



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Max Gayer

Netzleistungsregelung eines
Windenergie-Laborversuchstands mit
Asynchrongenerator für Vollumrichter- und
doppelt gespeisten Betrieb

Max Gayer

Netzleistungsregelung eines
Windenergie-Laborversuchsstands mit
Asynchrongenerator für Vollumrichter- und doppelt
gespeisten Betrieb

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Masterstudiengang Automatisierung
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.Ing. Michael Röther
Zweitgutachter : Prof. Dr.Ing. Gustav Vaupel

Abgegeben am 06.10.2016

Max Gayer

Thema der Masterthesis

Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator

Stichworte

Doppelt gespeister Asynchrongenerator, Leistungsregelung, entkoppelte Regelung, Kaskadenregelung, Windenergie

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Simulation, die Umsetzung sowie die Validierung einer Leistungsregelung für eine Windkraftanlage. Dabei werden zwei Betriebsarten betrachtet: Die Asynchronmaschine mit Netzanschluss über einen Vollumrichter sowie die doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit Stator direkt am Netz und rotorseitigem Umrichter. Es können Wirk- und Blindleistung getrennt voneinander eingestellt werden.

Max Gayer

Title of the paper

Test bench of grid-connected wind power system with doubly fed induction generator

Keywords

Power control, cascade control, decoupling control, doubly fed induction generator, wind power

Abstract

The present work describes the simulation, implementation and validation of a power control for a wind turbine. Two modes are considered: The asynchronous machine with a grid connection via a full-scale converter as well as double-fed asynchronous machine with stator directly connected to the grid and rotor converter. Active and reactive power can be adjusted separately.

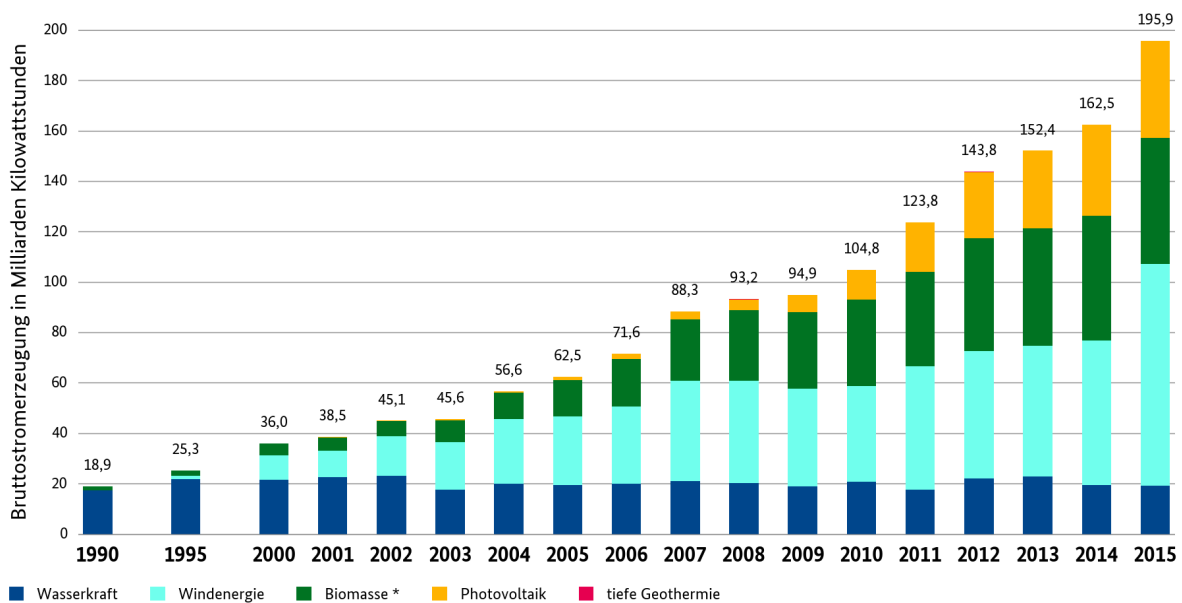
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Generatorkonzepte	7
1.2	Aufgabe	10
2	Grundlagen	11
2.1	Raumzeigertransformation	11
2.2	Koordinatensysteme	14
2.3	Modellbildung der Asynchronmaschine	15
2.3.1	Grundgleichungen der Asynchronmaschine	17
2.3.2	Vollumrichter Asynchronmaschine	21
2.3.3	Doppelt gespeiste Asynchronmaschine	22
2.4	Stromreglerauslegung nach Betragsoptimum	27
2.5	Leistungsregelung	28
2.5.1	Stellgrößen für Wirk- und Blindleistung	29
2.5.2	Regelungstechnische Blockschaltbilder für Vollumrichter und doppelt gespeiste Asynchronmaschine (DGASM)	31
2.5.3	Auslegung Leistungsregler	33
3	Der Versuchsstand	35
3.1	Konstruktive Änderung des Schaltschranks für die Asynchronmaschine	38
4	Änderungen vorhergehender Regelungen	39
4.1	Änderungen doppelt gespeiste Asynchronmaschine	39
4.2	Beide Betriebsarten	43

5 Realisierung	48
5.1 Simulation	48
5.2 Laboranlage	55
6 Zusammenfassung	58
6.1 Ausblick	59
Abbildungsverzeichnis	60
Tabellenverzeichnis	62
Symbolverzeichnis	63
Abkürzungsverzeichnis	69
Literaturverzeichnis	70

1 Einleitung

Mit zunehmender Nutzung der Windenergie (vgl. Abbildung 1.1) treten die Probleme mit kurzzeitig schwankender Leistungsabgabe, verursacht durch Windfluktuationen, immer mehr in den Vordergrund. Diese müssen ausgeregelt werden um Unruhe im Netz zu vermeiden.



* inkl. feste und flüssige Biomasse, Biogas inkl. Biomethan, Klär- und Deponiegas und dem biogenen Anteil des Abfalls, ab 2013 inkl. Klärschlamm; BMWi auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand: Februar 2016; Angaben vorläufig

Abbildung 1.1: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland, Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Besondere Bedeutung haben dabei große Anlagen im Megawatt-Bereich, da diese großen Einfluss auf die Netzstabilität haben. Durch Einsatz von drehzahlvariablen Generatoren können schnelle Windfluktuationen ausgeregelt werden. Die schwankende Windenergie kann im Sekundenbereich in den Rotorblättern gespeichert werden.

Weltweit zeichnet sich ebenso ein zunehmender Trend der Nutzung von Windenergie ab. Nach [PRP13] hat sich die installierte Leistung zwischen den Jahren 2000 und 2006 mehr als vervierfacht. Ende 2012 lag die installierte Leistung bei 283 *GW*. Sie ist im Vergleich zum Vorjahr um über 44 *GW* gewachsen.

In dieser Arbeit wird zunächst das mathematische Verhalten des Asynchrongenerators sowohl im Betrieb mit Vollumrichter als auch im doppelt gespeisten Betrieb beschrieben und der Entwurf für die Regelung von Wirk- und Blindleistung für beide Betriebsarten analysiert. Anschließend wird mit Hilfe einer Simulation in Simulink[®] der Regelungsentwurf getestet und optimiert. Abschließend werden diese Ergebnisse auf einer 5 *KW* Versuchsanlage im Labor implementiert und die Ergebnisse diskutiert.

1.1 Generatorkonzepte

Im folgenden Kapitel werden die drei heutzutage am meisten eingesetzten Generatorkonzepte kurz erläutert.

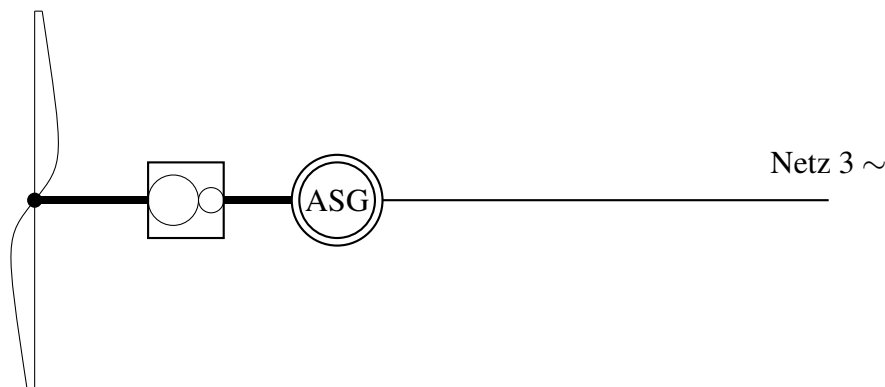


Abbildung 1.2: Asynchrongenerator mit direkter Netzeinspeisung, entnommen aus [Bü15]

Das erste Konzept ist eine Windkraftanlage mit einem Kurzschlussläufer Asynchrongenerator welcher direkt an das Netz angeschlossen wird (vgl. Abbildung 1.2). Die Welle des Generators wird über ein Getriebe mit dem Rotor der Anlage gekoppelt. Damit können, je nach Polpaarzahl, nur feste

Betriebspunkte erreicht werden. Von Vorteil ist jedoch der kostengünstige und einfache Aufbau, da auf teure Leistungselektronik verzichtet werden kann.

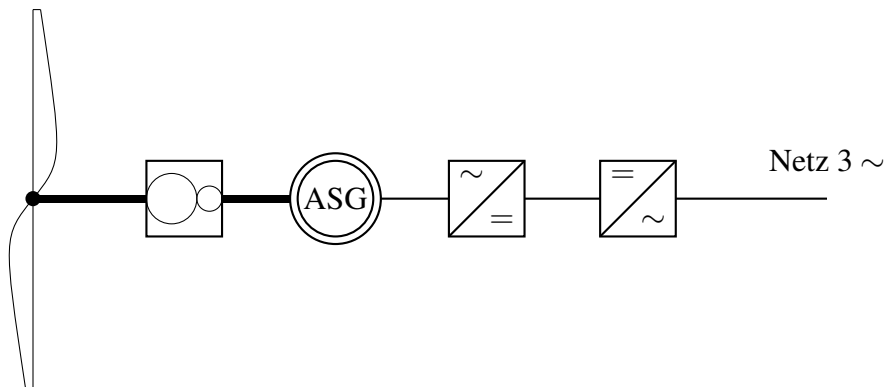


Abbildung 1.3: Asynchrongenerator mit Vollumrichter, entnommen aus [Bü15]

In Abbildung 1.3 ist das Konzept mit Vollumrichter dargestellt. Meistens wird der Generator über ein Getriebe mit dem Rotor verbunden. Dieses Konzept erlaubt die volle Ausnutzung des Drehzahlbereichs der Asynchronmaschine (ASM) und ermöglicht eine Einspeisung von konstanter Wirk- und Blindleistung im dynamischen Betrieb. Es entstehen jedoch hohe Kosten durch die Auslegung der Leistungselektronik für die gesamte Generatorleistung. Oft wird anstelle des Asynchrongenerators ein vielpoliger Synchrongenerator eingesetzt, wobei dann auf ein Getriebe verzichtet werden kann.

