

Beuth Hochschule für Technik
Fachbereich 7
Prof. Dr.-Ing. Tschirley Wintersemester 2012/13

Implementierung einer Feldorientierten Regelung und Bestimmung der Maschinenparameter

Karsten Abt
s790866
Über Support s47960@beuth-hochschule.de
18. März 2013

Inhaltsverzeichnis

1. Implementierung einer Feldorientierten Regelung in MATLAB/Simulink	3
1.1. Einführung	3
1.2. Ziel dieser Arbeit	3
1.3. Aufbau des Modells	5
1.3.1. dq-Koordinatentransformation	5
1.3.2. Bestimmung des Koordinatendrehwinkels	6
1.3.3. Asynchronmaschinenmodell	7
1.3.4. Regelung	10
1.3.5. PWM Inverter	10
2. Ermittlung Maschinenparameter	11
2.1. Messung der Ständerwicklung	11
2.2. Leerlaufversuch	11
2.3. Kurzschlussversuch	12
A. Anhang	14
A.1. Messwerttabellen	14
A.2. Simulink-Modellübersicht	15

1. Implementierung einer Feldorientierten Regelung in MATLAB/Simulink

1.1. Einführung

In den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhundert bildete der fremderregte Gleichstrommotor die einzige Möglichkeit Drehmoment, und Drehzahl unabhängig voneinander zu regeln. Nachteil dieser Maschine ist die Verschleißanfälligkeit und die damit verbundenen Kosten. Wesentlich robuster und praktisch wartungsfrei ist der Asynchronmotor. Jedoch lässt sich dieser nicht so leicht regeln. Durch die Weiterentwicklung der Leistungselektronik und das Vorhandensein moderner Regelungsverfahren, wie zum Beispiel die Feldorientierte Regelung, ist es heutzutage möglich, eine Asynchronmaschine problemlos zu regeln.

Grundprinzip der Feldorientierten Regelung (FOR) ist: Rotierende dreiphasige Drehstromgrößen, unter Berücksichtigung des Drehwinkels, in feststehende, zweiphasige Feldgrößen zu transformieren. Hierbei kann die entstandene Gleichstromgröße in eine flussbildende (d-Achse) und eine momentbildende (q-Achse) Komponente aufgespalten werden, so dass Drehmoment und Drehzahl unabhängig voneinander geregelt werden können.

Hierbei wird zwischen der direkten FOR und der indirekten FOR unterschieden. Im Fall der direkten FOR wird der Rotorfluss gemessen. In diesem Verfahren wird nur der Fluss im Luftspalt bestimmt. Aufgrund des messtechnischen Aufwandes und der Anfälligkeit gegenüber Fehlern ist diese Variante überholt.

Das heutzutage am häufigsten angewandte Verfahren der indirekten FOR schätzt mit Hilfe eines Maschinenmodells den Raumzeiger des Flusses.

1.2. Ziel dieser Arbeit

Dieses MotorCtrl-Projekt basiert auf folgenden Maschinenversuchsaufbau (siehe Abbildung 1). Der Maschinensatz besteht aus einer Asynchronmaschine als Prüfling und einer ASM als aktive Belastungsmaschine, welche über eine Welle mechanisch miteinander gekoppelt sind. Darüber hinaus ist uns ein Development Board von der Firma Texas Instrument (siehe Abbildung 2) zur Verfügung gestellt worden. Mit Hilfe einer vorimplementierten FOR auf dem Board nahmen wir die Motorregelung in Betrieb. Nähere Information dazu finden sich in der Application Note zu diesem MotorCtrl-Projekt.

Da uns die FOR sehr abstrakt und unübersichtlich erschien, entschieden wir uns, das Verfahren der FOR unter Anwendung eines selbstentwickelten Simulink Modells

zu beschreiben. Die Modellübersicht ist im Anhang A.2 dargestellt und die Simulation kann als beiliegende Datei mit den Namen: IFOR.mdl und Parameter_IFOR.m abgerufen werden.

