



Projektarbeit

über das Thema

Auslegung eines parametrisierten Modells einer vektorgeregelten anisotropen Synchronmaschine

Autoren: Benjamin Ternes
benjamin.ternes@fernuni-hagen.de
Matrikelnummer: 014102076

Jan Feldkamp
jan.feldkamp@hs-bochum.de
Matrikelnummer: 012215207

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. A. Bergmann

Abgabedatum: 13. August 2014

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	1
1 Theoretische Grundlagen und begriffliche Erklärungen	2
1.1 Dreiphasensystem	2
1.2 Einführung Magnetfelder	2
1.2.1 Strombelag	2
1.2.2 •	3
1.3 Induktivitäten	3
1.4 Einführung Synchronmaschine	3
1.5 Permanenterregte Synchronmaschine	3
1.6 Evaluierung der Ersatzschaltbilder für die Regelung	3
2 Grundlagen der Vektorregelung	4
2.1 Raumzeigerdarstellung	4
2.2 Beschreibung in α - β -Koordinatensystem	7
2.3 Beschreibung in rotorfesten d-q-Koordinatensystem	8
2.3.1 Transformation zwischen Phasen- und Raumzeigergrößen	8
2.3.2 Raumzeigertransformation zwischen ortsfesten und rotierenden Bezugssystemen	8
2.4 Signalflussplan der Vektorregelung	8
3 Anforderungsprofil für die Regelung der PMSM mit Simulink	9
3.1 Eingabe und Ausgabedaten	9
3.2 Darstellung der Simulationsergebnisse	9
4 Regelung der PMSM mit Simulink	10
4.1 Einführung in Simulink	10
4.2 Einführung in die TI-Bibliotheken	10
4.3 Übersicht der Regelstruktur	10
4.3.1 Subsysteme	10

5	Auswertung der Simulationsergebnisse	11
5.1	Vergleich der Ergebnisse der TI-Bibliotheken	11
6	Zusammenfassung	12
	Literatur	13

Abbildungsverzeichnis

1.1	Darstellung des Dreiphasensystem mit MATHEMATICA.	2
2.1	Beispielhafte Lage eines Zeitzeigers.	5
2.2	zweipolige Drehfeldmaschine mit beispielhafter Statorstromraumzeigerlage . .	7

Tabellenverzeichnis

Symbolverzeichnis

Allgemeine Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
I	elektrische Stromstärke	A
Θ	elektrische Durchflutung	A
A	elektrischer Strombelag	A/m
J	elektrische Stromdichte	A/m^2
H	magnetische Feldstärke	A/m
μ_0	magnetische Feldkonstante	Vs/Am
μ_r	relative Permeabilität	
B	magnetische Flussdichte	$T = Vs/m^2$
Φ	magnetischer Fluss	Vs
Ψ	verketteter Fluss	Vs
L, M	Induktivitäten	$H = Vs/A$
U	elektrische Spannung	V
V	magnetisches Vektorpotenzial	Vs/m
V_m	magnetische Spannung	A

1 Theoretische Grundlagen und begriffliche Erklärungen

Um auf die Regelung einer anisotropen Synchronmaschine einzugehen, werden im folgenden einige Grundlagen erörtert.

1.1 Dreiphasensystem

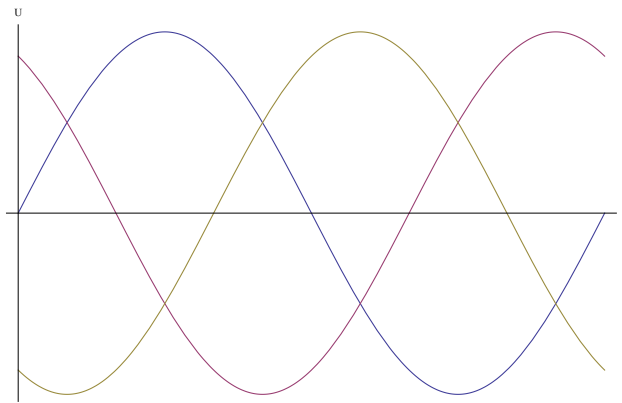


Abbildung 1.1: Darstellung des Dreiphasensystem mit MATHEMATICA.

