

Ansätze zur Parameteridentifikation einer PMSM

Benjamin Ternes

Hochschule Bochum
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik

12. November 2014

Autor

Benjamin Ternes

- VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.) Mitglied, Bezirk Düsseldorf
<http://www.vde.com/>
- IEEE <https://www.ieee.org/index.html>
- Dante e. V. Mitglied – Deutschsprachige Anwendervereinigung TeX e. V. <http://www.date.de/>

Publikationen:

B. Ternes (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

Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM

Linearisierte Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation

Bestimmung der Rotorlage

Ansätze zur Identifikation der Induktivitäten, Ständerwiderstand und Flussverkettung

4. Parameterfehler

Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM

Linearisierte Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation

Bestimmung der Rotorlage

Ansätze zur Identifikation der Induktivitäten, Ständerwiderstand und Flussverkettung

4. Parameterfehler



Allgemeines



Allgemeines

- PMSM in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen (vorallem kleinen bis mittleren Leistungen)

Allgemeines

- PMSM in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen (vorallem kleinen bis mittleren Leistungen)
- Hochdynamische Antriebsmotoren (hochdynamische Regelung)

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)

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



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

Ansätze zur Identifikation der Induktivitäten, Ständerwiderstand und Flussverkettung

4. Parameterfehler

Koordinatensysteme

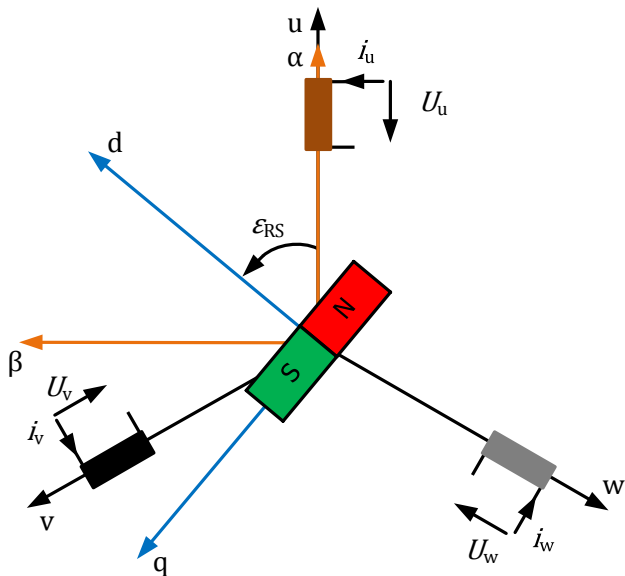


Abbildung: Graphische Veranschaulichung der verschiedenen



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

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

$$\Psi_d = \Psi_{pm} + L_d i_d \quad (1)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (2)$$

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

(vgl. Schröder (2001))

Linearisierte Gleichungen

Spannungsgleichungen des linearisierten Modells

$$u_d = R_1 i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_{el} L_q i_q \quad (4)$$

$$u_q = R_1 i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_{el} L_d i_d + \omega_{el} \psi_{pm} \quad (5)$$

$$M_i = \frac{3p}{2} (\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (6)$$

(vgl. Schröder (2001))

Linearisierte Gleichungen

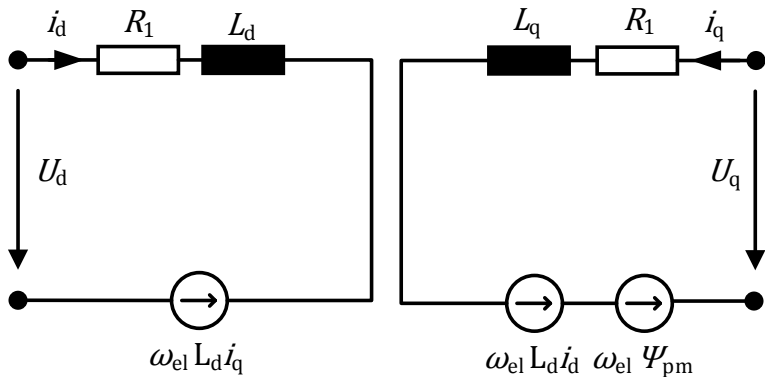


Abbildung: Graphische Darstellung der Gleichungen Gl. (4) und Gl. (5).

Allgemeine Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

- Induktivitäten ändern sich → abhängigkeit: Belastung

Allgemeine Gleichungen

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



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 (Kellner 2012)



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 (Kellner 2012)
- 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 (Kellner 2012)
- Bei Verwendung der linearen Gleichungen (s. h. Folie 9) werden Sättigungseffekte vernachlässigt
- Unter Berücksichtigung der Eisenverluste bzw. Wirbelstromverluste reichen die Gleichungen nicht mehr aus

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 → 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

$$\Psi_d = \Psi_{pm} + L_{dd}^{\xi}(i_d) \cdot i_d + L_{dq}^{\xi}(i_d, i_q) \cdot i_q \quad (7)$$

$$\Psi_q = L_{qq}^{\xi}(i_q) \cdot i_q + L_{qd}^{\xi}(i_d, i_q) \cdot i_d \quad (8)$$

(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:

$$L_d^{(i_d, i_q)} = L_{dd}^{\xi}(i_d) + L_{dq}^{\xi}(i_d, i_q) \cdot \frac{i_q}{i_d} \quad (9)$$

$$L_q^{(i_d, i_q)} = L_{qq}^{\xi}(i_q) + L_{qd}^{\xi}(i_d, i_q) \cdot \frac{i_d}{i_q} \quad (10)$$



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

$$\psi_d^{(i_d, i_q)} = \psi_{pm}^{(i_d, i_q)} + L_d^{(i_d, i_q)} \cdot i_d \quad (11)$$

$$\psi_q^{(i_d, i_q)} = L_q^{(i_d, i_q)} \cdot i_q \quad (12)$$

Diese Darstellungsweise ist kürzer und übersichtlicher

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

Flussverkettungen der allgemeinen Maschinengleichungen

$$\psi_d^{(i_d, i_q)} = \psi_{pm}^{(i_d, i_q)} + L_d^{(i_d, i_q)} \cdot i_d \quad (11)$$

$$\psi_q^{(i_d, i_q)} = L_q^{(i_d, i_q)} \cdot i_q \quad (12)$$

Diese Darstellungsweise ist kürzer und übersichtlicher

→ Mehrwert wegen Trennung der Selbst- und Gegeninduktivität?
(Kellner 2012).