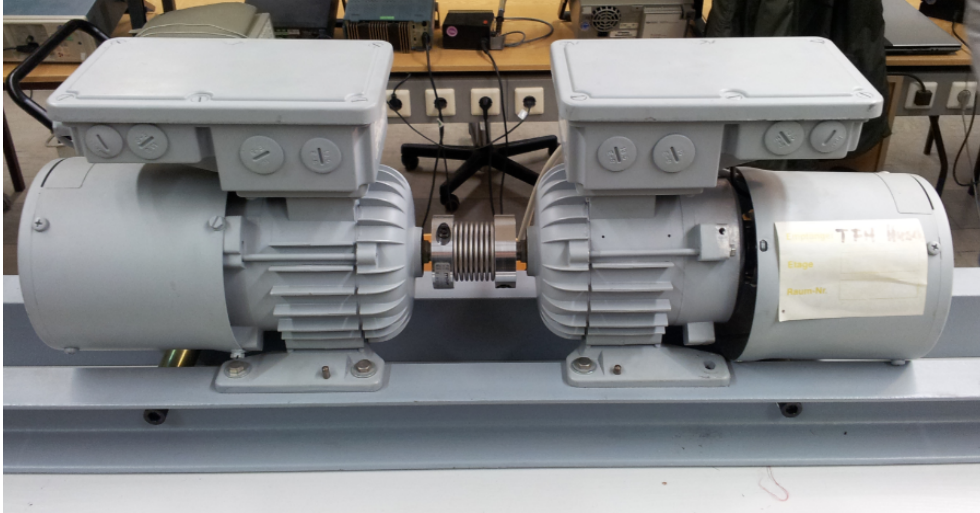


Abbildung 1: verwendeter Motorversuchsaufbau



Abbildung 2: verwendetes Entwicklungstool

1.3. Aufbau des Modells

Zur besseren Übersicht wurde das implementierte Modell in seine Funktionsbausteine untergliedert. In Abbildung 3 sind die verschiedenen Komponenten farblich hervorgehoben:

- Grün: Maschinenmodell: Berechnung der Drehzahl und des Drehmoment. Übergabe der Drehzahl und der Ströme an die Regelung.
- Rot: Berechnung des Koordinatendrehwinkel.
- Blau: Regelung der Maschine über FOR.
- Orange: PWM mit Gleichspannungsquelle: Bereitstellung der benötigten Spannung, je nach gewünschter Drehzahl und Drehmoment.

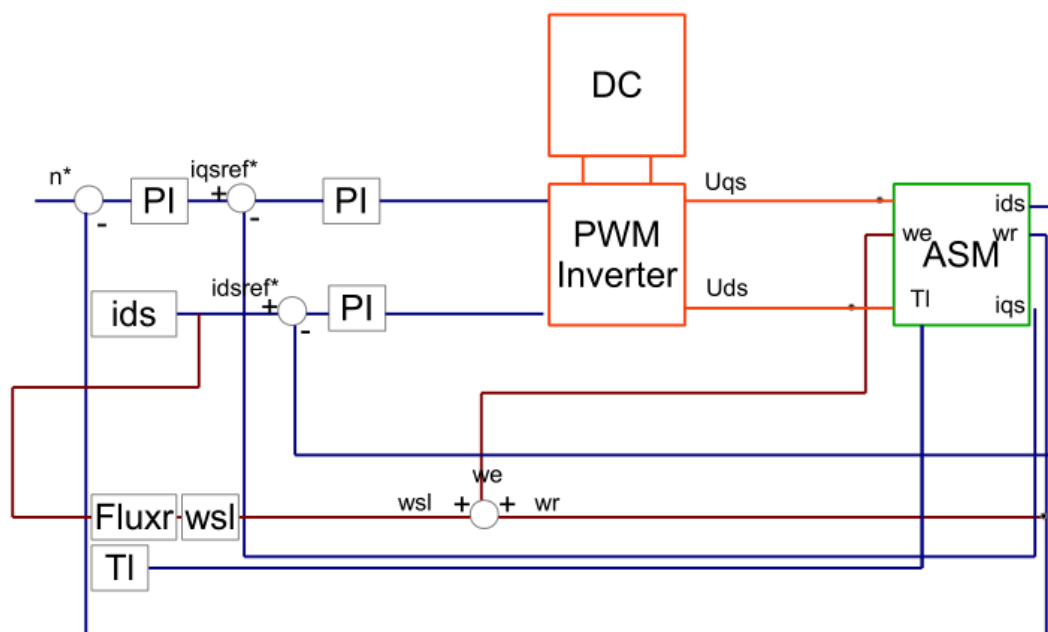


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Modells in Simulink.

1.3.1. dq-Koordinatentransformation

Mit Hilfe der dq-Koordinatentransformation werden die Phasenströme und -spannungen des Dreiphasensystems in ein rotierendes Koordinatensystem mit nur noch zwei Achsen umgerechnet. Dadurch entstehen aus den sinusförmigen Größen Gleichgrößen.

Man nennt diese andere Beschreibung von Drehstromgrößen auch Raumzeigerdarstellung. In diesem in Simulink entwickelten Modell wird die dq-Transformation nicht benötigt, da das ASM Maschinenmodell auch im dq-Koordinatensystem entworfen ist und man sich daher immer in diesem Referenzrahmen befindet. Da diese Vorgehensweise ein wichtiger Teil der mathematischen Grundlagen der FOR sind, werden die Formeln für die Berechnung der dq-Raumzeiger hier nur formuliert. Es wird jedoch die inverse Transformation benutzt, um die Eingangsströme I_a, I_b, I_c in die ASM zu messen.