1.2 Einführung Magnetfelder

1.2.1 Strombelag

Die zeitliche und örtliche Änderung von Magnetfeldern in elektrischen Maschinen wird bestimmt durch die Anordnung stromdurchflossener Leiter und die Art der Speisung (Hofmann [2013](#), S. 199). Die räumliche Verteilung des Stromes wird durch den Strombelag wiedergegeben. Wenn die Oberfläche eines ferromagnetischen Körpers einen Strombelag A führt, d. h. wenn eine flächenhafte Strömung vorliegt, liefert das Durchflutungsgesetz

$$\oint_s \vec{H} d\vec{s} = w \cdot I = \Theta \quad (1.1)$$

$H ds = A ds$, d. h. $H = A$ bzw. $B = \mu A$. Folgernd existieren neben den Normalkomponenten, B_n und H_n die Tangentialkomponenten H_t und B_t der Feldgrößen. Die Feldlinien treten nicht mehr senkrecht aus der Randkurve aus, sondern unter einem Winkel α .

$$\alpha = \arctan\left(\frac{B_n}{\mu A}\right) \quad (1.2)$$

Der Strombelag wird über dem Umlauf einer Spule bzw. Spulengruppe angegeben.

$$\Theta(x) = - \int_{x_0}^x A(x) dx \quad (1.3)$$

damit erhält man durch Differentiation den Strombelag A

$$A(x) = -\partial_x \Theta(x) \quad (1.4)$$

mit

$$\Theta(x) = \hat{\Theta}(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}(x - x_\mu)\right) \quad (1.5)$$

Nach 1.3 ist offensichtlich, dass eine sinusförmige Durchflutungsverteilung nur dann entstehen kann, wenn der Ankerstrombelag ebenfalls sinusförmig, aber um eine Polteilung versetzt ist (Müller 2005, S. 247).

1.2.2 •

1.3 Induktivitäten

1.4 Einführung Synchronmaschine

1.5 Permanenterregte Synchronmaschine

1.6 Evaluierung der Ersatzschaltbilder für die Regelung

2 Grundlagen der Vektorregelung

In modernen Antriebssystemen ist es häufig unerlässlich, entscheidende Maschinengrößen wie Drehzahl oder Drehmoment auf einen gewünschten Wert einzustellen. Dabei kamen der Vergangenheit häufig Gleichstrommaschinen zum Einsatz, welche sich durch eine gute Regel- und Einstelleigenschaften bei den geforderten Parametern auszeichnen. Große Fortschritte in den Bereichen der Leistungselektronik und bei Regelkomponenten führen dazu, dass heute Antriebe, ohne besonderen Aufwand, mit Synchronmaschinen realisiert werden können. Gleichzeitig haben die Drehfeldmaschinen den Vorteil, dass Aufgrund der fehlenden mechanischen Kommutation kein nennenswerter Verschleiß Auftritt.

Entscheidend für den Aufbau einer geregelten PMSM ist die Vektor- bzw. feldorientierte Regelung. Die Maschine wird mit näherungsweise sinusförmig veränderlichen Strömen gespeist. Ebenso besitzen alle weiteren auftretenden elektrischen Größen wie Spannungen, Flüsse oder Felder aufgrund ihres Zeitverhaltens annähernd Sinusform (Nuss 2010, S. 1). Die Idee der Vektorregelung ist es nun, nicht die zeitlichen Momentanwerte der Ströme zu verändern, sondern die erfassten Wechselgrößen in ein Zwei-komponentiges rotierendes Koordinatensystem zu übertragen. Diese Komponenten werden regelungstechnisch verwertet und zurück transformiert.

2.1 Raumzeigerdarstellung

Die stationären Zusammenhänge der elektrischen Größen in der Maschine, welche ursächlich aus dem Zusammenhang von Ψ und B herrühren, können zunächst mithilfe komplexer Zeitzeiger beschrieben werden. Dabei lassen sich die Statorströme, $i_{s,1}$, $i_{s,2}$, und $i_{s,3}$ einer Drehfeldmaschine mit idendischer Amplitunde \hat{i}_s und Statorkreisfrequenz ω_s und einer jeweiligen 120° Phasenverschiebung als

$$\begin{aligned} i_{s,i} &= \operatorname{Re}\{\underline{i}_{s,i}\} = \operatorname{Re}\{\hat{i}_{s,i} \cdot e^{j\omega_s t}\} = \operatorname{Re}\left\{\hat{i}_s \cdot e^{j(\omega_s t + 0 - (i-1) \cdot \frac{2\pi}{3})}\right\} \\ &= \hat{i}_s \cdot \cos\left(\omega_s t + \varphi_0 - (i-1) \cdot \frac{2\pi}{3}\right); \text{ mit } i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (2.1)$$

