

ÜBUNGSAUFGABEN

Regelung leistungselektronischer Systeme

von

M.Sc. Benedikt Schmitz-Rode

Inhaltsverzeichnis

1	Regelung eines Tiefsetzstellers	1
2	Drehzahlgeregelte Gleichstrommaschine	4
2.1	Beiblatt	6
3	Stromeinprägung	7
3.1	Beiblatt	8
4	Rotororientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine	9
5	Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine	10
5.1	Beiblatt	11
6	Rotorwinkelidentifikation einer permanentmagneterregten Synchronmaschine	12

1 Regelung eines Tiefsetzstellers

Am ETI soll zur Erweiterung des im Aufbau befindlichen Inselnetzes eine DC-Schnell-ladesäule für das Institutsfahrzeug integriert werden. Im Inselnetz soll erforscht werden, wie verschiedene leistungselektronische Teilnehmer, wie z.B. Solarwechselrichter, Batteriespeicher, Netz- und Maschinenumrichter miteinander interagieren. Eine Herausforderung stellt dabei die Stabilität des Inselnetzes dar, weil die Stützung durch große rotierende Massen (Kraftwerksgeneratoren) entfällt. Als Besonderheit sollen die Umrichter auf der Eingangsspannungsseite auf eine gemeinsame DC-Schiene gekoppelt werden. Die Stabilität des Microgrid sowie die DC-seitige Kopplung der unterschiedlichen leistungselektronischen System soll in diesem Microgrid erforscht werden.

Um eine große Bandbreite an unterschiedlichen Fahrzeugbatterien laden zu können soll die DC-Ladesäule ausgangsseitig einen weiten Spannungsbereich abdecken können. Zur optimalen Ladung der Batterie sollen Konstantstrom und -spannungs Ladeprofile einstellbar sein. In der Aufgabe wird vereinfachend ein einphasiger Tiefsetzsteller angenommen.

Zum sicheren Betrieb des in der Schnellladesäule verbauten Tiefsetzstellers (TSS) sollen Sie eine Regelung entwerfen.

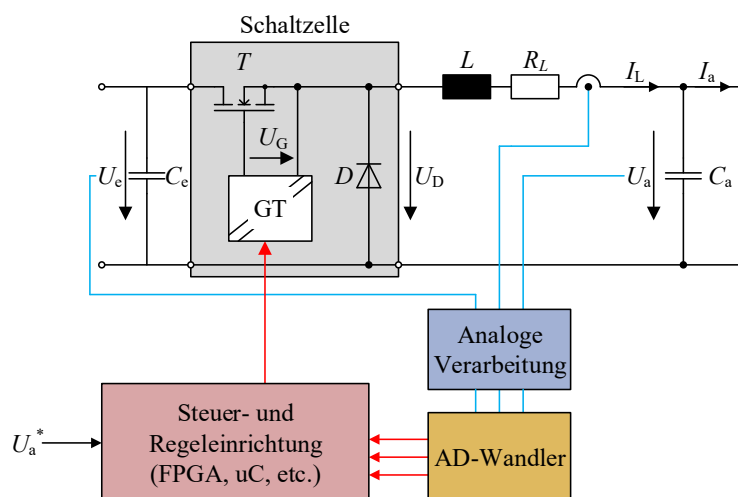


Abbildung 1: Blockschaltbild eines einphasigen TSS mit Regelung

Folgende Daten sind gegeben:

$$\text{Induktivität} \quad L = 100 \mu\text{H} \quad (1.1)$$

$$\text{Widerstand der Drossel} \quad R_L = 0.5 \text{ m}\Omega \quad (1.2)$$

$$\text{Ausgangskapazität} \quad C_a = 560 \mu\text{F} \quad (1.3)$$

$$\text{Schaltfrequenz} \quad f_{\text{sw}} = 100 \text{ kHz} \quad (1.4)$$

$$\text{Bandbreite des Stromsensors} \quad f_{3\text{db}} = 300 \text{ kHz} \quad (1.5)$$

$$(1.6)$$

Vereinfachende Annahmen:

- Der Stromsensor kann als Tiefpass 1. Ordnung modelliert werden.
- Die Spannungsmessung erfolgt über einen frequenzkompensierten Spannungsteiler.
- Transistor und Diode können als ideale Bauteile betrachtet werden.
- Die (in der Praxis notwendige) galvanische Trennung des Tiefsetzstellers erfolgt bereits auf der Seite des Microgrids.
- Filter, Isolationsmonitoring und Symmetrierung der DC-Schiene werden nicht betrachtet.