Allgemeine Maschinengleichungen in Zustandsform

Insgesamt sieht das Gleichungssystem zum identifizieren der Parameter einer PMSM wie folgt aus:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} R_1 & -\omega_{el} L_q^{(i_d, i_q)} \\ \omega_{el} L_d^{(i_d, i_q)} & R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \\
 &\dots + \underbrace{\begin{pmatrix} L_{dd}^{(i_d, i_q)} & L_{dq}^{(i_d, i_q)} \\ L_{qd}^{(i_d, i_q)} & L_{qq}^{(i_d, i_q)} \end{pmatrix}}_{\text{differentielle Induktivitäten}} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \\
 &\dots + \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \Psi_{pm}^{(i_q)} \\ \omega_{el} \Psi_{pm}^{(i_q)} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Spannungsgleichungen der allgemeinen Maschinengleichungen

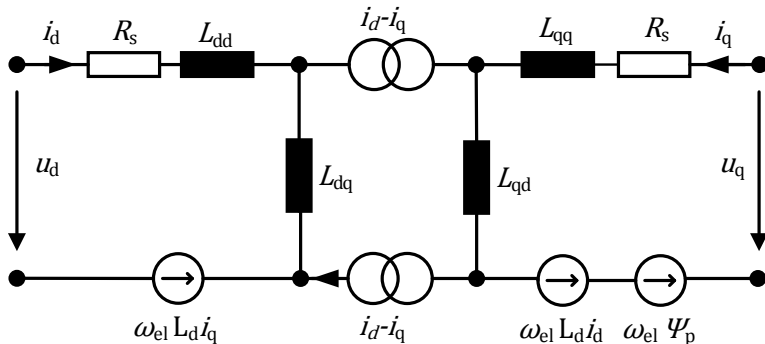


Abbildung: Graphische Darstellung der Gleichungen (Gl. 13).

Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM

Linearisierte Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation

Bestimmung der Rotorlage

Ansätze zur Identifikation der Induktivitäten, Ständerwiderstand und Flussverkettung

4. Parameterfehler

Vorwissen

Vorwissen

■ Warum?

Vorwissen

■ Warum?

■ Was ist notwendig?

Geberlose Regelung? Inkrementalgeber? Resolver?

→ ???



Geberlose Regelung? Inkrementalgeber? Resolver?

→ ???

- Vorteil einer geberlosen Regelung: Keinen Wartungsaufwand, geringere Kosten → keine Rotorposition bei niedrigen Drehzahlen?

Geberlose Regelung? Inkrementalgeber? Resolver?

→ ???

- Vorteil einer geberlosen Regelung: Keinen Wartungsaufwand, geringere Kosten → keine Rotorposition bei niedrigen Drehzahlen?
- Vorteil eines Resolvers: Absolutwert der Rotorposition → Wartungsaufwand und höhere Kosten



Geberlose Regelung? Inkrementalgeber? Resolver?

→ ???

- Vorteil einer geberlosen Regelung: Keinen Wartungsaufwand, geringere Kosten → keine Rotorposition bei niedrigen Drehzahlen?
- Vorteil eines Resolvers: Absolutwert der Rotorposition → Wartungsaufwand und höhere Kosten
- Ein Inkrementalgeber ist nicht sinnvoll, zu ungenau.



Ansätze zur Identifikation

- Unterteilung der Induktivitäten in: absolute und differentielle Induktivitäten
- Offline? Online?



Ansätze zur Identifikation

- Unterteilung der Induktivitäten in: absolute und differentielle Induktivitäten
- Offline? Online?

»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).«

Onlinemessverfahren

Aus den Erkenntnissen von Folie 20 ist eine Onlinemessung nicht erforderlich – im Gegensatz zur Ständeridentifikation

- Onlineverfahren sind entweder gar keine richtigen »online«-Verfahren oder haben zweifelhafte Stabilität und Genauigkeit (Underwood und Husain 2010)





Wichtig

Induktivitäten können offline gemessen werden, der Ständerwiderstand kann nur online bestimmt werden:

»Using an online parameter estimation algorithm allows the controller to have precise parameter estimates even when these are subject to perturbation, regardless of its origin. Consequently, phenomena like temperature effects and cross-saturation can be accounted for through their effect on the machine parameters, which is difficult with an offline method (Underwood und Husain 2010, S. 1).«



Agenda

1. Einleitung

2. Mathematisches Modell einer PMSM

Linearisierte Gleichungen

Allgemeine Gleichungen

3. Ansätze zur Identifikation

Bestimmung der Rotorlage

Ansätze zur Identifikation der Induktivitäten, Ständerwiderstand und Flussverkettung

4. Parameterfehler



Block

Title

Das ist ein Block mit Aufzählungen:

- 1
- 2
- 3
- ...

Bibliography I



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



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



Schröder, D. (2001). *Regelung von Antriebssystemen*. Berlin [u.a.]: Springer.

Bibliography II



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).



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.

Bibliography III



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).