mit den komplexen Zeitzeigern

$$\underline{i}_{s,i} = \hat{\underline{i}}_{s,i} \cdot e^{j\omega_s t} ; \text{ mit } i = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

und den komplexen Amplituden

$$\hat{\underline{i}}_{s,i} = \hat{i}_s \cdot e^{j(\omega_s t + 0 - (i-1) \cdot \frac{2\pi}{3})} ; \text{ mit } i = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

darstellen. Die folgende Abbildung 2.1 veranschaulicht die vorangegangenen Gleichungen 2.1, 2.2 sowie 2.3 und stellt beispielhaft den Zeitzeiger $i_{s,1}$ dar.

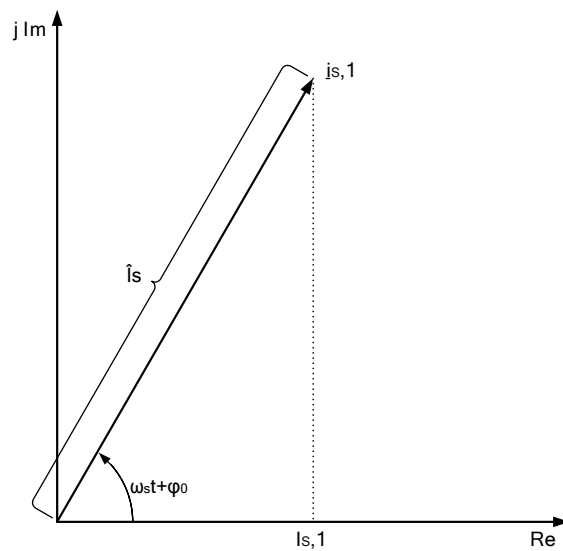


Abbildung 2.1: Beispielhafte Lage eines Zeitzeigers.

Da das Ziel darin besteht, den dynamischen Rotationsvorgang einer PMSM zu modellieren, ist die Verwendung eines Zeitzeigers, mit dem nur stationäre Vorgänge beschrieben werden können, nicht angebracht. Hier ist es zweckmäßig, einen Operator so zu entwickeln, dass dieser in der Lage ist, dynamische Vorgänge zu beschreiben, ohne dazu Nebenbedingungen wie beispielsweise die Periodizität heranzuziehen. Bei der Entwicklung bieten sich die Statorphasenströme $i_{s,1}$, $i_{s,2}$, und $i_{s,3}$ des Dreiphasensystems an. Diese stehen zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung. Es sei angemerkt, dass dabei die Nullbedingung erfüllt ist. Die Summe der Statorphasenströme muss immer null sein, was beim Einsatz von Drehfeldmaschinen idr. gegeben ist. Dadurch ist es auch immer möglich mit Kenntnis zweier Größen auf die dritte zu schließen. Nun ist zweikomponentiger Zeitzeiger immer um mindestens zwei Momentanwerte erweiterbar. Ein hierfür geeigneter Ansatz zur Erzeugung eines Raumzeigers wurde erstmals in kovacs1959 veröffentlicht:

$$\underline{i}_s(t) = \frac{2}{3} \cdot \left\{ \underline{i}_{s,1}(t) + \underline{i}_{s,2}(t) \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \underline{i}_{s,3}(t) \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right\} \quad (2.4)$$

Um jetzt aufzeigen zu können, dass der Ansatz aus 2.4 im stationären Zustand mit dem entsprechenden Statorstromzeitzeiger übereinstimmt und schlussendlich den Raumzeiger zu erzeugen, werden zunächst in 2.4 die Statortrommomentanwerte aus 2.1 eingesetzt. Dadurch erhält man

$$\underline{i}_s(t) = \frac{2}{3} \cdot \left\{ \hat{i}_s \cdot \cos(\omega_s t + \varphi_0) + \hat{i}_s \cdot \cos\left(\omega_s t + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \hat{i}_s \cdot \cos\left(\omega_s t + \varphi_0 - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right\} \quad (2.5)$$

Wird nun die trigonometrische Cosinus-Funktion durch die entsprechende exponentielle Darstellung ersetzt, folgt hieraus

$$\underline{i}_s(t) = \frac{2}{3} \cdot \hat{i}_s \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot (e^{j(\omega_s t + \varphi_0)} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_0)}) + \frac{1}{2} \cdot (e^{j(\omega_s t + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3})}) \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \frac{1}{2} \cdot (e^{j(\omega_s t + \varphi_0 - \frac{4\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_0 - \frac{4\pi}{3})}) \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right\} \quad (2.6)$$