Aufgaben:

- a) Zeichnen Sie den kaskadierten Regelkreis des Tiefsetzstellers. Modellieren Sie hierbei Regelung, Modulation, Stellglied, Messung und Strecke im ersten Schritt unabhängig voneinander. Welche Bedingung muss für die Modellierung als Kaskadenregelung eingehalten werden?
- b) Legen Sie nun den inneren Regelkreis aus. Zeichnen sie das Ersatzschaltbild für die inneren Stromregelstrecke und leiten Sie die Übertragungsfunktion $G(s) = \frac{I_L}{U_d}$ her. Welche Vereinfachung können Sie hier bei dem Tiefsetzsteller in guter Näherung treffen? Vergleichen Sie im Bodediagramm die Übertragungsfunktionen mit und ohne Vereinfachung.
- c) Stellen Sie die Übertragungsfunktion des Stellgliedes und der Messung auf und linearisieren Sie diese wenn nötig.

- d) Geben Sie die Übertragungsfunktion des offenen Stromregelkreises $F_o(s)$ an. Welcher Regler bietet sich für die abgeleitete Strecke an?
- e) Legen Sie den Regler mit Hilfe des Frequenzkennlinienverfahrens aus. Sie wollen für ein gutes Regelergebnis einen Phasenrand von 70° einhalten. Welche Regelparameter erhalten Sie?
- f) Wie sieht die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises aus? Approximieren Sie den geschlossenen Regelkreis mit einem PT1-Glied. Vergleichen Sie anschließend die beiden Übertragungsfunktionen.
- g) Stellen Sie die Gesamtregelstrecke des Spannungsreglers auf und wenden Sie das Symmetrische Optimum an.

2 Drehzahlgeregelte Gleichstrommaschine

Eine mit Nennfluß fremderregte Gleichstrommaschine (GM) wird über einen selbstgeführten Stromrichter (Vierquadrantensteller) aus einem Gleichspannungszwischenkreis gespeist, welcher seine Energie über einen netzseitigen selbstgeführten Stromrichter (Active-Front-End) aus dem Drehstromnetz bezieht. Die GM soll in der Drehzahl geregelt werden, wozu eine quasikontinuierlich ausgelegte Kaskadenregelung mit unterlagertem Stromregelkreis benutzt werden soll. Die Regelung des Umrichters erfolgt mit einem digitalen Signalprozessor (DSP), welcher periodisch alle $t_{TR} = 125\mu s$ neue Sollwerte berechnet und diese an den Vierquadrantensteller ausgibt. Die mittlere Totzeit des Vierquadrantenstellers beträgt $t_{TSG} = \frac{t_{TR}}{2}$.

Die Daten der Maschine sind:

$$\text{Nennspannung} \quad U_{AN} = 250 \text{ V} \quad (2.1)$$

$$\text{Nennstrom} \quad I_{AN} = 50 \text{ A} \quad (2.2)$$

$$\text{Ankerwiderstand} \quad R_A = 750 \text{ m}\Omega \quad (2.3)$$

$$\text{Ankerinduktivität} \quad L_A = 10 \text{ mH} \quad (2.4)$$

$$\text{Trägheitsmoment} \quad J = 0.15 \text{ Ws}^3 \quad (2.5)$$

$$\text{Nennzahl} \quad n_N = 1600 \text{ min}^{-1} \quad (2.6)$$

Entwerfen Sie Strom- und Drehzahlregler für diesen Antrieb.