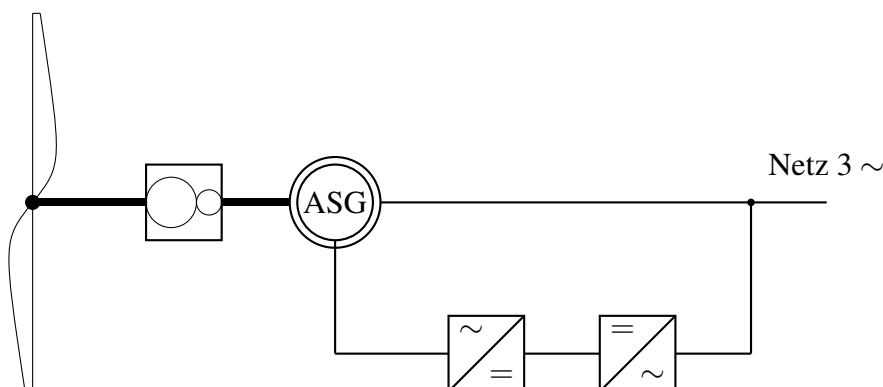


Abbildung 1.4: Doppelt gespeister Asynchrongenerator, entnommen aus [Bü15]

Eines der derzeit am häufigsten eingesetzten Generatorkonzepte (vgl. [Fra12] S.59 ff) ist in Abbildung 1.4 dargestellt. Dabei wird der Rotor über einen Umrichter mit einstellbarer Frequenz gespeist

und der Stator direkt an das Netz angeschlossen. Durch Veränderung der Frequenz der Rotorströme ist dieses Konzept ebenfalls drehzahlvariabel. Der typische Drehzahlbereich liegt im Bereich um 25 % - 30 % bezüglich der Synchrondrehzahl. Somit kann auch konstante Wirk- und Blindleistung eingespeist werden. Im Gegensatz zum zweiten Konzept muss der Umrichter nur auf die Rotorleistung, welche dann 25 % - 30 % der Statorleistung beträgt, ausgelegt werden und bietet somit einen Kostenvorteil.

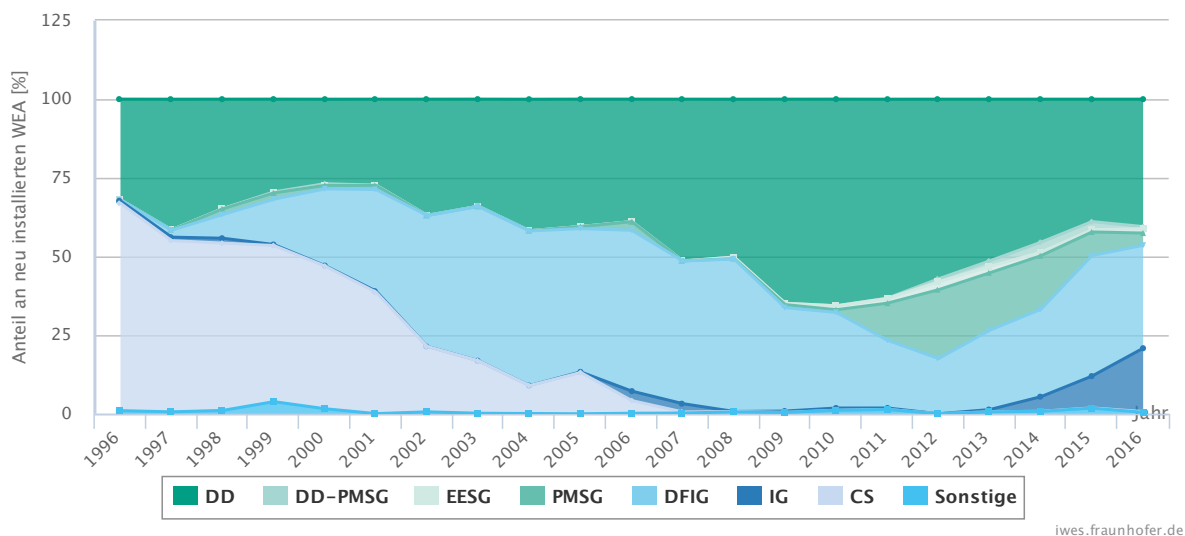


Abbildung 1.5: Anlagenzubau nach Anlagenkonzept: DD (Direktantrieb), DD-PMSG (Direktantrieb mit Permanentmagnet-Generator), EEGS (Getriebeanlage mit fremderregtem Synchrongenerator), PMSG (Getriebeanlage mit permanenterregtem Generator), DFIG (Getriebeanlage mit doppeltgespeistem Asynchrongenerator), IG (Getriebeanlage mit Asynchrongenerator), CS (Drehzahlstarre WEA) und Sonstige, Quelle: Fraunhofer

Abbildung 1.5 verdeutlicht die Bedeutung des doppelt gespeisten Asynchrongenerators (DFIG). Im Jahr 2013 ging die Bedeutung zwar etwas zurück, jedoch zeigt sich ein deutlich steigender Trend in den letzten Jahren. Ob das Konzept des doppelt gespeisten Generators das Konzept der Zukunft bleibt, ist bei immer günstiger werdenden Synchrongeneratoren und dazugehöriger Leistungselektronik nicht gesichert. Sicher ist jedoch, dass der DGASM in den nächsten Jahren noch hohe Bedeutung zugesprochen werden kann.

1.2 Aufgabe

Für einen Praktikumsversuch im Labor für elektrische Energietechnik soll der existierende Versuchsstand einer Windenergienetzeinspeisung um eine Leistungsregelung ergänzt werden. In einer weiteren Arbeit wird eine Simulation eines Windkraftanlagenrotors mit Hilfe einer Gleichstrommaschine hinzugefügt. Im Rahmen dieser Arbeit ist für die zwei Einspeisevarianten (a) ASM mit Vollumrichter und (b) doppelt gespeister ASM eine Leistungsregelung und ein Simulationsmodell zum Test der Regelung zu entwickeln. Die im Rahmen von Vorgängerarbeiten aufgetretenen Probleme sollen behoben, sowie erarbeitete Verbesserungsmaßnahmen getestet und umgesetzt werden. Dazu zählt die Regelung so zu verändern, dass der Generator seine Nennleistung bei Variante (b) laut Datenblatt erreichen kann. Bisher konnte nur ein Drehmoment von $12,5 \text{ Nm}$ (siehe [Bü15]) erreicht werden. Das Nenndrehmoment des Generators liegt jedoch bei 33 Nm . Darüber hinaus soll die Leistungsregelung für die Einspeisevarianten (a) und (b) auf die Hardware portiert, getestet und validiert werden.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert die für diese Arbeit relevanten Grundlagen, welche zur Lösung der Aufgabe notwendig sind. Um die folgenden Kapitel vollständig zu verstehen, sollte der Leser Grundkenntnisse in folgenden Themengebieten haben:

- Komplexe Rechnung
- Regelungstechnik
- Kraftbildung und Mechanik elektrischer Maschinen
- Modellbildung und Simulation mit Hilfe von Matlab Simulink[®]
- Funktionsweise leistungselektronischer Stellglieder

2.1 Raumzeigertransformation

Da bei der Transformation von Dreiphasensystemen in Raumzeiger teilweise unterschiedliche Faktoren verwendet werden, wird die bei dieser Arbeit verwendete Vorgehensweise in diesem Kapitel erläutert.

Wie in [Ste13] beschrieben, ermöglicht es die Raumzeigertransformation die zeitlich und räumlich unterschiedlichen Größen in einer Größe, dem Raumzeiger, zusammenzufassen. Dies wird dadurch vereinfacht, da bei Dreiphasensystemen ohne Nullleiter die Summen der drei Ströme

und Spannungen sich immer zu null ergeben. Nachfolgend soll am Beispiel der Statorströme die Raumzeigertransformation erläutert werden.

$$i_{1a} + i_{1b} + i_{1c} = 0 \quad (2.1)$$

In Gleichung 2.1 sind i_{1a} , i_{1b} bzw. i_{1c} die drei um 120° verschobenen Statorströme einer Drehfeldmaschine. Daraus lässt sich erkennen, dass jeweils nur zwei der drei Ströme linear unabhängig sind. Betrachtet man die Phasenströme, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, als drei um 120° verdrehte Vektoren, so lässt sich eine Transformation in die komplexe Ebene durchführen. Dies ist möglich, da die Statorströme proportional zu den Statorflüssen sind und diese aufgrund der Symmetrie der Maschine um jeweils 120° zueinander gedreht sind.

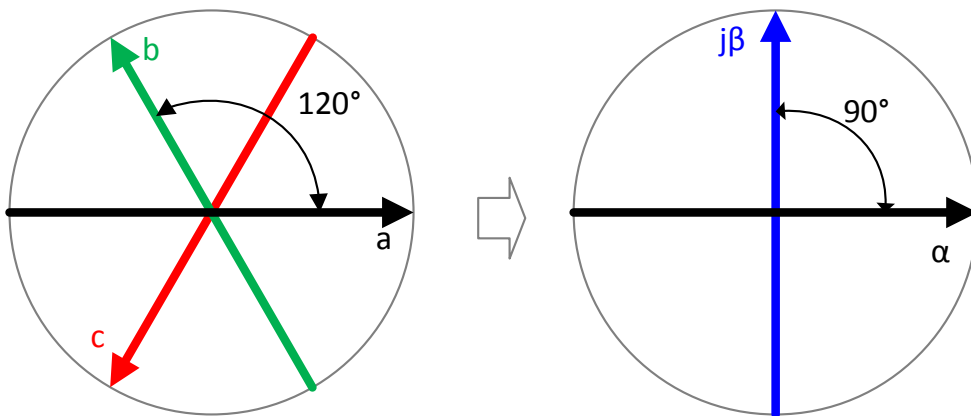


Abbildung 2.1: Winkelbeziehungen der Raumzeigertransformation

Nun kann man für jeden der drei Phasenströme einen α - und einen β -Anteil berechnen. Es wird ein Vorfaktor c zu

$$c = \frac{2}{3} \quad (2.2)$$

gewählt, sodass $i_{1a} = i_{S\alpha}$ gilt. Die Herleitung dieses Faktors kann aus [Ste13, S. 60] entnommen werden. Damit gilt:

$$i_{1\alpha} = c \left(i_{1a} + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) i_{1b} + \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) i_{1c} \right) \quad (2.3)$$

Analog erhält man für $i_{1\beta}$:

$$i_{1\beta} = c \left(\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) i_{1b} + \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) i_{1c} \right) \quad (2.4)$$

Wird $i_{1\alpha}$ als Realteil und $i_{1\beta}$ als Imaginärteil eines komplexen Zeigers aufgefasst, resultiert der Statorstromraumzeiger zu:

$$\vec{i}_1^S = c (i_{1\alpha} + j i_{1\beta}) \quad (2.5)$$

Definiert man

$$\vec{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \text{ und } \vec{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}, \quad (2.6)$$

wendet die Euler'sche Beziehung an und setzt Gleichungen 2.3 und 2.4 in Gleichung 2.5 ein, folgt für den Statorstromraumzeiger:

$$\vec{i}_1^S = \frac{2}{3} (i_{1a} + \vec{a} i_{1b} + \vec{a}^2 i_{1c}) \quad (2.7)$$