Nach ausmultiplizieren der Terme folgt mit $1 + e^{j\frac{4\pi}{3}} + e^{j\frac{8\pi}{3}} = 0$ das Ergebnis und somit der Raumzeiger

$$\underline{i}_s = \frac{2}{3} \cdot \hat{i}_s \cdot \left\{ \frac{3}{2} \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_0)} + \frac{1}{2} \cdot e^{-j(\omega_s t + \varphi_0)} \cdot \left(1 + e^{j\frac{4\pi}{3}} + e^{j\frac{8\pi}{3}} \right) \right\} = \hat{i}_s \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_0)} \quad (2.7)$$

Das Ergebnis von 2.7 entspricht strukturell dem in 2.1 angegebenen Statorstromzeitzeiger. Dadurch ist sichergestellt, dass der Ansatz aus 2.4 in der Lage ist als Gesamtzeiger, bestehend aus den Momentanwerten der Statorströme, zu fungieren. Die folgende Abbildung 2.2 zeigt zur Veranschaulichung eine zweipolige Drehfeldmaschine mit zugehörigem Zeigerdiagramm, welches den Statorstromraumzeiger beinhaltet.

Mit der Einführung des Raumzeigers ist die theoretische Grundlage dafür geschaffen, die PMSM mit einer feldorientierten Regelung zu versehen. Da sich wie Eingangs beschrieben alle Größen in der Drehfeldmaschine näherungsweise sinusförmig verhalten, ist die Stromraumzeigerdarstellung aus 2.4 für alle anderen dreiphasigen Größen als allgemeine Raumzeigerdarstellung definierbar.

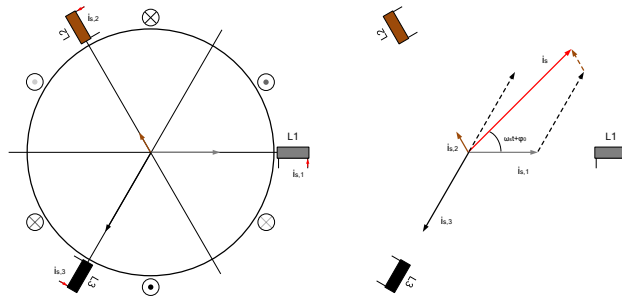


Abbildung 2.2: zweipolige Drehfeldmaschine mit beispielhafter Statorstromraumzeigerlage

$$\underline{a}(t) = \frac{2}{3} \cdot \left\{ \underline{a}_1(t) + \underline{a}_2(t) \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + \underline{a}_3(t) \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right\} \quad (2.8)$$

Im Folgenden werden die in der Praxis benötigten Transformationsvorschriften erläutert, welche das Wechseln zwischen Phasen- und Raumzeigergrößen erlauben.

2.2 Beschreibung in α - β -Koordinatensystem

Als Grundlage für das Wechseln zwischen Phasen- und Raumzeigergrößen dient zunächst die Definition aus 2.8. Die Definitionsgleichung lässt sich in Real- und Imaginärteil aufspalten. Es kommt so zu folgender Aufteilung