- Zeichnen sie das Schaltbild des Antriebssystems
- Ermitteln Sie aus den Modellgleichungen der Gleichstrommaschine das Struktur- und das Übertragungsbild der Ankerstroms $\frac{i_A}{u_A}(s)$. Berechnen Sie die Ankerkreiszeitkonstante T_A und die elektromechanische Zeitkonstante T_M , die sich aus der Übertragungsfunktion ablesen lassen. Ermitteln Sie eine vereinfachte Übertragungsfunktion, in der Sie die induzierte Spannung als Störgröße auffassen, und vergleichen Sie sie mit der zuerst ermittelten Übertragungsfunktion.
- Wählen Sie einen geeigneten Stromregler für die vereinfachte Strecke unter Beachtung der Totzeiten von Umrichter und Signalverarbeitung. Berechnen Sie die Reglerparameter für eine Dämpfung von $d = \frac{1}{\sqrt{2}}$ des geschlossenen Regelkreises. Wie groß ist die Ersatzzeitkonstante für eine Näherung des geschlossenen Regelkreises durch ein PT_1 -Glied?
- Untersuchen Sie die Vernachlässigung der induzierten Spannung auf den Reglerentwurf. Ist der entstandene geschlossene Regelkreis stationär genau?
- Entwerfen sie den Drehzahlregelkreis nach dem symmetrischen Optimum. Wie können sie das Überspringen bei einem Sollwertsprung dämpfen?

- f) Zur Verhinderung von Regler-Windup und zur sicheren Inbetriebnahme des Systems sollen geeignete Begrenzungen für das elektrische Moment $M_{i,max}$, dem maximalen Ankerstrom $I_{A,max}$ und der maximalen Ankerspannung $U_{A,max}$ ergänzt werden. Vervollständigen sie dazu das Strukturbild aus dem vorherigen Aufgabenteil.

Literatur

Föllinger, „Regelungstechnik, Einführung in ihre Methoden und ihre Anwendung

Schröder, „Elektrische Antriebe Regelung von Antriebssystemen

Kiencke, Jäkel, „Signale und Systeme

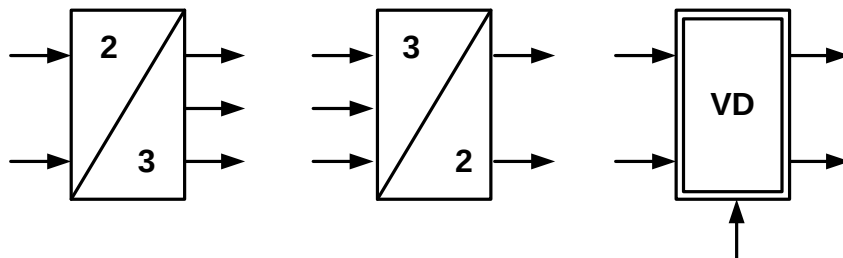
2.1 Beiblatt

3 Stromeinprägung

Mit Hilfe einer gesteuerten Spannungsquelle (z. B. einem Spannungswischenkreisumrichter) sollen Ströme in ein dreiphasiges symmetrisches Wicklungssystem (z. B. Maschinenstator) eingeprägt werden. Der Sollwert sei als Raumzeiger gegeben. Verzögerungen durch das Stellglied oder der Istwerterfassung können vernachlässigt werden. Die Kopplung der Wicklungen untereinander kann bei der Beschreibung mit Raumzeigern ebenfalls vernachlässigt werden.