Berechnung der dq-Raumzeiger dreiphasiger sinusförmiger Spannungen mit je 120° Phasenverschiebung:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Berechnung der inversen dq-Transformation (Block...):

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3.2. Bestimmung des Koordinatendrehwinkels

Damit der Flussraumzeiger nach Betrag und Phase bestimmt werden kann, wird bei der indirekten FOR die Lage des Rotorflusses mit der Schlupfgeschwindigkeit ω_{sl} und der Geschwindigkeit ω_r des Rotors berechnet, welche mit einem Inkrementalgeber gemessen wird, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Die Geschwindigkeit ω_{sl} ist:

$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{\Psi_r L_r} \cdot I_{qs} \quad (5)$$

Der erforderliche Fluss zum Magnetisieren der Hauptinduktivität Ψ_r :

$$\Psi_r = L_m i_{ds} \quad (6)$$

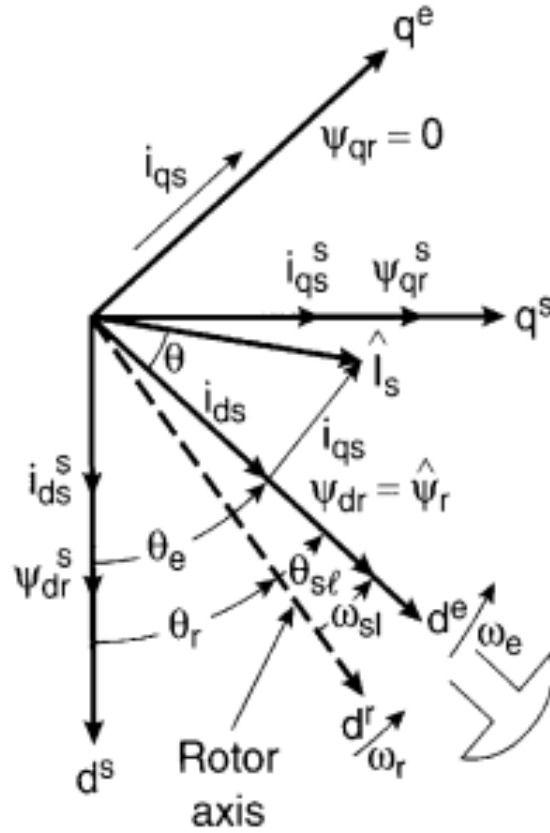


Abbildung 4: Bestimmung der Rotorflussvektors. Alle Größen mit Indizierung r bzw. s bedeutet aus der Sicht des Rotors bzw. des Ständers. Mit dem Winkel Φ_r dreht sich der Rotor. Aus Sicht des Ständers muss sich noch zum Rotorwinkel der Schlupfwinkel Φ_{sl} berücksichtigt werden [2], Seite:368.

Es kann die Lage des Rotorflusses bestimmt werden:

$$\Phi_e = \int (\omega_{sl} + \omega_r) dt \quad (7)$$

Dieser Winkel Φ_e ist der Drehwinkel des rotierenden dq-Koordinatensystem.

1.3.3. Asynchronmaschinenmodell

Damit die Feldorientierte Regelung getestet werden kann, ist es notwendig ein dynamisches Modell der Asynchronmaschine zu entwickeln. Die Entwicklung des Maschinenmodells erfolgt auch im dq-Koordinatensystem. Das elektrische dq-Ersatzschaltbild einer Asynchronmaschine ist in Abbildung 5 dargestellt.

Um ein möglichst realitätsnahes Modell zu erstellen, wurde aus obigen Ersatzschaltbild ein Differentialgleichungssystem 5.Ordnung aufgestellt. Die Herleitung der Gleichungen