Durch Auswertung der Gleichungen 2.3 und 2.4 lässt sich folgende Transformationsmatrix aufstellen:

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Die Rücktransformationsmatrix berechnet sich durch Inversion zu:

$$\begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Für manche Berechnung ist es sinnvoll, den komplexen Zeiger in Polarkoordinaten darzustellen. Für diese Darstellung muss der Betrag und die Phase des Zeigers berechnet werden. Für den Betrag gilt:

$$\left| \vec{i}_1^S \right| = i_1^S = \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2} \quad (2.10)$$

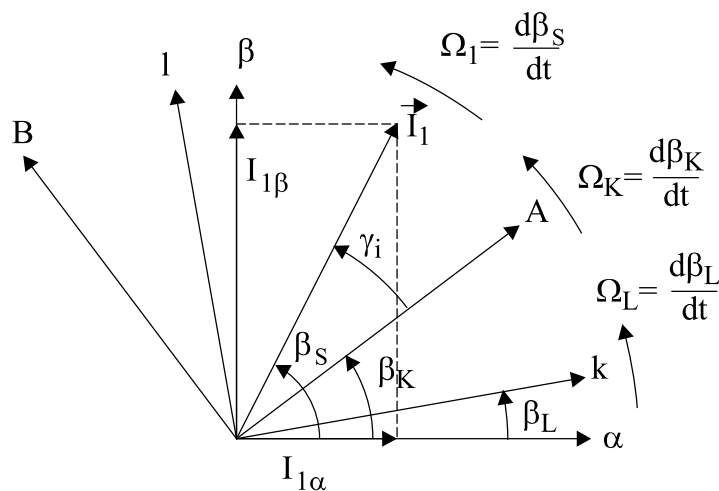
Für den Phasenwinkel φ muss die Vieldeutigkeit des Arkustangens berücksichtigt werden:

$$\varphi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{i_{1\beta}}{i_{1\alpha}}\right) & , \text{ für } i_{1\alpha} > 0 \\ \arctan\left(\frac{i_{1\beta}}{i_{1\alpha}}\right) + \pi & , \text{ für } i_{1\alpha} < 0 \text{ und } i_{1\beta} > 0 \\ \arctan\left(\frac{i_{1\beta}}{i_{1\alpha}}\right) - \pi & , \text{ für } i_{1\alpha} < 0 \text{ und } i_{1\beta} < 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Somit lautet die Darstellung des Raumzeigers in Polarkoordinaten:

$$\vec{i}_1^S = i_1^S \cdot e^{j\varphi} \quad (2.12)$$

2.2 Koordinatensysteme



- α, β : statorfestes Koordinatensystem (Index S)
- k, l : rotorfestes Koordinatensystem (Index L)
- A, B : allgemeines Koordinatensystem (Index K)

Abbildung 2.2: Koordinatensysteme und Raumzeiger, entnommen aus [Sch09]

Die mathematische Beschreibung der Maschine kann in unterschiedlichen Bezugssystemen erfolgen (siehe Abbildung 2.2). Dabei kann das allgemeine Koordinatensystem je nach Anwendung zum Beispiel mit dem Statorfluss oder dem Rotorfluss verbunden sein. Die Wahl des Koordinatensystems

hat bei der Ableitung der regelungstechnischen Strukturbilder wesentlichen Einfluss auf die Komplexität dieser Signalflusspläne. Bei späteren Ableitungen wird die Orientierung des allgemeinen Koordinatensystems für die Vollumrichtermaschine mit dem Rotorfluss und für die doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit dem Statorfluss verbunden.

Um zwischen den Koordinatensystemen umzurechnen, werden folgende Gleichungen verwendet [Sch07]:

$$\text{S} \rightarrow \text{K-System: } \vec{I}_1^K = I_{1A} + jI_{1B} = \vec{I}_1^S \cdot e^{-j\beta_K} \quad (2.13)$$

$$\text{L} \rightarrow \text{K-System: } \vec{I}_1^K = I_{1A} + jI_{1B} = \vec{I}_1^L \cdot e^{-j\beta_K + j\beta_L} \quad (2.14)$$

$$\text{K} \rightarrow \text{S-System: } \vec{I}_1^S = I_{1\alpha} + jI_{1\beta} = \vec{I}_1^K \cdot e^{j\beta_K} \quad (2.15)$$

$$\text{K} \rightarrow \text{L-System: } \vec{I}_1^L = I_{1k} + jI_{1l} = \vec{I}_1^K \cdot e^{j\beta_K - j\beta_L} \quad (2.16)$$

2.3 Modellbildung der Asynchronmaschine

Das folgende Kapitel ist inhaltlich überwiegend aus [Sch09] entnommen. Es werden die wichtigen Grundlagen, welche im Zusammenhang dieser Arbeit stehen, zum Verständnis der ASM zusammengestellt und erläutert.

Aufgrund des robusten Aufbaus ist die ASM eine wichtige Alternative zur Gleichstrommaschine (GM). Durch große technische Fortschritte bei sowohl Leistungs- als auch signalverarbeitender Elektronik ist die ASM exakt regelbar in Drehmoment und Drehzahl.

Für die mathematische Beschreibung werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- sowohl Stator als auch Rotor bestehen aus einem symmetrischem, dreiphasigem Wicklungssystem
- alle Maschinenparameter sind linear und zeitinvariant
- Vernachlässigung von Eisenverlusten, Stromverdrängung, Reibungs- und Lüftermomenten
- räumlich sinusförmiges Magnetfeld im Luftspalt

- Maschinenparameter sind Strangwerte und liegen transformiert auf den Stator vor

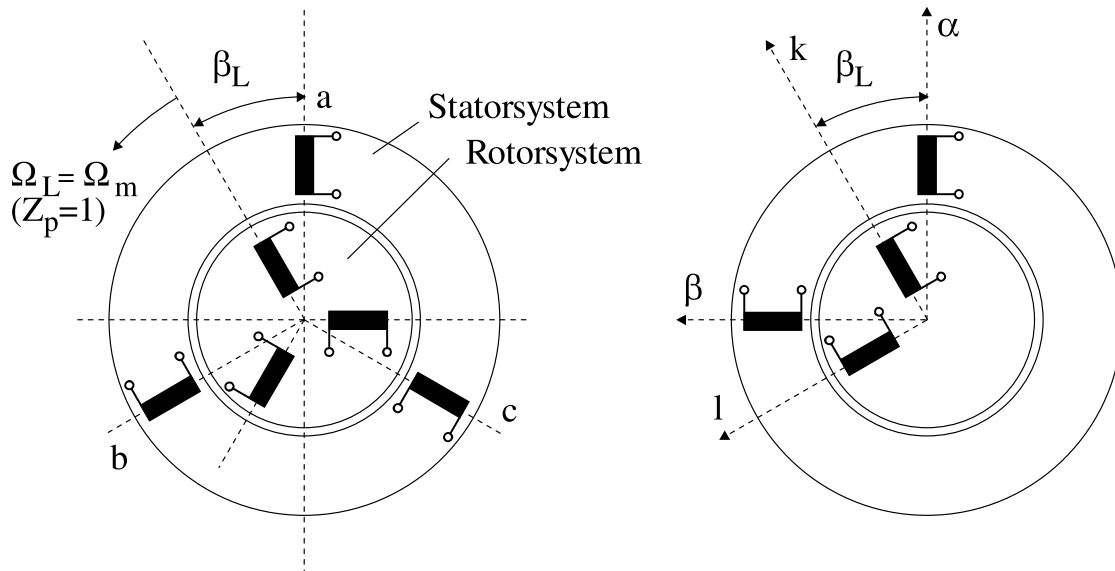


Abbildung 2.3: Prinzipbild einer Drehfeldmaschine, entnommen aus [Sch07]

In Abbildung 2.3 sind links die drei um 120° räumlich versetzten Stator- (1a, 1b, 1c) und Rotorwicklungen (2a, 2b, 2c) zu erkennen. Dieses dreiphasige System kann in ein orthogonales, zweiphasiges System transformiert werden (vgl. Abbildung 2.3 rechts). Dabei ist der Winkel zwischen Stator- und Rotorsystem als β_L definiert. Wird der Stator an ein Dreiphasensystem angeschlossen, so entsteht ein umlaufender magnetischer Fluss, das sogenannte Drehfeld. Bei einer Relativbewegung zwischen Stator und Rotor, auch Schlupf genannt, entsteht durch Induktion ein Stromsystem im Rotor. Diese induzierten Rotorströme bewirken aufgrund der Lenz'schen Regel eine Kraftwirkung auf den Rotor in Richtung des umlaufenden Magnetfeldes. Der Rotor wird dadurch beschleunigt. Für eine Drehmomentbildung ist ein asynchroner Umlauf von Magnetfeld und Rotor notwendig, woher die Asynchronmaschine ihren Namen hat. Diese Asynchronität wird als Schlupf s der Maschine bezeichnet.

In diesem Kapitel gelten folgende Darstellungsformen:

oberer Index:	S	Raumzeiger im statorfesten Koordinatensystem
	L	Raumzeiger im rotorfesten Koordinatensystem
	K	Raumzeiger in einem beliebig umlaufenden Koordinatensystem

unterer Index: 1 Statorgröße
 2 Rotorgröße

α : Realteil im statorfesten Koordinatensystem
 β : Imaginärteil im statorfesten Koordinatensystem

A : Realteil in einem beliebig umlaufenden Koordinatensystem
 B : Imaginärteil in einem beliebig umlaufenden Koordinatensystem

2.3.1 Grundgleichungen der Asynchronmaschine

In diesem Kapitel werden die Grundgleichungen einer allgemeinen ASM dargestellt. Die elektrischen und mechanischen Differentialgleichungen lauten nach [Sch09]:

Grundlage für die Modellbildung bilden die Spannungs-Differentialgleichungen für Stator- und Rotorkreis:

$$\vec{U}_1^S = R_1 \cdot \vec{I}_1^S + \frac{d\vec{\Psi}_1^S}{dt} \quad (\text{Statorkreis}) \quad (2.17)$$

$$\vec{U}_2^L = R_2 \cdot \vec{I}_2^L + \frac{d\vec{\Psi}_2^L}{dt} \quad (\text{Rotorkreis}) \quad (2.18)$$

Flussverkettungsgleichungen:

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_1^S &= L_1 \cdot \vec{I}_1^S + M \cdot \vec{I}_2^L \cdot e^{j\beta_L} \\ \vec{\Psi}_1^S &= L_1 \cdot \vec{I}_1^S + M \cdot \vec{I}_2^S \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_2^L &= M \cdot \vec{I}_1^S \cdot e^{-j\beta_L} + L_2 \cdot \vec{I}_2^L \\ \vec{\Psi}_2^S &= M \cdot \vec{I}_1^S + L_2 \cdot \vec{I}_2^S \end{aligned} \quad (2.20)$$