- Entwerfen Sie einen PI-Regler für eine einzelne Wicklung mit $L = 1.9 \text{ mH}$ und $R = 170 \text{ m}\Omega$ in der Art, dass die geregelte Strecke einem Sollwertsprung zehn Mal so schnell folgt, wie die unregelte Strecke einem Stellgrößensprung.
- Erweitern Sie die Anordnung um weitere zwei Wicklungen und verwenden Sie als Sollgröße einen Stromraumzeiger. Reduzieren Sie die Anzahl der Regler auf zwei: Einen für den Real- und einen für den Imaginärteil des Stromraumzeigers.
- Im Wicklungssystem soll jetzt ein Drehfeld erzeugt werden. Bei der Vorgabe eines rotierenden Stromsollraumzeigers weichen Amplitude und Phase der erzeugten Ströme auch nach längerer Zeit vom Sollwert ab. Dieses Problem soll gelöst werden, indem die Regler in einem rotierenden Koordinatensystem arbeiten. Ergänzen Sie dafür die Struktur.
- Der entstandene Regelkreis verhält sich möglicherweise schwerfälliger als erwartet. Korrigieren Sie die Struktur, um mit den gegebenen Reglern schnellstes Verhalten zu erreichen.

Hinweis: Benutzen Sie für die Strukturbilder $2 \rightarrow 3$ -Wandler, $3 \rightarrow 2$ -Wandler und Vektordreher.



3.1 Beiblatt

Dargestellt sind folgende auf $\hat{i}$ bezogene zeitliche Verläufe im Strang 1 (Zeitachse in Sekunden):

- Sollwert des Stroms, $i_{w1}(t) = \hat{i} \cos(\omega t)$ mit Startwert 1
- Verlauf des Stromistwerts $i_1(t)$ im jeweiligen Strukturbild mit Startwert 0.
- Verlauf der Abweichung, d. h. der Differenz aus Ist- und Sollwertverlauf $\Delta i_1(t) = i_1(t) - i_{w1}(t)$, beginnend bei -1 .

Bei allen Teilaufgaben gilt $\omega = 2\pi 50 \text{ Hz}$.

4 Rotororientierte Regelung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine

Für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit sinusförmiger Stromeinprägung, integriertem Resolver und einem Rotor mit aufgeklebten Seltene-Erden-Magneten soll eine feldorientierte Regelung in rotororientierten Koordinaten entworfen werden.

Als Stellglied dient ein selbstgeführter Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis und Bremssteller, der über eine Diodenbrücke aus dem 400V-Drehspannungsnetz gespeist wird. Die Regelung des Umrichters erfolgt mit einem digitalen Signalprozessor (DSP), welcher periodisch alle $t_{TR} = 125\mu\text{s}$ neue Sollwerte berechnet und diese an den selbstgeführten Wechselrichter ausgibt. Die mittlere Totzeit des Wechselrichters beträgt in dieser Anwendung $t_{TSG} = \frac{t_{TR}}{2}$.

$$\text{Nenndrehzahl} \quad n_N = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (4.1)$$

$$\text{Nennmoment} \quad M_N = 21 \text{ N m} \quad (4.2)$$

$$\text{Nennspannung} \quad U_N = 330 \text{ V} \quad (4.3)$$

$$\text{Nennstrom} \quad I_{SN} = 13.5 \text{ A} \quad (4.4)$$

$$\text{Induktivität} \quad L_d = L_q = 5.94 \text{ mH} \quad (4.5)$$

$$\text{Statorwiderstand (bei } 20^\circ\text{C)} \quad R_S = 235 \text{ m}\Omega \quad (4.6)$$

$$\text{Überlastbarkeit} \quad \ddot{u} = 2 \quad (4.7)$$

$$\text{Polpaarzahl} \quad p = 3 \quad (4.8)$$

$$\text{Trägheitsmoment} \quad J = 3.6 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2 \quad (4.9)$$

- Zeichnen Sie das leistungselektronische Schaltbild des Antriebs.
- Zeichnen Sie das regelungstechnische Blockschaltbild des Antriebs.
- Berechnen Sie die Reglerparameter für die nach dem Betragsoptimum auszulegen- den Stromregler.
- Berechnen Sie die Reglerparameter für den nach dem symmetrischen Optimum auszulegenden Drehzahlregler.
- Berechnen Sie die Spannungs-, Strom- und Statorflußraumzeiger für die Fälle Leer- lauf, Nennbetrieb und maximale Überlastung.