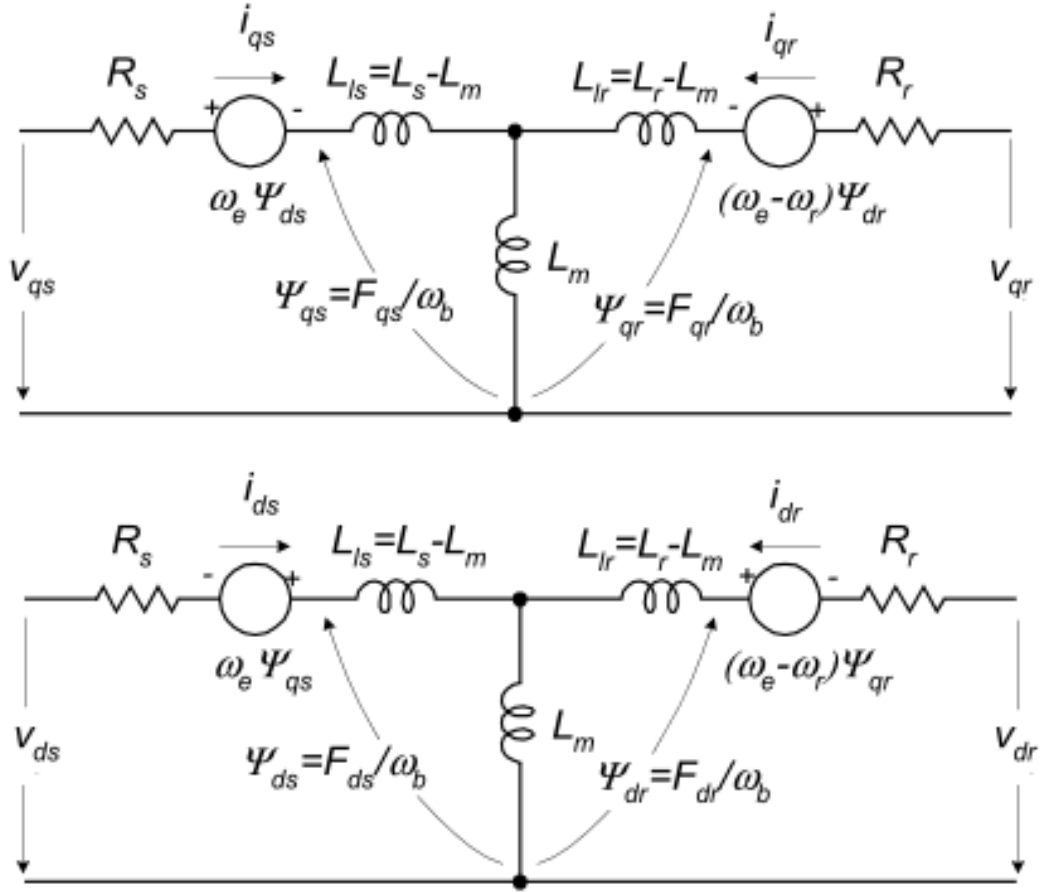


Abbildung 5: Ersatzschaltbild im dq-Koordinatensystem [5], Seite:370.

chungen ist in Quelle [2] zu entnehmen. Das Schema des Motormodells ist in Abbildung 6 dargestellt. Das Wirkschema zeigt sich wie folgt: Die Spannungen U_{ds} und U_{qs} werden von der PWM bereitgestellt und in das dq-Ersatzschaltbild eingespeist. Die Information über den Drehwinkel des Koordinatensystems erfolgt über ω_e . Da die induzierten Spannungen auf der Rotorseite abhängig von der Drehzahl des Läufers sind, wird ω_r auf den Motor zurückgekoppelt. Im Motormodell werden die Größen I_{qs} , I_{ds} , Ψ_{qs} und Ψ_{ds} generiert und mit Hilfe dieser Größen das Drehmoment T_e und die Drehzahl ω_r berechnet (siehe Gleichungen 8 bis 13). Des weiteren werden über die inverse dq-Transformation die sinusförmigen Maschinenströme gemessen.

Bestimmung der Flussgrößen:

$$\Psi_{qs} = \frac{dF_{qs}}{dt} = \omega_b [U_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{mq} - F_{qs})] \quad (8)$$

$$\Psi_{ds} = \frac{dF_{ds}}{dt} = \omega_b [U_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} F_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (F_{md} - F_{ds})] \quad (9)$$

$$\Psi_{qr} = \frac{dF_{qr}}{dt} = \omega_b [U_{qr} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} F_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{mq} - F_{qr})] \quad (10)$$

$$\Psi_{dr} = \frac{dF_{dr}}{dt} = \omega_b [U_{dr} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} F_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (F_{md} - F_{dr})] \quad (11)$$

Bestimmung der Rotorflusswinkelgeschwindigkeit:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\omega_b}{2J} (T_e - T_l) \quad (12)$$

Bestimmung des Drehmoments:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (13)$$