L_1 : Eigeninduktivität der Statorwicklung

L_2 : Eigeninduktivität der Rotorwicklung

M : maximale Gegeninduktivität zwischen Stator und Rotor

β_L : Winkel zwischen stator- und rotorfestem Koordinatensystem

Durch Auflösen der Flussgleichungen 2.19 und 2.20 nach \vec{I}_1^S und \vec{I}_2^S folgt:

$$\vec{I}_1^S = \frac{1}{\sigma L_1} \cdot \vec{\Psi}_1^S - \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \vec{\Psi}_2^S \quad (2.21)$$

$$\vec{I}_2^S = \frac{1}{\sigma L_2} \cdot \vec{\Psi}_2^S - \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \vec{\Psi}_1^S \quad (2.22)$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \quad (2.23)$$

σ : Blondelscher Streukoeffizient

Drehmomentbildung:

$$M_{Mi} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \Im \left\{ \vec{\Psi}_1^{*S} \cdot \vec{I}_1^S \right\} = -\frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \Im \left\{ \vec{\Psi}_2^{*L} \cdot \vec{I}_2^L \right\} \quad (2.24)$$

Z_p : Polpaarzahl; $Z_p = \frac{\Omega_0}{\Omega_m}$; $\Omega_0 = \Omega_{syn}$

*: konjugiert komplexer Raumzeiger

Durch Einsetzen von 2.21 bzw. 2.22 in 2.24 folgt:

$$M_{Mi} = -\frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \Im \left\{ \vec{\Psi}_1^{*S} \cdot \vec{\Psi}_2^S \right\} \quad (2.25)$$

$$M_{Mi} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \Im \left\{ \vec{\Psi}_1^S \cdot \vec{\Psi}_2^{*S} \right\} \quad (2.26)$$

Mechanik:

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{\Theta} \cdot (M_{Mi} - M_W) \quad (2.27)$$

Ω_m : mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors

Ω_{el} : elektrische Winkelgeschwindigkeit des Rotors

Θ : Trägheitsmoment

$$\Omega_m = \frac{\Omega_{el}}{Z_p}; \quad \Omega_m = 2 \pi N \quad (2.28)$$

$$\Omega_{el} = \Omega_L = \frac{d\beta_L}{dt} \quad (2.29)$$

Um ein elektrisches Ersatzschaltbild einer ASM zu entwickeln, müssen alle Größen auf den gleichen Bezug umgerechnet werden. Dieser ist meist der Stator. Da der Stator- und Rotorkreis induktiv miteinander gekoppelt sind, ist das elektrische Verhalten einer ASM mit dem eines Drehstromtransformators verwandt. Aus Analogie dazu kann man ein T-Ersatzschaltbild für eine ASM herleiten [Sch07]. Die Stator- und Rotorinduktivitäten werden entsprechend den Gleichungen 2.30 und 2.31 in eine Haupt- und eine Streuinduktivität aufgeteilt.

$$L_1 = L_{h1} + L_{\sigma 1} = L_{h1} \cdot (1 + \sigma_1)$$

$$\sigma_1 = \frac{L_1}{L_{h1}} - 1 \quad (2.30)$$

$$L_2 = L_{h2} + L_{\sigma 2} = L_{h2} \cdot (1 + \sigma_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{L_2}{L_{h2}} - 1 \quad (2.31)$$

Mit dem Übersetzungsverhältnis \ddot{u} , welches sich nach Gleichung 5.1 berechnen lässt, können die Rotorgrößen auf die Statorseite transformiert werden. Diese transformierten Größen sind mit einem hochgestellten ' gekennzeichnet (Beispiel: R'_2). Es werden folgende Umrechnungen getätigt:

$$\vec{U}'_2 = \vec{U}_2 \cdot \ddot{u} \quad (2.32)$$

$$\vec{I}'_2 = \frac{\vec{I}_2}{\ddot{u}} \quad (2.33)$$

$$R'_2 = R_2 \cdot \ddot{u}^2 \quad (2.34)$$

$$L'_2 = L_2 \cdot \ddot{u}^2 \quad (2.35)$$

$$M' = M \cdot \ddot{u} = L_{h1} = L'_{h2} \quad (2.36)$$

Daraus lässt sich das elektrische T-Ersatzschaltbild nach Abbildung 2.4 ableiten. Diese Größen werden später für die Simulation und die Berechnung der Regelungsparameter benötigt.

Durch Einführung des T-Ersatzschaltbildes wird der sogenannte Magnetisierungsstrom \vec{I}_m ersichtlich. Dieser lässt sich nach der Kirchhoff'schen Knotenregel aus der Summe von Stator- und Rotorstrom berechnen.

Die Stator- und Rotorwirkleistung berechnen sich nach [Ste13] aus den komplexen Darstellungen

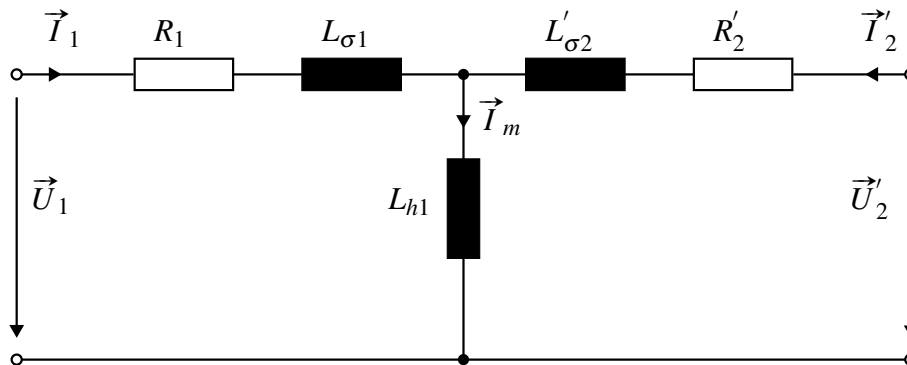


Abbildung 2.4: T-Ersatzschaltbild einer ASM mit Stator- und Rotorstreuinduktivitäten

der Ströme und Spannungen:

$$P_1 = \frac{3}{2} \cdot \Re \left\{ \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1^* \right\} \quad (2.37)$$

$$P_2 = \frac{3}{2} \cdot \Re \left\{ \vec{U}_2 \cdot \vec{I}_2^* \right\} \quad (2.38)$$

Entsprechend gilt für die Stator- und Rotorblindleistung:

$$Q_1 = \frac{3}{2} \cdot \Im \left\{ \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1^* \right\} \quad (2.39)$$

$$Q_2 = \frac{3}{2} \cdot \Im \left\{ \vec{U}_2 \cdot \vec{I}_2^* \right\} \quad (2.40)$$

Gleiches gilt auch für die Netzwerk- und Blindleistung:

$$P_N = \frac{3}{2} \cdot \Re \left\{ \vec{U}_N \cdot \vec{I}_N^* \right\} \quad (2.41)$$

$$Q_N = \frac{3}{2} \cdot \Im \left\{ \vec{U}_N \cdot \vec{I}_N^* \right\} \quad (2.42)$$

Bisher sind alle Gleichungen in ihrem eigenen Koordinatensystem dargestellt worden. Um einen Signalfussplan für die Maschine zu erarbeiten, ist es erforderlich, dass alle Gleichungen in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden. Es ist sinnvoll für die unterschiedlichen Betriebsarten in Kapitel 2.3.2 (Vollumrichter) und Kapitel 2.3.3 (DGASM) auch unterschiedliche Bezugssysteme zu wählen. Dabei ergeben sich spezielle Vereinfachungen der Signalfusspläne wodurch ein einfacher Reglerentwurf ermöglicht wird.

2.3.2 Vollumrichter Asynchronmaschine

Für die Regelung der Vollumrichter ASM ist es zweckmäßig, alle Gleichungen im rotorflussfesten Koordinatensystem darzustellen. Dies hat den Vorteil, dass das Drehmoment direkt über die imaginäre Statorstromkomponente I_{1B} zugänglich ist. Dadurch, dass das allgemeine Koordinatensystem am Rotorfluss orientiert wird und somit die reelle Achse des rotorflussfesten Koordinatensystems mit dem Rotorflussraumzeiger verknüpft wird, folgen für die Orientierung am Rotorfluss folgende Bedingungen:

$$\Psi_{2A} = |\vec{\Psi}_2| \quad (2.43)$$

$$\Psi_{2B} = 0 \quad (2.44)$$

An realen Anlagen sind als Stellgrößen anstatt der Flusskomponenten die Spannung U_1 bzw. der Strom I_1 verfügbar. Da diese Arbeit einen Umrichter mit Stromregelung betrachtet, wird ein Signalflussplan für Stromeinprägung hergeleitet. Dies bedeutet, dass I_{1A} und I_{1B} Eingangsgrößen des Modells sind. Als Grundlage dient hierfür die Momentengleichung nach [Sch07]:

$$M_{Mi} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{M}{L_1} \cdot (\Psi_{1B} \cdot I_{2A} - \Psi_{1A} \cdot I_{2B}) \quad (2.45)$$

Mit der Bedingung aus Gleichung 2.44 und den Grundgleichungen aus Kapitel 2.3.1 kann man folgende Beziehungen herleiten:

$$\Psi_{1B} = \sigma L_1 \cdot I_{1B} \quad (2.46)$$

$$I_{2A} = \frac{1}{\sigma L_2} \cdot \Psi_{2A} - \frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \Psi_{1A} \quad (2.47)$$

$$I_{2B} = -\frac{M}{\sigma L_1 L_2} \cdot \Psi_{1B} = -\frac{M}{L_2} \cdot I_{1B} \quad (2.48)$$

Eingesetzt in die Momentengleichung 2.45 ergibt:

$$M_{Mi} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{M}{L_2} \cdot I_{1B} \cdot \Psi_{2A} \quad (2.49)$$

Hieraus wird ersichtlich, dass über die Statorstromkomponente I_{1B} das Drehmoment verzögerungsfrei gesteuert werden kann. Für die Steuerung von Ψ_{2A} erhält man nach [Sch07] aus den Grundglei-

chungen und der Bedingung 2.44 eine Differentialgleichung 1. Ordnung:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{2A}}{dt} &= -\frac{R_2}{\sigma L_2} \cdot \left(\Psi_{2A} - \frac{M}{L_1} \cdot \Psi_{1A} \right) \\ &= -\frac{R_2}{\sigma L_2} \cdot \left[\Psi_{2A} - \frac{M}{L_1} \cdot \left(\frac{M}{L_2} \cdot \Psi_{2A} + \sigma L_1 L_2 \right) \right] \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{d\Psi_{2A}}{dt} + \frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2A} = M \cdot \frac{R_2}{L_2} \cdot I_{1A} \quad (2.51)$$

Transformiert man die Gleichung 2.51 in den Laplace-Bereich, so folgt:

$$\Psi_{2A}(s) = M \cdot I_{1A}(s) \cdot \frac{1}{1 + sT_2} \quad \text{mit} \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2} \quad (2.52)$$

Abschließend kann der Signalfussplan der Asynchronmaschine mit Statorstromeinprägung im rotorflussfesten Koordinatensystem nach Abbildung 2.5 hergeleitet werden.

