Anlehnung an Kellner und Piepenbreier (2011, S. 2).

Absolute Induktivitäten

Theorie zur Messung der absoluten Induktivitäten

- Für eine konstante Drehzahl wird ein $(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})$-Strompaar eingeprägt
- Für diesen Zustand werden die d, q-Spannungen und die Drehzahl gemessen
- Daraus lassen sich die Induktivitäten $L_\mathrm{d}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})}$ und $L_\mathrm{q}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})}$ berechnen

$$L_\mathrm{d}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} = \frac{\Psi_\mathrm{d}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} - \Psi_\mathrm{d}^{(i_\mathrm{d}=0, i_\mathrm{q})}}{i_\mathrm{d}} \tag{11}$$

$$L_\mathrm{q}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} = \frac{\Psi_\mathrm{q}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q})} - \Psi_\mathrm{q}^{(i_\mathrm{d}, i_\mathrm{q}=0)}}{i_\mathrm{q}} \tag{12}$$

(vgl. Kellner (2012))

Identifikation in der Praxis

1. Jede Kombination aus i_{d}- und i_{q}-Strömen; Lastmaschine muss einen const. Drehzahlsollwert realisieren können
2. Konstante mittlere Drehzahl
3. Über den Messbereich werden einzelne Betriebspunkte eingestellt
4. Stationärer Zustand $\rightarrow$ Messwerte werden gespeichert
5. Induktivitäten werden gemäß Gleichungen berechnet

Differentielle Induktivitäten

- Nur notwendig, wenn Stromänderung vorhanden (dynamische Vorgänge)

Theorie zur Messung von differentiellen Induktivitäten

- Überlagerung mit einem hochfrequenten Signal
- Zu den stationären Arbeitspunkten wird ein hochfrequentes Testsignal addiert
- Aus der hochfrequenten Sprungantwort lässt sich die differentielle Induktivität berechnen

Identifikation in der Praxis

1. Bestimmung des Ständerwiderstandes
2. Einstellen der Strompaare
3. Einprägung eines Testsignals mit einer vorgegebenen Frequenz in q-Richtung
4. $\rightarrow (L_{\mathrm{qq}}, L_{\mathrm{dq}})$
5. Einprägung eines Testsignals mit einer vorgegebenen Frequenz in d-Richtung
6. $\rightarrow (L_{\mathrm{dd}}, L_{\mathrm{qd}})$

Ständerwiderstand und -temperatur

Viele Autoren verwenden MRAC-Algorithmen »(model-reference adaptive control)« zur Identifikation des Ständerwiderstandes

MRAC-Alrogrithmus

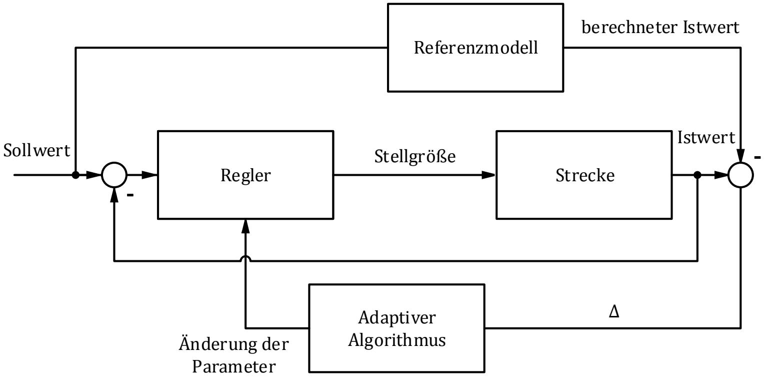


Abbildung: Prinzipielle Darstellung eines MRAC-Systems in Anlehnung an Slotine (1991).

Ständerwiderstand und -temperatur

»Wenn die Parameter der PMSM nicht genau bekannt sind, dann ist es auch nicht möglich, ein genaues Referenzmodell der Maschine zu erstellen, weil dieses ja in irgendeiner Weise die Parameter enthalten müsste. (Kellner 2012, S. 139)«

Konventioneller Ansatz – u_d-Spannungsgleichung

- Auswertung der u_d-Spannungsgleichung
- $\rightarrow$ so beschreibt die u_d-Spannungsgleichung das Modell für ideal bekannte Parameter
- u_d wird von der feldorientierten Regelung als Grundlage für den Spannungsraumzeiger ausgegeben