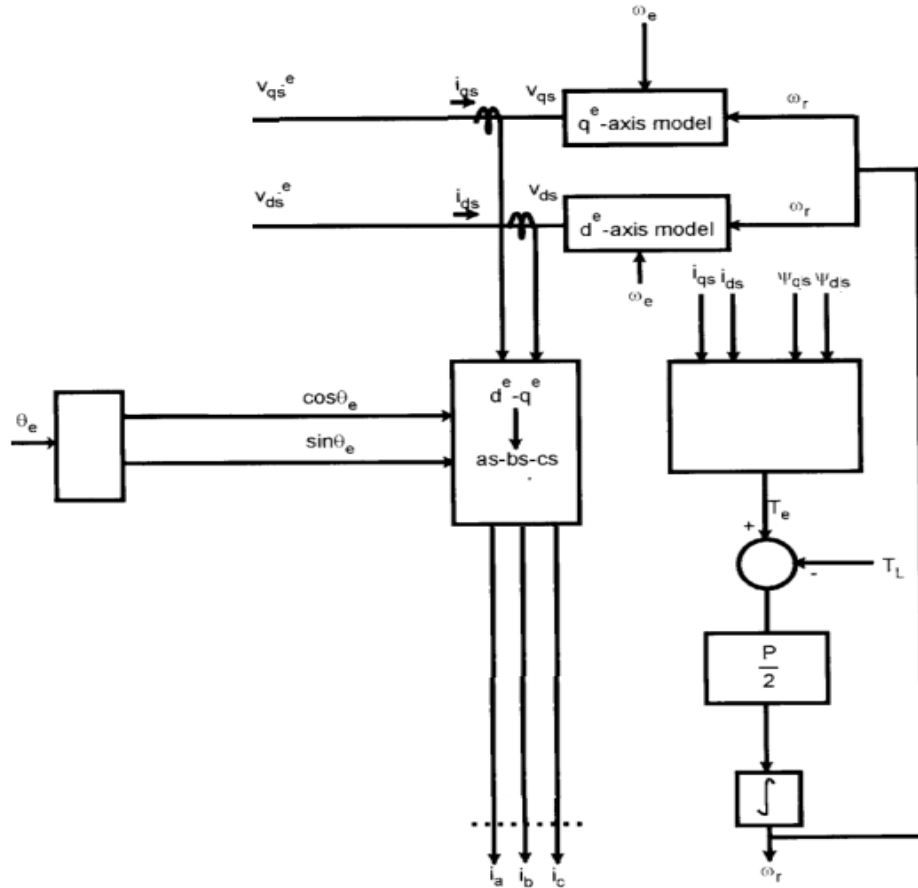


Abbildung 6: Schema des in Simulink implementierten Motormodells [2], Seite:68.

1.3.4. Regelung

Drei PI-Regler sind in der Feldorientierten Regelung integriert. Die Regelung der Drehzahl erfolgt durch Rückkoppelung der Rotorgeschwindigkeit und diese generiert den momentbildenden Strom I_{qs}^* . Der Sollwert I_{qs}^* wird mit dem Maschinenstrom I_{qs} verglichen.

Der flussbildende Strom I_{ds}^* zum Magnetisieren der Hauptinduktivität ist als konstanter Wert vorgegeben. Somit wird der Strom konstant gehalten, um den gewünschten Fluss zu erreichen. Des weiteren sind dadurch die oben genannten guten Regelungseigenschaften einer fremderregten Gleichstrommaschine erreicht. Es wird I_{ds}^* konstant gehalten und I_{qs}^* nach Vorgabe des gewünschten Drehmomentes T_l variiert.

1.3.5. PWM Inverter

Durch die Pulsweitenmodulation ist es möglich eine Wechselspannung mit veränderlichen Mittelwert zu erzeugen. Dabei schalten die Leistungshalbleiter, je nach vorgegebener Frequenz des Referenzsignals, ein und aus. Das Referenzsignal wird mit dem eigentlichen Signal verglichen und an den Schnittpunkten zwischen zwei Logikpegeln umgeschaltet (siehe Abbildung 7). Dieses Verhältnis zwischen eingeschalteten und ausgeschalteten Halbleitern nennt sich Tastverhältnis und ist bestimmend für die mittlere Ausgangsspannung [1] .

Das Simulink Modell enthält als Referenz ein Dreiecksignal. Dieses wird mit dem, über die geregelten Ströme i_{ds} bzw. i_{qs} , verglichen, dabei variiert das Ausgangssignal der PWM, je nach voreingestellter Drehzahl und voreingestelltem Drehmoment. Das entstandene Logiksignal schaltet eine Gleichspannung mit einer Amplitude von U_d durch.

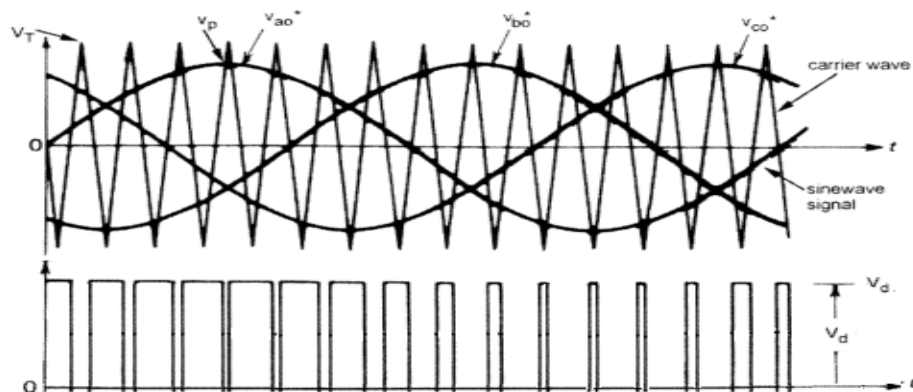


Abbildung 7: Schema zur Erzeugung einer PWM [2], Seite:212.