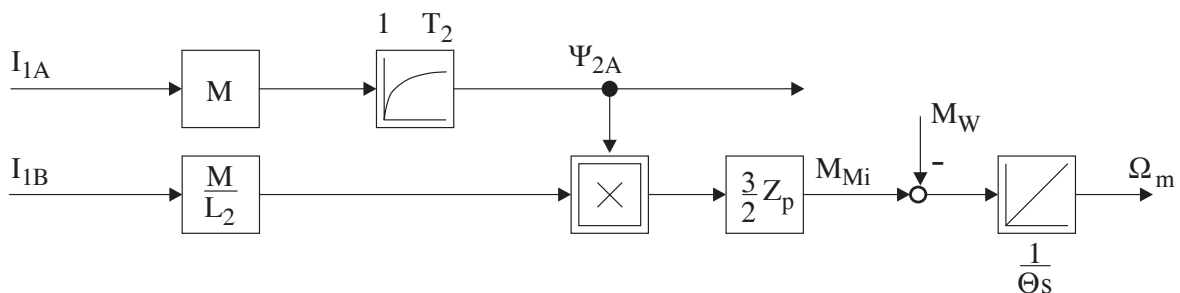


Abbildung 2.5: Signalfussplan der ASM bei Orientierung am Rotorfluss und Statorstromeinprägung, entnommen aus [Sch07]

2.3.3 Doppelt gespeiste Asynchronmaschine

Im Gegensatz zur Vollumrichter ASM ist es bei der DGASM zweckmäßig, alle Gleichungen im statorflussfesten Koordinatensystem darzustellen. Dadurch ist es möglich die Statorwirk- und Blindleistung direkt über die Rotorstromkomponenten I_{2A} bzw. I_{2B} einzustellen.

Das elektrische Moment der DGASM berechnet sich nach [Ars89] zu:

$$M_{Mi} = \frac{3}{2\ddot{u}} \cdot Z_p \cdot L_{h1} \cdot \Im \left\{ \vec{I}_1 \cdot \left(\vec{I}_2 \cdot e^{j\beta_L} \right)^* \right\} \quad (2.53)$$

Es wird der für den Statorfluss verantwortliche Magnetisierungsstrom \vec{I}_m (vgl. Abbildung 2.4) eingeführt.

$$\vec{I}_m = \vec{I}_1 + \vec{I}'_2 \cdot e^{j\beta_L} \quad (2.54)$$

Die reelle Achse des statorflussfesten Koordinatensystems orientiert sich an der Lage dieses Magnetisierungsstromvektors. Durch Einsetzen von 2.30, 2.33 und 2.36 in 2.19 folgt:

$$\vec{\Psi}_1 = L_{h1} \underbrace{\left[(1 + \sigma_1) \vec{I}_1 + \vec{I}'_2 \cdot e^{j\beta_L} \right]}_{\vec{I}_{m1}} \quad (2.55)$$

\vec{I}_{m1} : erweiterter statorbasierter Magnetisierungsstromvektor

In den folgenden Betrachtungen orientiert sich die Lage der reellen Achse des statorflussfesten Koordinatensystems an der Lage von \vec{I}_{m1} . Nach [Leo96] gilt für \vec{I}_{m1} :

$$\vec{I}_{m1} = (1 + \sigma_1) \cdot \vec{I}_1 + \vec{I}'_2 \cdot e^{j\beta_L} = \left| \vec{I}_{m1} \right| e^{j\beta_K} = \vec{I}_{m1} e^{j\beta_K} \quad (2.56)$$

$$\Omega_{m1} = \frac{d\beta_K}{dt} \quad (2.57)$$

Durch Einsetzen von 2.55 in 2.17 erhält man für die Statorspannung:

$$\vec{U}_1^S = R_1 \cdot \vec{I}_1^S + L_{h1} \cdot \frac{d\vec{I}_{m1}^S}{dt} \quad (2.58)$$

In Abbildung 2.6 sind die Winkelbeziehungen zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen dargestellt. In dieser Abbildung ist zusätzlich ein (A^*, B^*) -Koordinatensystem eingeführt, wobei die B^* -Achse mit der Richtung der Netzspannung zusammenfällt. Wenn die Maschine an ein starres Netz (sehr niedrige Impedanz) angeschlossen wird, ist der Winkel ρ in Abbildung 2.6 sowohl dynamisch als auch stationär sehr klein und beträgt bei Vernachlässigung des Statorwiderstands null Grad.

Daraus folgt für die Statorspannungskomponenten:

$$U_{1A} = \sqrt{2}U_1 \cdot \cos(\Omega_1 t - \beta_K) \quad (2.63)$$

$$U_{1B} = \sqrt{2}U_1 \cdot \sin(\Omega_1 t - \beta_K) \quad (2.64)$$

Aus Gleichung 2.56 folgt nach Multiplikation mit $e^{-j\beta_K}$ ein Zusammenhang zwischen Stator- und Rotorstrom:

$$I_{1A} = \frac{I_{m1} - I'_{2A}}{1 + \sigma_1} \quad (2.65)$$

$$I_{1B} = \frac{I'_{2B}}{1 + \sigma_1} \quad (2.66)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 2.56 in 2.58 folgt nach Transformation in Feldkoordinaten und Aufspaltung in Real- und Imaginärteil für Betrag und Winkel des Magnetisierungsstromvektors:

$$T_1 \frac{dI_{m1}}{dt} + I_{m1} = \frac{1 + \sigma_1}{R_1} U_{1A} + I'_{2A} \quad (2.67)$$

$$\frac{d\beta_K}{dt} = \Omega_{m1} = \frac{1}{T_1 I_{m1}} \cdot \left(\frac{1 + \sigma_1}{R_1} U_{1B} + I'_{2B} \right) \quad (2.68)$$

mit $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$: Zeitkonstante des Statorkreises

Transformiert in Feldkoordinaten ergibt sich aus 2.53 und 2.56 ein einfacher Zusammenhang zwischen dem elektrischen Moment und der Querkomponente I_{2B} des Rotorstroms:

$$M_{Mi} = -\frac{3}{2\ddot{u}} \cdot Z_p \cdot \frac{L_{h1}}{1 + \sigma_1} \cdot I_{m1} \cdot I_{2B} \quad (2.69)$$

Aus den Leistungsgleichungen 2.37 und 2.39 ergibt sich im Verbraucherzählpeilsystem durch Transformation in Feldkoordinaten:

$$P_1 = \frac{3}{2} (U_{1A} I_{1A} + U_{1B} I_{1B}) \quad (2.70)$$

$$Q_1 = \frac{3}{2} (U_{1B} I_{1A} - U_{1A} I_{1B}) \quad (2.71)$$

Überführt man diese Gleichungen nun in ein regelungstechnisches Blockschaltbild, so erhält man nach [Ars89] immer noch ein vermaschtes Modell der DGASM. Es wird jedoch ersichtlich, dass über die Rotorstromkomponenten I_{2A} und I_{2B} nicht der Betrag und die Phase des Magnetisierungs-

tromvektors \vec{I}_{m1} nach Gleichung 2.67 und 2.68 gesteuert wird, sondern die Statorblindleistung und das elektrische Moment. Durch die getrennte Verstellung von Wirk- und Blindleistung kann bei geeigneter Betriebsführung einer Windkraftanlage der Wirkungsgrad erhöht und die mechanische Belastung reduziert, sowie ein neutraler als auch kapazitiver Betrieb der Anlage ermöglicht werden [Ars89].

Durch Vernachlässigung des Statorwiderstandes R_1 ergeben sich sehr einfache Zusammenhänge von Rotorstrom und Statorwirk- und Statorblindleistung. Dabei bleibt der resultierende Fehler für den Winkel ρ (vgl. Abbildung 2.6) nach [Ars89] vernachlässigbar klein.

Aus Gleichung 2.58 kann abgeleitet werden, dass der Magnetisierungstromvektor \vec{I}_{m1} einen konstanten Betrag aufweist und mit Netzfrequenz umläuft [Ars89]. Durch Einsetzen von 2.56 in 2.58 und Ableiten nach der Kettenregel folgt:

$$\Omega_{m1} = \Omega_0 \quad (2.72)$$

$$I_{m1} = \frac{|\vec{U}_1|}{\Omega_0 L_{h1}} \quad (2.73)$$

$$U_{1A} = 0 \quad (2.74)$$

$$\vec{U}_1 = jU_{1B} = j\sqrt{2}U_1 \quad (2.75)$$

$$\beta_K = \Omega_0 t - \frac{\pi}{2} \quad (2.76)$$

Nach Einsetzen von 2.65, 2.66 sowie 2.74 in die beiden Statorleistungsgleichungen 2.70 und 2.71 folgt eine vollständige Entkopplung zwischen Wirk- und Blindleistung im Stator:

$$P_1 = \frac{3}{2}\sqrt{2}U_1 I_{1B} = -\frac{3}{2}\sqrt{2}U_1 \frac{I'_{2B}}{1 + \sigma_1} \sim I_{2B} \quad (2.77)$$

$$Q_1 = \frac{3}{2}\sqrt{2}U_1 I_{1A} = \frac{3}{2}\sqrt{2}U_1 \frac{I_{m1} - I'_{2A}}{1 + \sigma_1} \sim I_{2A} \quad (2.78)$$

Diese vereinfachten Zusammenhänge durch Vernachlässigung des Statorwiderstands R_1 sind in Abbildung 2.7 als Blockschaltbild dargestellt. Eingangsgrößen des Modells sind die Rotorströme, Betrag und Phase der Statorspannung sowie das mechanische Moment M_W mit dem die Maschine an der Welle belastet wird.