5 Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine

Die Systemgleichungen der Asynchronmaschine sind:

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S - j \dot{\gamma}_S \underline{\Psi}_S + \underline{\dot{\Psi}}_S \quad (5.1)$$

$$0 = R'_R \underline{i}'_R - j \dot{\gamma}_R \underline{\Psi}'_R + \underline{\dot{\Psi}}'_R \quad (5.2)$$

$$\underline{\Psi}_S = (L_h + L_{S\sigma}) \cdot \underline{i}_S + L_h \underline{i}'_R \quad (5.3)$$

$$\underline{\Psi}'_R = L_h \underline{i}_S + (L_h + L'_{R\sigma}) \cdot \underline{i}'_R \quad (5.4)$$

$$M = \frac{3}{2} p L_h \cdot \text{Im} \{ \underline{i}_S \underline{i}'_{R*} \} \quad (5.5)$$

- a) Ermitteln Sie aus den Systemgleichungen die Gleichungen für die feldorientierte Regelung. Reduzieren Sie dazu das Gleichungssystem in dem Sie die Zustandsgrößen $\underline{i}'_R$ und $\underline{\Psi}_S$ eliminieren. Vereinfachen Sie die erhaltenen Gleichungen durch die Wahl des Bezugssystems.
- b) Leiten Sie das Strommodell zur Schätzung des Rotorflussraumzeigers ab. Berechnen Sie die Rotorzeitkonstante aus den Parametern der Asynchronmaschine:

$$R'_R = 0.063 \, \Omega \quad (5.6)$$

$$R_S = 0.063 \, \Omega \quad (5.7)$$

$$L_h = 0.015 \, \text{H} \quad (5.8)$$

$$L_{S\sigma} = 890 \, \mu\text{H} \quad (5.9)$$

$$L'_{R\sigma} = 890 \, \mu\text{H} \quad (5.10)$$

- c) Vergleichen Sie die feldorientierte Regelung mit Strommodell mit der Kennliniensteuerung für eine mit Stromquelle betriebene Asynchronmaschine.