2. Ermittlung Maschinenparameter

Durch die Ausmessung der Parameter der Asynchronmaschine, konnte das erstellte Simulationsmodell an die benutzte Maschine angepasst werden kann. Um alle erforderlichen Parameter zu erhalten, wurde eine Widerstandsmessung der Ständerwicklungen, eine Leerlauf- und eine Kurzschlussmessung durchgeführt

2.1. Messung der Ständerwicklung

Die Widerstandswerte der Ständerwicklung wurden über eine Vier-Leiter-Messung im eingefahrenen Betriebszustand bestimmt.

Wicklungswiderstände im Ständer:

Wicklung	Widerstand [Ω]
$U_1 - U_2$	32.65
$V_1 - V_2$	32.67
$W_1 - W_2$	32.61

Tabelle 1: Messwerte Wicklungswiderstände

Da die Wicklungen des Rotors nicht aus dem Gehäuse herausgeführt sind, war es nicht möglich die Rotorwicklungen zu messen. Der Widerstandswert im einphasigen T-Ersatzschaltbild wurde indirekt über den Kurzschlussversuch ermittelt.

2.2. Leerlaufversuch

Bei dem Leerlaufversuch wird die Maschine nicht mechanisch belastet. Es wird der Strom I_0 , Spannung U_0 , die Leistungen P_0 und S_0 der Maschine gemessen (siehe Tabelle 2). Der Strom I_0 entspricht nicht dem Magnetisierungsstrom I_μ , da der Motor zur Deckung der mechanischen Reibung bereits ein Drehmoment entwickelt. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Reibungsverluste lassen sich aus der aufgenommenen Leistung P_0 berechnen [3].

Der Magnetisierungsstrom I_μ wird berechnet in dem man den $\cos \Phi_0$ bei Nennbetrieb bestimmt:

$$\cos \Phi_0 = \frac{P_0}{S_0} = 0.179 \quad (14)$$

Daraus ergibt sich die Blindkomponente des Leerlaufstromes:

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \Phi_0 = 0.719A \quad (15)$$

Mit ermitteltem I_μ kann der Blindwiderstand $x_{\sigma s+h}$ der Streu- und Hauptinduktivität berechnet werden:

$$x_{\sigma s+h} = \frac{U_{Str}}{I_\mu} = 321.64\Omega \quad (16)$$

$$\rightarrow L_{\sigma s+h} = \frac{x_{\sigma s+h}}{2 \cdot \pi \cdot f} = 1.02H \quad (17)$$

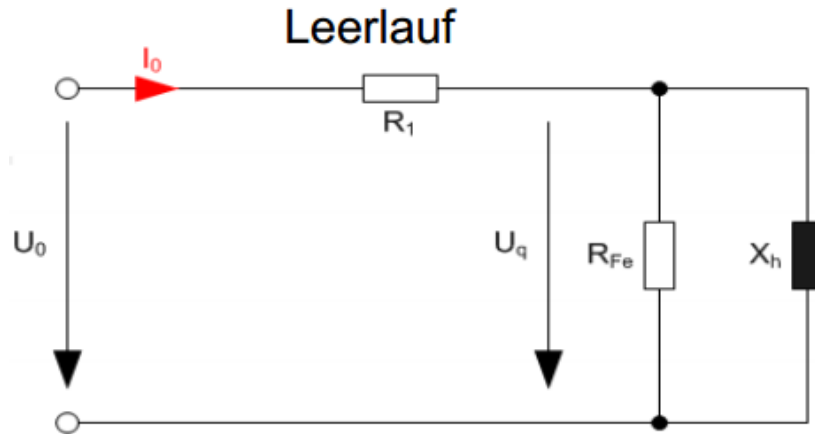


Abbildung 8: Ersatzschaltbild im Leerlauffall

2.3. Kurzschlussversuch

Der Kurzschlussversuch wird bei blockiertem Rotor durchgeführt. Es wird die Spannung U_k erhöht bis der zweifache Strom I_k fließt, hierbei wird eine Messreihe aufgenommen und U_k , I_k die Leistungen P_k und S_k der Maschine ermittelt (siehe Tabelle 3).