Gut zu erkennen ist die direkte Einstellbarkeit der Statorwirk- und Blindleistung über die Rotorstromkomponenten I_{2B} beziehungsweise I_{2A} . Da die Dynamik der Strecke von Moment, Wirk- und Blindleistung

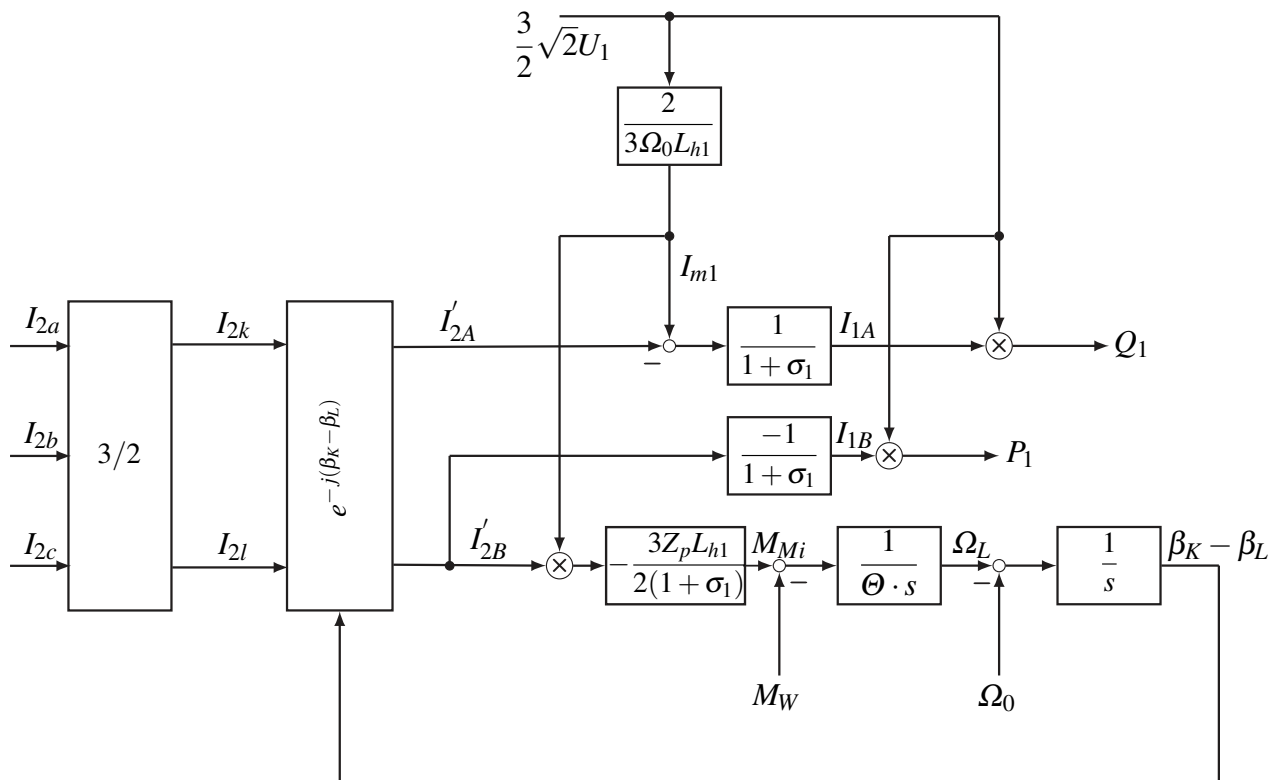


Abbildung 2.7: Signalfussplan der DGASM bei Orientierung am Statorfluss und Rotorstromeinprägung

tion durch ein Proportionalglied beschrieben wird, können diese verzögerungsfrei eingestellt werden. Dabei ist nur die Dynamik des Stromrichters ausschlaggebend.

2.4 Stromreglerauslegung nach Betragsoptimum

Dieses Kapitel wurde überwiegend aus [Sch09] entnommen, jedoch vereinfacht dargestellt. Da in Kapitel 4 die Stromregelung neu ausgelegt wird, wird in diesem Kapitel die Einstellvorschrift nach dem Betragsoptimum erläutert.

In der Antriebstechnik wird meist der Stromregler nach dem Betragsoptimum ausgelegt. Diese Einstellvorschrift sorgt für gutes Führungsverhalten, was bei einem Stromregler erwünscht ist. Voraussetzung dafür ist, dass die zu regelnde Strecke eine große und eine kleine Zeitkonstante besitzt.

Die kleine Zeitkonstante kann auch eine Summe aus mehreren kleinen Zeitkonstanten sein. Diese müssen jedoch in der Summe wesentlich kleiner als die große Zeitkonstante sein. Mehrere kleine Zeitkonstanten erhält man zum Beispiel durch Filterung der gemessenen Ströme.

Meistens wird zur Regelung der Strecke ein PI-Regler eingesetzt. Das hat zwei Vorteile: Die größte Zeitkonstante kann kompensiert werden, was Voraussetzung für bestmögliche Dynamik ist. Außerdem erzwingt der Integralanteil des Reglers im stationären Betrieb eine exakte Übereinstimmung von Soll- und Istwert.

Damit ergeben sich folgende Einstellvorschriften:

- Kompensiere mit der Nachstellzeit T_n des PI-Reglers die große Zeitkonstante T_1 :

$$T_n = T_1 \quad (2.79)$$

- Stelle die Verstärkung V_R des PI-Reglers so ein, dass der Betrag der Führungsübertragungsfunktion in einem möglichst großen Frequenzbereich nahe 1 bleibt:

$$V_R = \frac{T_1}{2 \cdot V_S \cdot T_\Sigma} \quad (2.80)$$

Dabei ist T_Σ die Summe der kleinen Zeitkonstanten und V_S die Verstärkung der Strecke.

2.5 Leistungsregelung

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen für den Entwurf einer Leistungsregelung erläutert. Zunächst wird auf die Möglichkeiten zur Einstellung von Wirk- und Blindleistung für beide Betriebsarten DGASM und Vollumrichter ASM eingegangen. Des Weiteren wird die Auslegung der Leistungsregler erklärt.

2.5.1 Stellgrößen für Wirk- und Blindleistung

Wie in Kapitel 2.3 bereits gezeigt wurde, gibt es sowohl für die ASM mit Vollumrichter als auch für die DGASM getrennte Möglichkeiten zur Einstellung von Wirk- und Blindleistung.

Für die ASM mit Vollumrichter dient zur Einstellung der Wirkleistung nach Abbildung 2.8 (oben) der maschinenseitige Umrichter. Dabei wird über die Statorstromkomponente I_{1B} das Drehmoment eingestellt. Dieses ist bei konstanter Drehzahl direkt proportional zur abgegebenen Leistung der Maschine. Diese Leistung wird zunächst in den Zwischenkreis übertragen. Da der netzseitige Umrichter die Zwischenkreisspannung konstant regelt, wird die Leistung schließlich über den netzseitigen Umrichter in das angeschlossene Versorgungsnetz übertragen.

Die Blindleistung kann bei der Vollumrichter ASM über den netzseitigen Umrichter eingestellt werden. Die Stromregelung des Netzwechselrichters wird ebenfalls in einem sich drehenden Koordinatensystem umgesetzt, wodurch die zu regelnden Stromkomponenten Gleichgrößen sind. Der Blindanteil wird dann über die B-Komponente des Netzstroms geregelt.

Bei der DGASM zeigt sich ein etwas anderes Bild (Abbildung 2.8 unten). Für die Bereitstellung der Wirkleistung steht der maschinenseitige Umrichter, welcher im Rotorkreis angeschlossen ist, zur Verfügung. Darüber kann wie bei der Vollumrichter ASM das elektrische Moment beziehungsweise die Statorwirkleistung der Maschine geregelt werden. Da in dieser Arbeit die Netzleistung betrachtet wird, muss zur Statorleistung die Rotorleistung addiert werden. Bei einer verlustfreien Maschine beträgt die Rotorleistung jedoch nur das schlupffache der Statorleistung:

$$P_2 = s \cdot P_1 \quad (2.81)$$

Somit kann die Rotorleistung als Störgröße angesehen, oder über ein mathematisches Modell berechnet und als Vorsteuerung dem Maschinenwechselrichter zugeführt werden.

Für die Einstellung der Blindleistung im Netz gibt es bei der DGASM zwei Möglichkeiten. Zum einen kann, wie in Abbildung 2.7 zu sehen ist, die Blindleistung über die Rotorstromkomponente I_{2A} und somit über den maschinenseitigen Umrichter eingestellt werden. Die andere Möglichkeit bietet hier der netzseitige Umrichter, indem wie bei der Vollumrichter ASM die B-Komponente des Netzstroms geregelt wird. Nach [Fra09] sollte jedoch im stationären Zustand die Blindleistung über den maschinenseitigen Umrichter und den Generator ins Netz übertragen werden. Unter

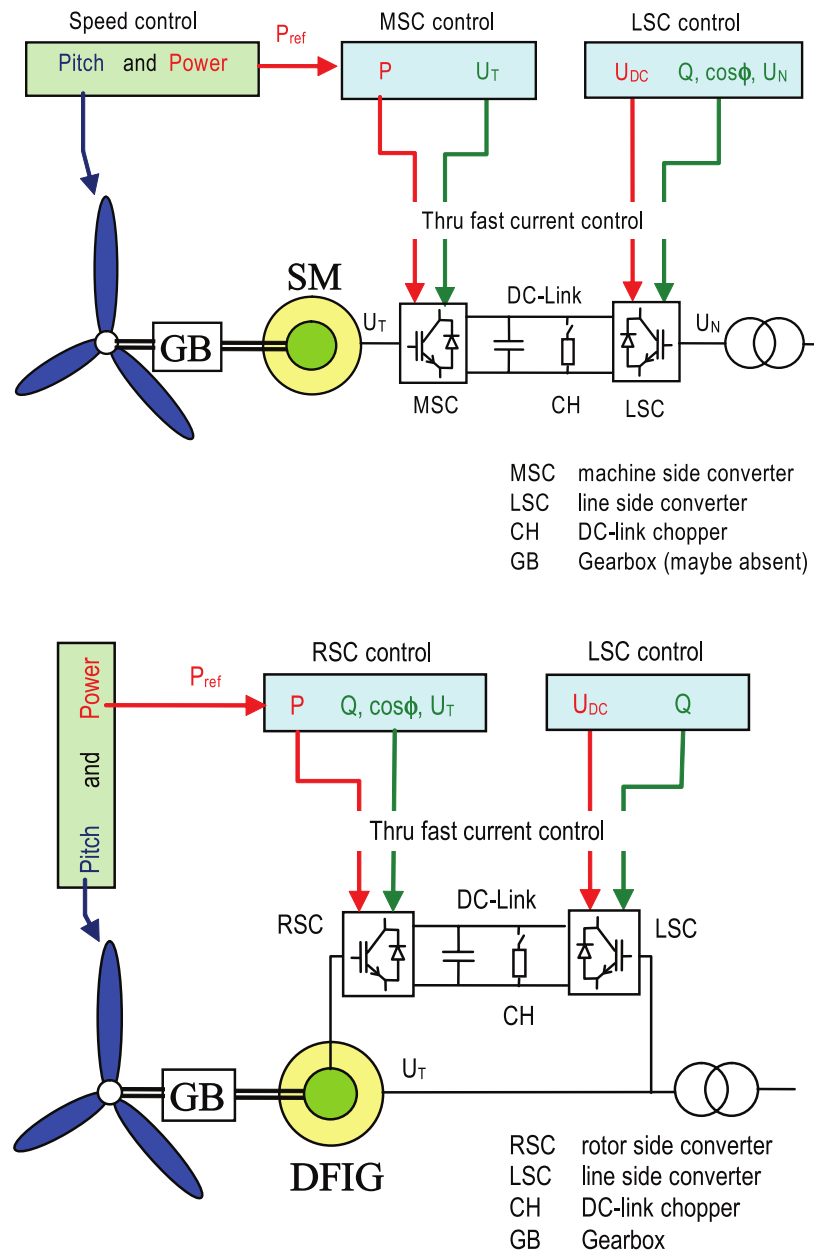


Abbildung 2.8: Stellgrößen für Wirk- und Blindleistung für Vollumrichter (oben) und DGASM (unten), entnommen aus [Fra09]

bestimmten Voraussetzungen ist es aber sinnvoll die Blindleistung komplett oder teilweise über den netzseitigen Umrichter bereitzustellen. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn im Rotorkreis aufgrund der abverlangten Wirkleistung der maximale effektive Rotorstrom schon erreicht ist. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die vorrangige Aufgabe des Netzwechselrichters die Regelung der Zwischenkreisspannung ist. Nur wenn die Stromkapazität dieses Umrichters nicht voll ausgenutzt ist,

kann dieser zur Blindstromerzeugung genutzt werden.