$$\text{Rea}(\underline{a}(t)) = \quad (2.9)$$

$$(2.10)$$

2.3 Beschreibung in rotorfesten d-q-Koordinatensystem

2.3.1 Transformation zwischen Phasen- und Raumzeigergrößen

2.3.2 Raumzeigertransformation zwischen ortsfesten und rotierenden Bezugssystemen

2.4 Signalflussplan der Vektorregelung

3 Anforderungsprofil für die Regelung der PMSM mit Simulink

3.1 Eingabe und Ausgabedaten

3.2 Darstellung der Simulationsergebnisse

4 Regelung der PMSM mit Simulink

4.1 Einführung in Simulink

4.2 Einführung in die TI-Bibliotheken

4.3 Übersicht der Regelstruktur

4.3.1 Subsysteme

5 Auswertung der Simulationsergebnisse

5.1 Vergleich der Ergebnisse der TI-Bibliotheken

6 Zusammenfassung

Literatur

- Binder, Andreas (2012). *Elektrische Maschinen und Antriebe: Übungsbuch - Aufgaben mit Lösungsweg*. Berlin: Springer.
- Bolte, Ekkehard (2012). *Elektrische Maschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (Besucht am 14.07.2014).
- Bronstein, I. N. u. a. (2012). *Taschenbuch der Mathematik*. 8. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- Felderhoff, Rainer und Udo Busch (2006). *Leistungselektronik*. 4. Aufl. München: Hanser.
- Fischer, Rolf (2009). *Elektrische Maschinen*. 14. Aufl. München: Hanser.
- Fuest, Klaus und Peter Döring (2004). *Elektrische Maschinen und Antriebe: Lehr- und Arbeitsbuch ; mit zahlreichen durchgerechneten Beispielen und Übungen sowie Fragen und Aufgaben zur Vertiefung des Lehrstoffes*. Wiesbaden: Vieweg.
- Gerke, Wolfgang (2012). *Elektrische Maschinen und Aktoren: Eine anwendungsorientierte Einführung*. (Besucht am 13.07.2014).
- Grune, Rayk (2012). »Verlustoptimaler Betrieb einer elektrisch erregten Synchronmaschine für den Einsatz in Elektrofahrzeugen«. Dissertation. TU Berlin.
- Hagmann, Gert (2008). *Grundlagen der Elektrotechnik*. 13. Aufl. Ulm: AULA.
- Hahn, Ulrich (2007). *Physik für Ingenieure*. München: Oldenbourg.
- Henke, Heino (2011). *Elektromagnetische Felder: Theorie und Anwendung*. 4. Aufl. Berlin: Springer.
- Hofmann, Wilfried (2013). *Elektrische Maschinen: [Lehr- und Übungsbuch]*. München [u.a.]: Pearson.
- Kellner, Sven (2012). »Parameteridentifikation bei permanenterregten Synchronmaschinen«. Dissertation. TU Erlangen-Nürnberg.
- Knorrenschild, Michael (2014). *Mathematik für Ingenieure 2: Angewandte Analysis im Bachelorstudium*. München: Hanser.

- Kofler, Michael und Hans-Gert Gräbe (2002). *Mathematica: Einführung, Anwendung, Referenz*. München [u.a.]: Addison-Wesley.
- Kremser, Andreas (2004). *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Motoren und Anwendungen ; mit 10 Tabellen*. Stuttgart [u.a.]: Teubner.
- Lingnau, Anselm (2007). *LaTeX hacks*. Köln: O'Reilly.
- Lutz, Holger und Wolfgang Wendt (2012). *Taschenbuch der Regelungstechnik*. 9. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- Müller, Gernar (2005). *Elektrische Maschinen*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Müller, Gernar u. a. (2008). *Berechnung elektrischer Maschinen*. Weinheim: Wiley-VCH-Verl.
- Nuss, Uwe (2010). *Hochdynamische Regelung elektrischer Antriebe*. Berlin; Offenbach: VDE-Verl.
- Papula, Lothar (2003). *Mathematische Formelsammlung*. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg.
- Papula, Lothar (2009a). *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Band 1, Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium*. 12. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Papula, Lothar (2009b). *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Band 2, Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium*. 12. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Perassi, Hector (2006). »Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine ohne Lagegeber für den gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand«. Dissertation. TU Ilmenau.
- Riefenstahl, Ulrich (2010). *Elektrische Antriebssysteme: Grundlagen, Komponenten, Regelverfahren, Bewegungssteuerung*. 3. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag.
- Scherf, Helmut (2010). *Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme eine Sammlung von Simulink-Beispielen*. München: Oldenbourg.
- Schlosser, Joachim (2014). *Wissenschaftliche Arbeiten schreiben mit LaTeX : Leitfaden für Einsteiger*. 5. Aufl. Heidelberg u. a.: mitp.
- Schröder, Dierk (2000). *Elektrische Antriebe: Grundlagen*. Berlin [u.a.]: Springer.
- Schröder, Dierk (2001). *Regelung von Antriebssystemen*. Berlin [u.a.]: Springer.
- Stöcker, Horst (2010). *Taschenbuch der Physik*. 6. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.

- Unbehauen, Heinz (2008). *Regelungstechnik I: Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*. 15. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Unbehauen, Heinz (2009). *Regelungstechnik II: Zustandsregelungen, digitale und nichtlineare Regelsysteme*. Auflage: 9., durchges. u. korr. Aufl. 2007. 2., korr. Nachdruck 2009. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 447 S.
- Unbehauen, Heinz (2011). *Regelungstechnik III: Identifikation, Adaption, Optimierung*. Auflage: 7., korr. Aufl. 2011. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 616 S.
- Wökl-Bruhn, Henning (2009). »Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe«. Dissertation. TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.