Da im Kurzschlussfall der Strom gegenüber dem Magnetisierungsstrom größer ist, kann er näherungsweise vernachlässigt werden, so dass eine Reihenschaltung bestehend aus Statorwiderstand R_s , Rotorwiderstand R_r , Streuinduktivität L_σ angenommen werden kann (siehe Abbildung 9).

Bestimmung von $\cos \Phi_k$ bei größten gemessen I_k :

$$\cos \Phi_k = \frac{P_k}{S_k} \quad (18)$$

$$R_k = \frac{U_k}{I_k} \cdot \cos \Phi_k = 59\Omega \quad (19)$$

$$\rightarrow R_r \approx R_k - R_s \approx 26.3\Omega \quad (20)$$

$$x_\sigma = \frac{U_k}{I_k} \cdot \sin \Phi_k = 42.13\Omega \quad (21)$$

$$\rightarrow L_\sigma = \frac{x_\sigma}{2 \cdot \pi \cdot f} = 0.134H \quad (22)$$

Bei den meisten Maschinen sind aus Symmetriegründen die beiden Streuinduktivitäten etwa gleich groß, so dass angenommen wird:

$$L_{\sigma_s} \approx L_{\sigma_r} \approx \frac{0.134H}{2} \approx 0.067H \quad (23)$$

$$L_h = L_{\sigma_s+h} - L_{\sigma_s} = 1.03H - 0.067H = 0.96H \quad (24)$$

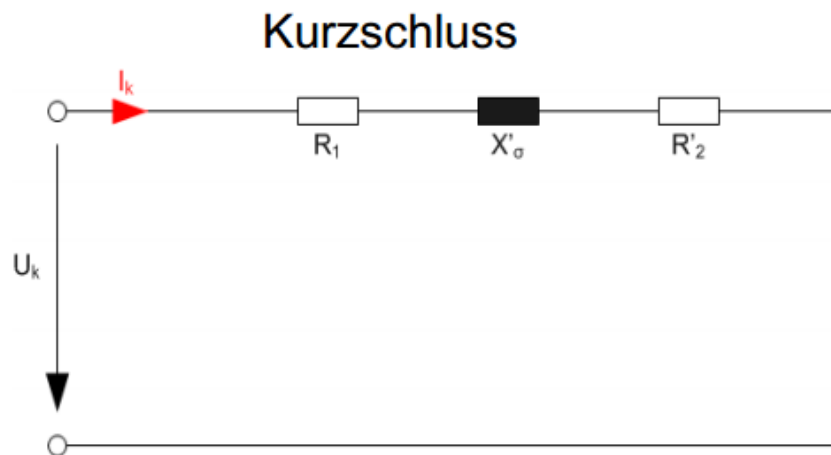


Abbildung 9: Ersatzschaltbild im Kurzschlussfall

A. Anhang

A.1. Messwerttabellen

$U_{Str}[V]$	$I_L[A]$	$P_L[W]$	$S_L[VA]$
60.3	0.221	27.6	39.5
80	0.204	27.9	48.9
120	0.262	33.3	94.3
160	0.362	42.5	174
200	0.512	59.6	302
233	0.731	91	510
240	0.799	103	576

Tabelle 2: Messwerte Leerlaufversuch

$U_{Str_K}[V]$	$I_K[A]$	$P_K[W]$	$S_K[VA]$
52.6	0.5	46.2	80.1
61.1	0.6	68.7	112.5
77.3	0.8	120.6	187.5
91.8	1	183	273
105	1.2	258	378
118	1.4	342	489