5.1 Beiblatt

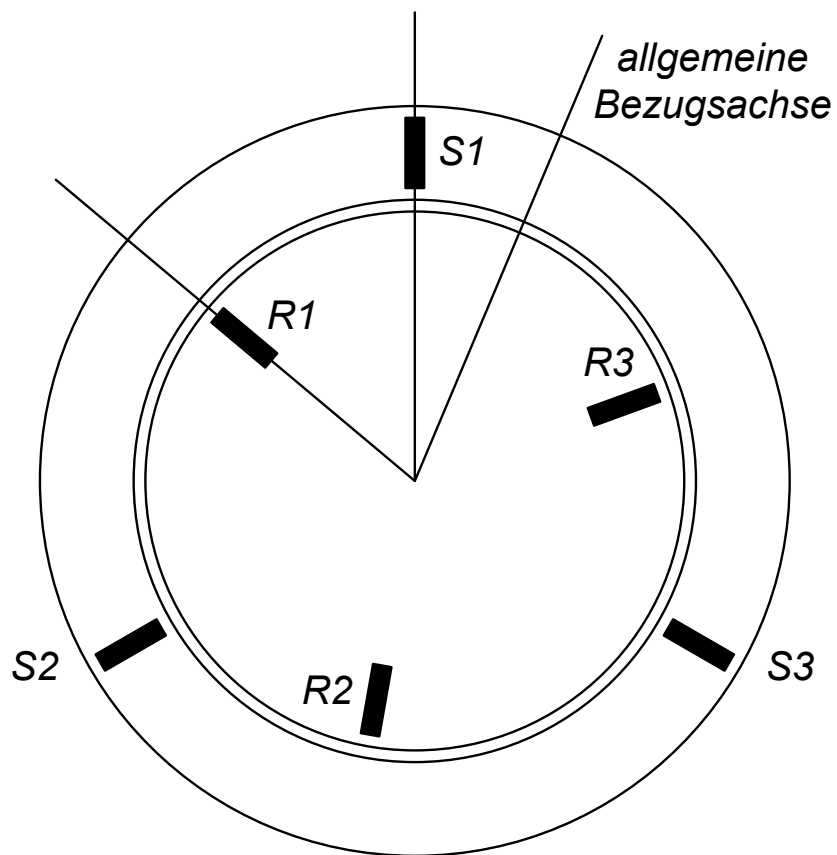


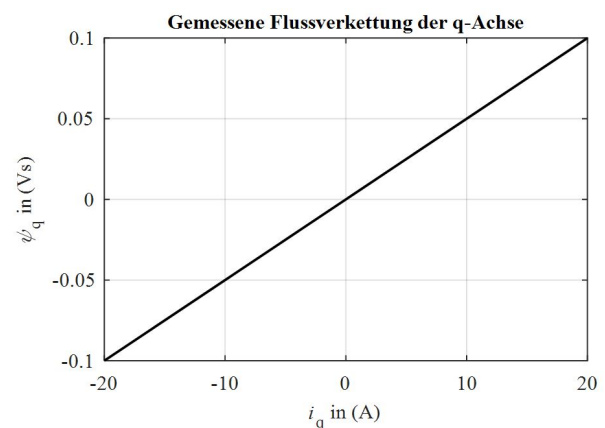
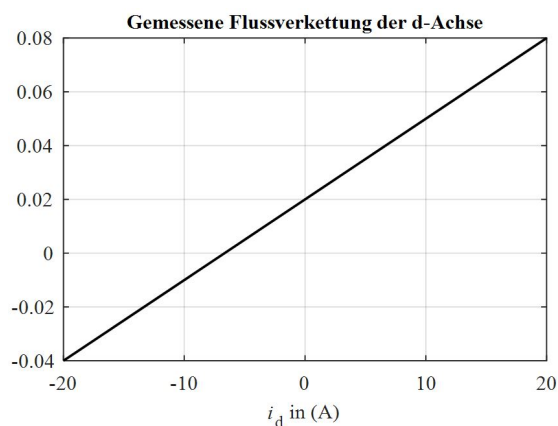
Abbildung 2: Schnittbild der Asynchronmaschine

6 Rotorwinkelidentifikation einer permanentmagneterregten Synchronmaschine

Eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit sinusförmiger Stromeinprägung und einem Läufer mit Seltene-Erden-Magneten soll mit einer feldorientierte Regelung in rotororientierten Koordinaten betrieben werden. Beim Ausfall des Resolver, welcher die notwendige Rotorlage detektiert, soll die Maschine geberlos im Stillstand wie auch bei hohen Drehzahlen geregelt werden können. Die hierfür notwendige Methode wie auch die notwendigen Parameter sollen im Folgenden hergeleitet werden.

Von der permanentmagneterregten Synchronmaschine liegen durch Parametermessung folgende Messdaten vor:

- Widerstandsmessung an der Anschlussklemme der permanentmagneterregten Synchronmaschine: $R_{\text{Klemme}} = 470 \text{ m}\Omega$
- Messung der Flussverkettung am Prüfstand. Bei konstanter Drehzahl werden die folgenden Flussverkettungen $\psi_d(i_d)$ bei $i_q = 0 \text{ A}$ sowie $\psi_q(i_q)$ bei $i_d = 0 \text{ A}$ ermittelt.



- Kenndaten des Maschinen Typenschildes:

$$\text{Nenndrehzahl} \quad n_N = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (6.1)$$

$$\text{Nennmoment} \quad M_N = 25 \text{ N m} \quad (6.2)$$

$$\text{Polpaarzahl} \quad p = 3 \quad (6.3)$$

$$\text{Nennstrom} \quad I_{\text{SN}} = 15 \text{ A} \quad (6.4)$$

$$\text{Trägheitsmoment} \quad J = 4 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2 \quad (6.5)$$

d) Weitere Annahmen:

Die Maschine ist im Stern verschalten, die Parameter sind nicht temperaturabhängig, es existiert keine Sättigung und Kreuzverkopplung (lineare, ideale elektrische Maschine). Verlusteffekte wie Eisenverluste, usw. können vernachlässigt werden.