2.5.2 Regelungstechnische Blockschaltbilder für Vollumrichter und DGASM

Das in Abbildung 2.9 dargestellte regelungstechnische Blockschaltbild für die Vollumrichter ASM

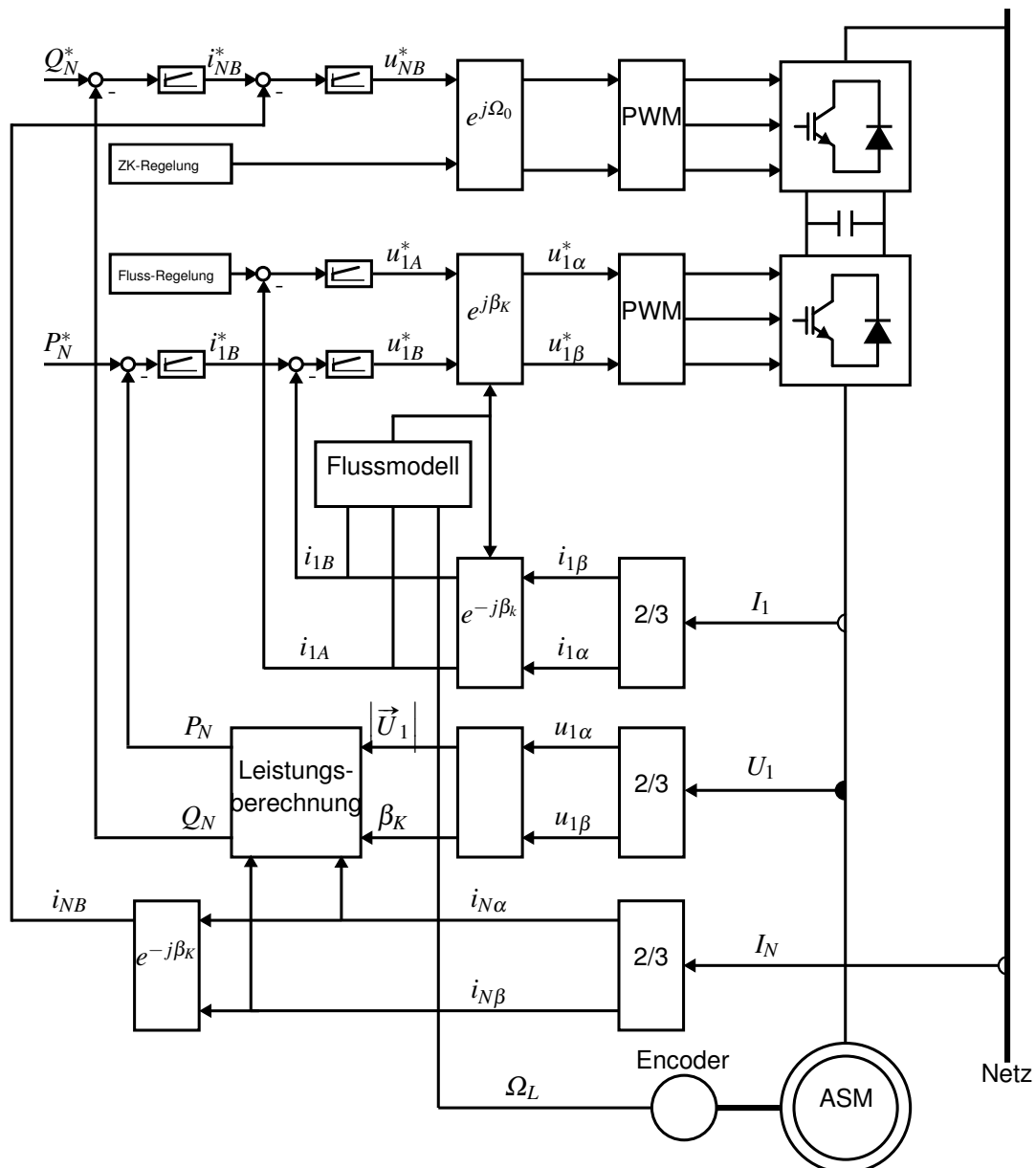


Abbildung 2.9: Regelungstechnisches Blockschaltbild Vollumrichter

besteht aus den übergeordneten Leistungsreglern und untergelagerten Stromreglern welche für die Leistungsregelung relevant sind. Die Regelung für den Fluss der Maschine und die Zwischenkreisspannung des Netzwechselrichters sind nur durch einen Block schematisch angedeutet. Gut zu erkennen sind die Leistungsregelkreise nach Kapitel 2.5.1. Zur Regelung der Blindleistung wird der Blindstrom des Netzwechselrichters genutzt. Zur Bereitstellung von Wirkleistung dient die B -Komponente des Maschinenwechselrichters. Über diesen wird die Leistung in den Zwischenkreis übertragen. Die Zwischenkreisregelung hält die Spannung des Zwischenkreises auf den voreingestellten Sollwert und überträgt somit die Wirkleistung über den Netzwechselrichter ins Netz. Zur Berechnung des Transformationswinkels für die Transformation der Maschinenströme in das rotorflussfeste Koordinatensystem dient das Flussmodell nach [Zen14].

Die Leistungsregelung der DGASM ergibt ein etwas anderes Blockschaltbild wie in Abbildung 2.10 zu sehen ist. Wie in Kapitel 2.3.3 gezeigt, können Wirk- beziehungsweise Blindleistung über I_{2B} beziehungsweise I_{2A} geregelt werden. Die Regelung erfolgt im statorspannungsorientierten A^*, B^* -Koordinatensystem (Abbildung 2.6). Dieses unterscheidet sich nur um den vernachlässigbar kleinen Winkel ρ . Der Vorteil besteht darin, dass sich der Transformationswinkel zur Transformation der Maschinenströme sehr einfach aus der Statorspannung und der Rotorlage bestimmen lässt. Das in Abbildung 2.10 dargestellte Regelschema besteht aus einer kaskadierten Regelungsstruktur mit übergeordneter Leistungsregelung und untergeordneter Stromregelung. Durch die Transformation in ein umlaufendes Koordinatensystem, sind alle Regelgrößen im stationären Zustand Gleichgrößen.

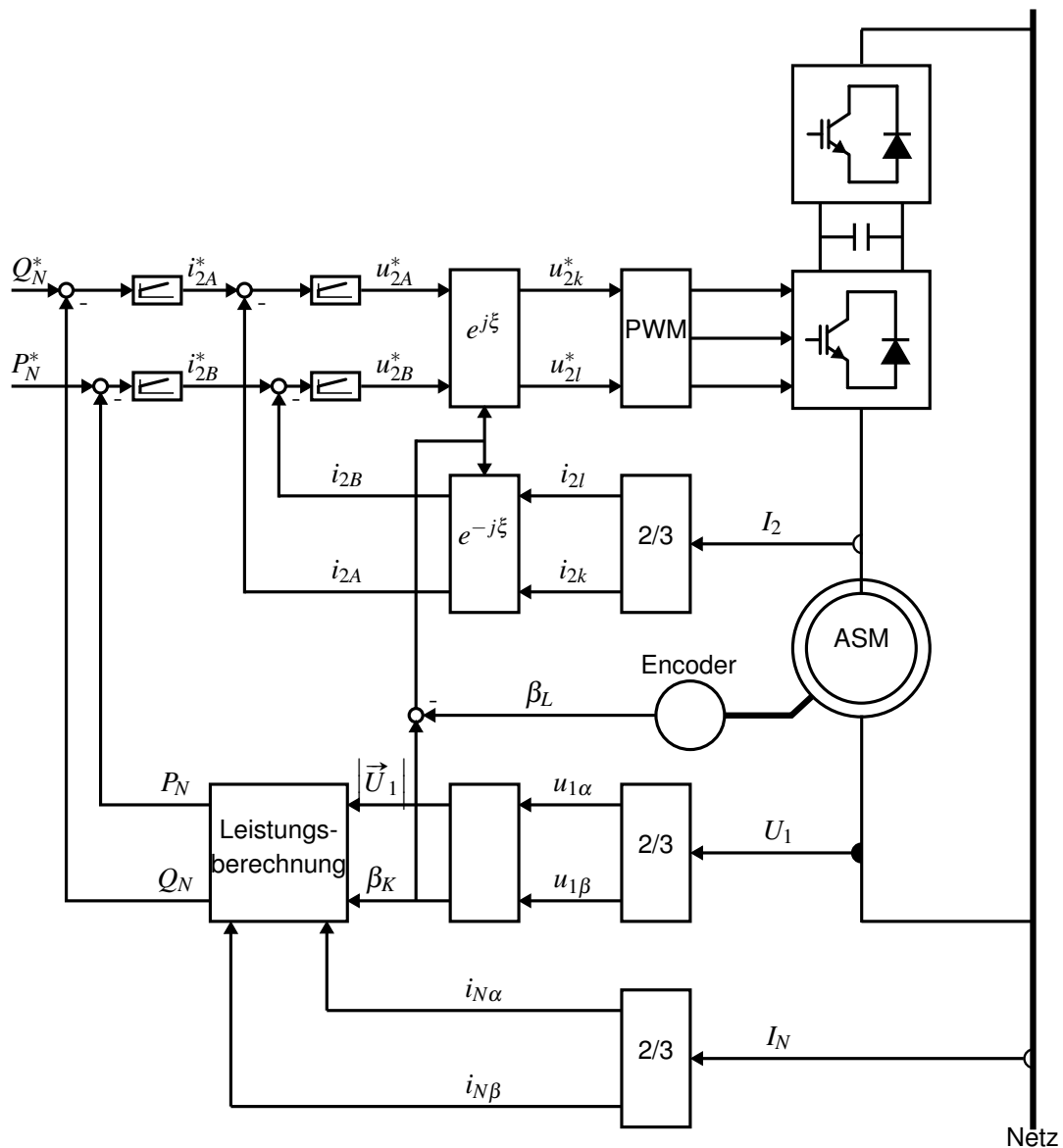


Abbildung 2.10: Regelungstechnisches Blockschaltbild DGASM

2.5.3 Auslegung Leistungsregler

Wie in Kapitel 2.3.2 und 2.3.3 bereits erläutert, sind die zu regelnden Strecken sowohl für die Wirk- als auch die Blindleistung im Vollumrichter- und im doppelt gespeisten Betrieb Proportionalstrecken. Dies bedeutet, dass die Dynamik der Leistungsregelung maßgeblich von der Dynamik der Umrichter abhängt.