Konventioneller Ansatz – u_d-Spannungsgleichung

- Auswertung der u_d-Spannungsgleichung
- $\rightarrow$ so beschreibt die u_d-Spannungsgleichung das Modell für ideal bekannte Parameter
- u_d wird von der feldorientierten Regelung als Grundlage für den Spannungsraumzeiger ausgegeben
- $\rightarrow$ unpraktisch da, ein feldschwächender Strom vorhanden sein muss, um die Widerstandsdifferenz zu berechnen (Kellner 2012)

Konventioneller Ansatz – u_{d}-Spannungsgleichung

- Auswertung der u_{d}-Spannungsgleichung
- $\rightarrow$ so beschreibt die u_{d}-Spannungsgleichung das Modell für ideal bekannte Parameter
- u_{d} wird von der feldorientierten Regelung als Grundlage für den Spannungsraumzeiger ausgegeben
- $\rightarrow$ unpraktisch da, ein feldschwächender Strom vorhanden sein muss, um die Widerstandsdifferenz zu berechnen (Kellner 2012)
- $\rightarrow$ Energetische Gründe, prinzipiell möglich

Identifikation mit Testsignalen

- Einprägung von niederfrequenten i_{d}-Strom-Testsignalen
- Unterschied: Art der Einprägung und Auswertung der Sprungantwort

»Das entwickelte Verfahren beruht auf der Annahme, dass die relevanten Störungen der Messsignale zum Teil Gleichtaktstörungen beziehungsweise Offsetfehler sind (Kellner 2012, S. 148).«

Ständertemperatur

- Hängt immer mit der Identifikation des Ständerwiderstandes zusammen
- Ständerwiderstand bekannt $\rightarrow$ Temperatur bekannt

»Die Ansätze in der Literatur zeigen, dass der an sich oft selbst gestellte Anspruch an die Genauigkeit der Temperaturberechnung nur selten erreicht werden kann. (Kellner 2012, S. 175).«

$$R_1 = R_{1,\mathrm{ref}} \cdot (1 + \alpha_{\mathrm{Cu}}(\vartheta_1 - \vartheta_{\mathrm{ref}})) \tag{13}$$

Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM

Linearisierte Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation

Bestimmung der Rotorlage

Identifikation der Induktivitäten und des Ständerwiderstandes

4. Parameterfehler

Parameterfehler

- Je größer der Fehler, desto weniger bilden die Modelle die Realität ab
- Die Parameter R_1, $L_{\mathrm{d,q}}$ und Ψ_{pm} können nicht direkt gemessen werden
- Fehlerforpflanzung
- Probleme bei der »geberlosen Regelung«
- Fehler: Messgrößen sind Ungenauigkeiten der Umrichterlinearisierung oder Toleranzen der Stromsensoren

Bibliography I

Fischer, R. (2009). *Elektrische Maschinen*. 14. Aufl. München: Hanser.

Genduso, F. u. a. (2010). »Back-EMF Sensorless Control Algorithm for High Dynamics Performances PMSM«. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions* 57, S. 2092–2100.

Kellner, S. L. (2012). »Parameteridentifikation bei permanenterregten Synchronmaschinen«. Dissertation. TU Erlangen-Nürnberg.

Bibliography II

Kellner, S. L. und B. Piepenbreier (2011). »General PMSM d, q-model using optimized interpolated absolute and differential inductance surfaces«. In: *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*. IEEE, S. 212–217. (Besucht am 31. 10. 2014).

Müller, G., K. Vogt und B. Ponick (2008). *Berechnung elektrischer Maschinen*. Weinheim: Wiley-VCH-Verl.

Perassi, H. (2006). »Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine ohne Lagegeber für den gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand«. Dissertation. TU Ilmenau.

Bibliography III

- Schröder, D. (2001). *Regelung von Antriebssystemen*. Berlin [u.a.]: Springer.
- Slotine, J.-J. E. (1991). *Applied nonlinear control*. Unter Mitarb. von W. Li. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall. 459 S.
- Stumberger, B. u. a. (2003). »Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor«. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 39.5, S. 1264–1271. (Besucht am 31. 10. 2014).

Bibliography IV

Ternes, B. (2012). »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, S. 108–112.

Ternes, B. und J. Feldkamp (2014). »Modellbasierte Implementierung einer Vektorregelung«. Studienarbeit. HS Bochum.

Bibliography V

Underwood, S. und I. Husain (2010). »Online Parameter Estimation and Adaptive Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines«. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57.7, S. 2435–2443. (Besucht am 31. 10. 2014).

Wökl-Bruhn, H. (2009). »Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe«. Dissertation. TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Fragen?