Tabelle 3: Messwerte Kurzschlussversuch

A.2. Simulink-Modellübersicht

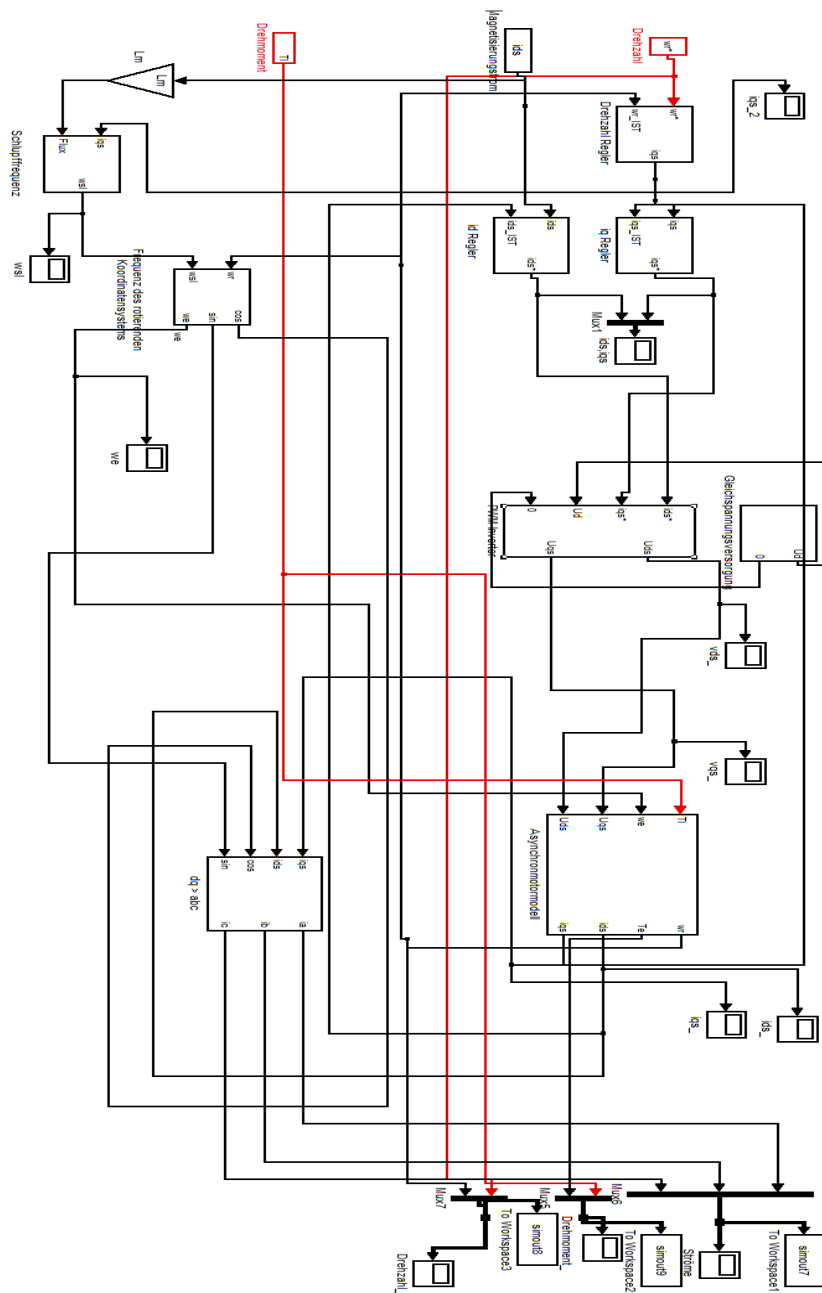


Abbildung 10:

Abbildungsverzeichnis

1.	verwendeter Motorversuchsaufbau	4
2.	verwendetes Entwicklungstool	4
3.	Schematischer Aufbau des Modells in Simulink.	5
4.	Bestimmung der Rotorflussvektors. Alle Größen mit Indizierung r bzw. s bedeutet aus der Sicht des Rotors bzw. des Ständers. Mit dem Winkel Φ_r dreht sich der Rotor. Aus Sicht des Ständers muss sich noch zum Rotorwinkel der Schlupfwinkel Φ_{sl} berücksichtigt werden [2], Seite:368.	7
5.	Ersatzschaltbild im dq-Koordinatensystem [5], Seite:370.	8
6.	Schema des in Simulink implementierten Motormodells [2], Seite:68.	9
7.	Schema zur Erzeugung einer PWM [2], Seite:212.	10
8.	Ersatzschaltbild im Leerlauffall	12
9.	Ersatzschaltbild im Kurzschlussfall	13
10.	15

Literatur

- [1] Ralph Kennel (2013), Elektrische Antriebe und Leistungselektronik - Grundlagen und Anwendugen, Vorlesungsskript aus dem Sommersemester 2013 aus der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Universität München, München.

- [2] Bimal K. Bose, „Modern Power Electronics and AC Drives,,Prentice-Hall PTR, 2002.

- [3] Rolf Fischer, „Elektrische Maschinen“, Carl Hauser Verlag, 13.Auflage, 2006.

- [4] Hamid Khan,“Field Oriented Control: Application Note“, http://dirac.epucfe.eu/projets/wakka.php?wiki=P08B07index/download&file=Sujet_1.pdf, 14.02.2013.

- [5] Christophe Versèle, Olivier Deblecker and Jacques Lobry, „Implementation of Induction Motor Drive Control Schemes in MATLAB/Simulink/dSPACE Environment for Educational Purpose“, <https://www.intechopen.com/download/pdf/21231>, 12.02.2013.

- [6] Adel Aktaibi, Daw Ghanim, „Dynamic Simulation of a Three-Phase Induction Motor“ Using Matlab Simulink <http://necec.engr.mun.ca/ocs2011/viewpaper.php?id=21&print=1>, 19.11.2012.