Weiterführende Literatur:

[1] Braun, Prof. Dr.-Ing. M., Skriptum zur Vorlesung „Regelung elektrischer Antriebe,“ Sommersemester 2019.

Für Studierende des KITs unter <http://ieeexplore.ieee.org> verfügbar:

[2] D. Paulus, P. Landsmann and R. Kennel, „General arbitrary injection approach for synchronous machines,“ 2013 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (SLED/PRECEDE), Munich, 2013, pp. 1-6.

[3] W. Zine et al., „Optimisation of HF signal injection parameters for EV applications based on sensorless IPMSM drives,“ in IET Electric Power Applications, vol. 12, no. 3, pp. 347-356, 3 2018.

Bestimmung der Systemgleichungen und Parameter für die Identifikation des Rotorwinkels

- a) Bestimmen Sie aus den vorhandenen Messgrößen die notwendigen Parameter L_d , L_q , ψ_{PM} , R der permanentmagnetenerregten Synchronmaschine in rotororientierten Koordinaten.

Hinweis: Beschreiben Sie die Systemgleichungen mit Induktivitäten als Parameter und stellen Sie diese in Matrix-Schreibweise da, siehe [1], [2].

- b) Wie kann der Rotorwinkel bei hohen Drehzahlen und im Stillstand bestimmt werden und was sind hierfür die Voraussetzungen?

Im Folgenden soll nun die Identifikation des Rotorwinkels im Stillstand untersucht werden.

- c) Vereinfachen Sie die in a) aufgestellte Systemgleichungen in rotororientierten Koordinaten für eine Anregung mit einem hochfrequenten Strom in der d- und q-Achse. Es gilt $i_{dq} = i_{dq,Grundwelle} + i_{dq,HF}$

Hinweis:

Beachten Sie nur die relevanten Größen im aktuellen Betriebspunkt (Stillstand) und vereinfachen Sie geschickt die Gleichung der Synchronmaschine.

- d) Transformieren Sie die Parameter (Induktivitäten) von rotororientierten Koordinaten zurück in statorfeste Koordinaten.

Hinweis:

Für die transformierte Matrix $L_{\alpha\beta}$ gilt $T \cdot L_{dq} \cdot T^{-1}$ wobei T der Transformationsmatrix entspricht.

- Vereinfachen Sie Ihr Ergebnis geschickt durch Additionstheoreme.

- Bestimmen Sie T und T^{-1} .

- Für die weitere Berechnung kann angenommen werden $\Delta L = \frac{(L_d - L_q)}{2}$ und $\Sigma L = \frac{(L_d + L_q)}{2}$

e) Im Folgenden soll die permanentmagneterregte Synchronmaschine im Stillstand mit den Strömen $i_\alpha = \hat{i}_{\text{test}} \cdot \sin(\omega_{\text{test}} \cdot t)$ und $i_\beta = \hat{i}_{\text{test}} \cdot \cos(\omega_{\text{test}} \cdot t)$ angeregt werden. Die zugehörige Frequenz f_{test} ist dabei 500 Hz, die Amplitude $\hat{i}_{\text{test}}$ beträgt 2 A. Skizzieren Sie den entsprechenden Strom in ein Diagramm (Ströme in $\alpha\beta$ - Darstellung als Achse) mit einer Auflösung von $\frac{5 \text{ mm}}{\text{Ampere}}$.

f) Zeichnen Sie die sich einstellende Spannungen zu den Punkten $\omega_{\text{test}} \cdot t = \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, 2\pi$ ebenfalls in das Diagramm ein. Gehen Sie dabei von einem festen Rotorwinkel von $\gamma = 60^\circ$ aus.

Hinweis:

Verwenden Sie die von Ihnen hergeleiteten Zusammenhänge aus Teilaufgabe c) und d).

g) Interpretieren Sie das Ergebnis und leiten Sie daraus eine Identifikationsvorschrift ab. Wann könnte das beschriebene Verfahren nicht eindeutig sein?