Die Ersatzzeitkonstante der Stromregelung berechnet sich nach [dSp05] aus der Summe von

Periodendauer Stromregelung, Pulse Width Modulator (deutsch: Puls Weiten Modulator) (PWM) und Messgliedverzögerung:

$$T_T = T_C + \frac{T_{PWM}}{2} + T_{Mess} \quad (2.82)$$

$$T_{ers,i} = 2 \cdot T_T \quad (2.83)$$

T_T : Totzeit Stromregelung

T_C : Ausführungshäufigkeit Stromregelung

T_{PWM} : PWM Periodendauer

T_{Mess} : Messgliedverzögerung

Für die PI-Reglereinstellung wird die in [Wor07] beschriebene praxisorientierte Methode herangezogen. Um der Sollwertvorgabe folgen zu können und ein Schwingen des Regelkreises zu unterbinden, muss der innere Regelkreis um ein Vielfaches schneller sein als der äußere Regelkreis. Deshalb wird für die Zeitkonstante des Leistungsreglers das fünf- bis zehnfache der Ersatzzeitkonstante des unterlagerten Stromregelkreises gewählt. Es wird jedoch trotzdem ein schneller Regler angestrebt, weshalb die Zeitkonstante mit Hilfe von praktischen Messungen an dem Versuchsstand möglichst klein ermittelt wird.

Für die Verstärkung muss beachtet werden, dass die Ausgangswerte des Reglers die physikalischen Eigenschaften des Umrichters und der Maschine nicht übersteigen. Bei einer Verstärkung von 1 führt kurzzeitig ein Sollwertsprung von 1000 W zu einem Stromsollwert von 1000 A. Um solche Stromspitzen zu verhindern, muss die Verstärkung auf einen niedrigeren Wert gesetzt werden. Sie wird ebenfalls durch praktische Messungen ermittelt.

3 Der Versuchsstand

Der Versuchsstand für Windenergie in der HAW-Hamburg ist so konstruiert, dass alle drei in Kapitel 1.1 beschriebenen Generatorkonzepte mit Hilfe einer Stecktafel realisiert werden können. Dies bietet den Studierenden die Möglichkeit verschiedene Generatorsysteme kennenzulernen, sowie deren Vor- und Nachteile zu erforschen.

Der Versuchsstand besteht aus einer als Generator dienenden Schleifringläufer Asynchronmaschine und einer Gleichstrommaschine die den Generator antreibt (vgl. Abbildung 3.1). Zwischen den

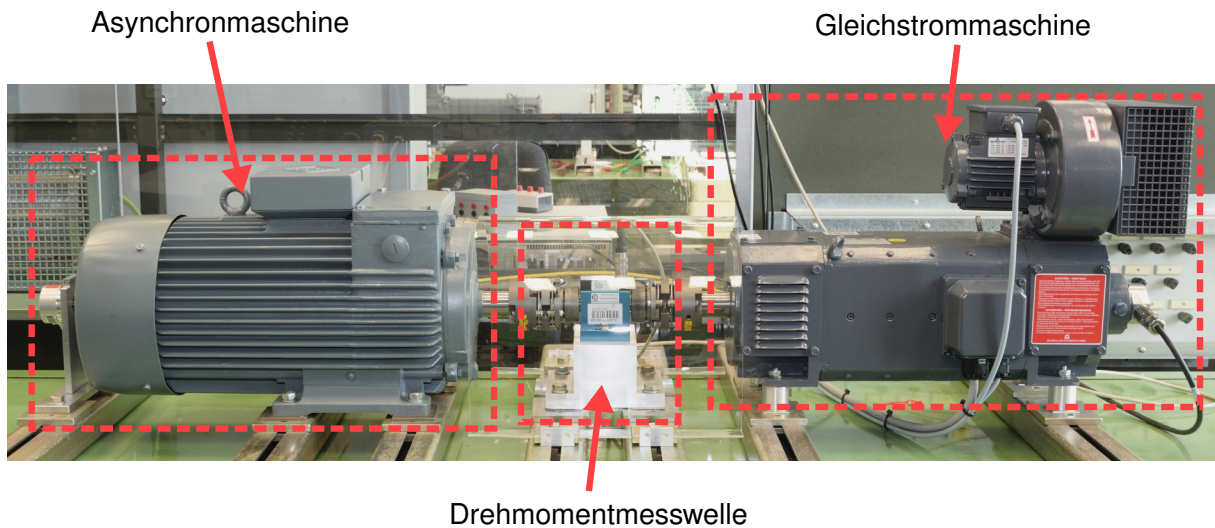


Abbildung 3.1: Maschinen des Versuchsstands der HAW Hamburg

beiden Maschinen ist eine Messwelle mit Anzeige für Drehmoment und Drehzahl installiert. Für jede der beiden Maschinen existiert ein separater Schaltschrank (vgl. Abbildung 3.2). Die Gleichstrommaschine wird mit einem 4-Quadranten-Stromrichter betrieben. Im Schaltschrank der

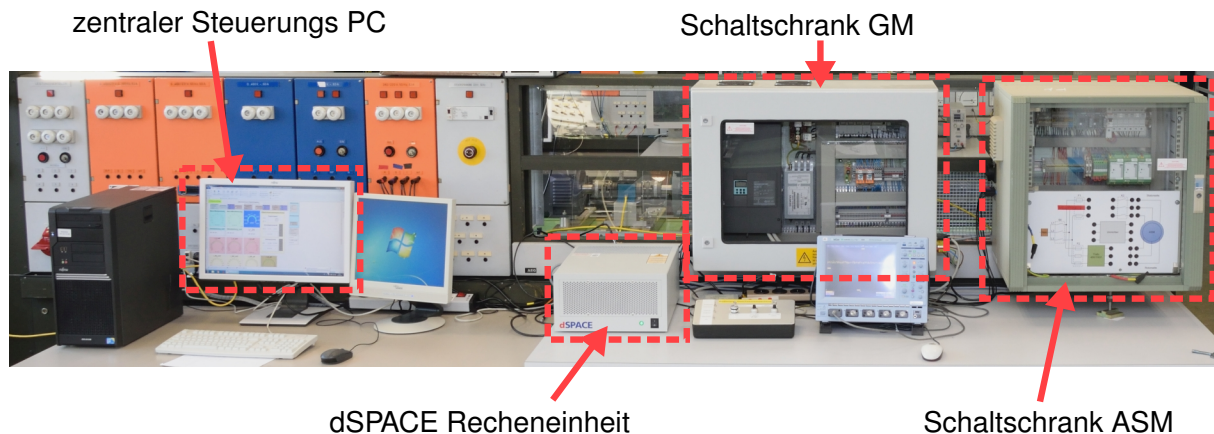


Abbildung 3.2: Übersicht des Versuchsstands der HAW Hamburg von der Bedienseite aus

Asynchronmaschine arbeiten zwei selbstgeführte B6 IGBT-Brücken, welche einen Gleichstromzwischenkreis umschließen. Über eine Stecktafel (Abbildung 3.3) kann der maschinenseitige Umrichter entweder an den Stator oder an den Rotor des Generators angeschlossen werden.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit bei doppelt gespeistem Betrieb einen Transformator auf die Netzseite zu schalten um die Zwischenkreisspannung für diesen Betriebsfall reduzieren zu können. In dieser Arbeit wird jedoch das Hauptaugenmerk auf die Variante ohne Transformator gelegt, da somit die Statorblindleistung zur Erregung der Maschine mit Hilfe des netzseitigen Umrichters besser kompensiert werden kann. Bei niedrigeren Spannungen wird für die gleiche Leistung ein um den selben Faktor größerer Strom benötigt, was beim Betrieb mit Transformator nicht in jedem Betriebspunkt gewährleistet werden kann.

Als Recheneinheit steht ein modulares und echtzeitfähiges System der Firma dSPACE zur Verfügung (vgl. Abbildung 3.2). Dieses bietet digitale und analoge Ein- und Ausgänge worüber Sensoren der gesamten Anlage ausgelesen werden können und PWM-Ausgänge zur Verfügung gestellt werden. Die Programmierung erfolgt grafisch über Matlab Simulink[®].

Über den zentralen Steuerungs-PC (Abbildung 3.2) kann die gesamte Anlage bedient und überwacht werden.

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Kenndaten des verwendeten Generators dargestellt.

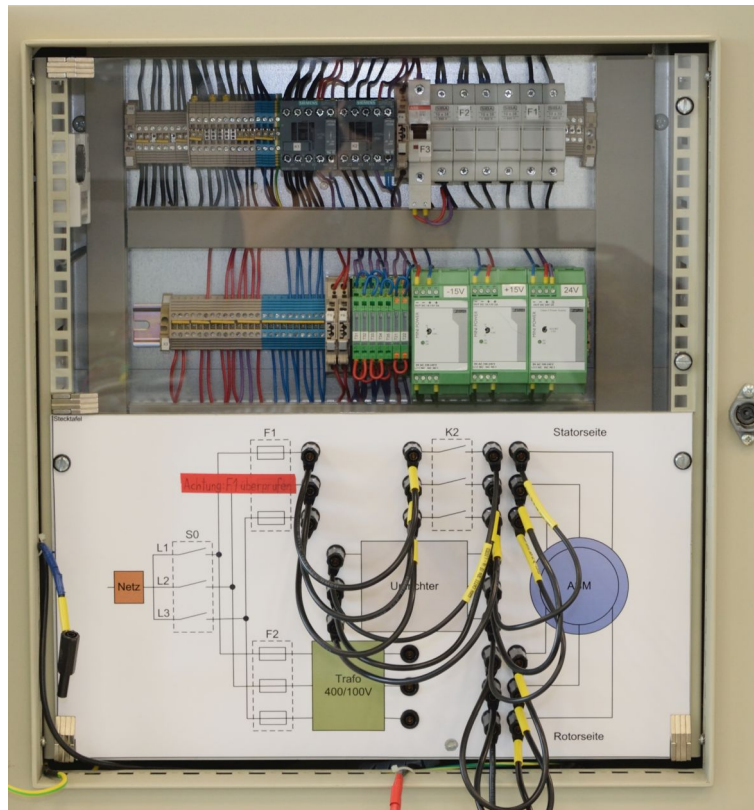


Abbildung 3.3: Stecktafel am Schaltschrank der ASM

Hersteller	VEM motors GmbH
Typ	SPER 132 MX4 SW TPM HW
Bemessungsleistung	5,0 kW
Polzahl	4
Bemessungsfrequenz	50 Hz
Bemessungsdrehzahl	1450 min ⁻¹
Spannung	230/400 V
Schaltung	D/Y
Strom	19,5/11 A
Leistungsfaktor	0,79
Wirkungsgrad	82,1 %
Rotorspannung	500 V
Rotorschaltung	Y
Rotorstrom	6,2 A

Tabelle 3.1: Kenndaten des Asynchrongenerators

3.1 Konstruktive Änderung des Schaltschranks für die Asynchronmaschine

Da für die Netzleistungsregelung die Netzströme gemessen werden müssen, muss der Schaltschrank umverdrahtet werden. Für die bisherige Drehzahlregelung waren die Strommesswandler im Statorkreis installiert. Die Statorströme können im Vollumrichterbetrieb über die Strommessung des Maschinenumrichters erfasst werden. Für den doppelt gespeisten Betrieb ist eine Statorstrommessung nicht notwendig. Deshalb können die zusätzlichen Messwandler auf die Netzseite installiert werden.

Im Zuge dieses Umbaus wurde die Verstärkung der Strommesswandler erneut messtechnisch erfasst, wobei eine Nichtlinearität eines Messwandlers festgestellt wurde. In Abbildung 3.4 ist

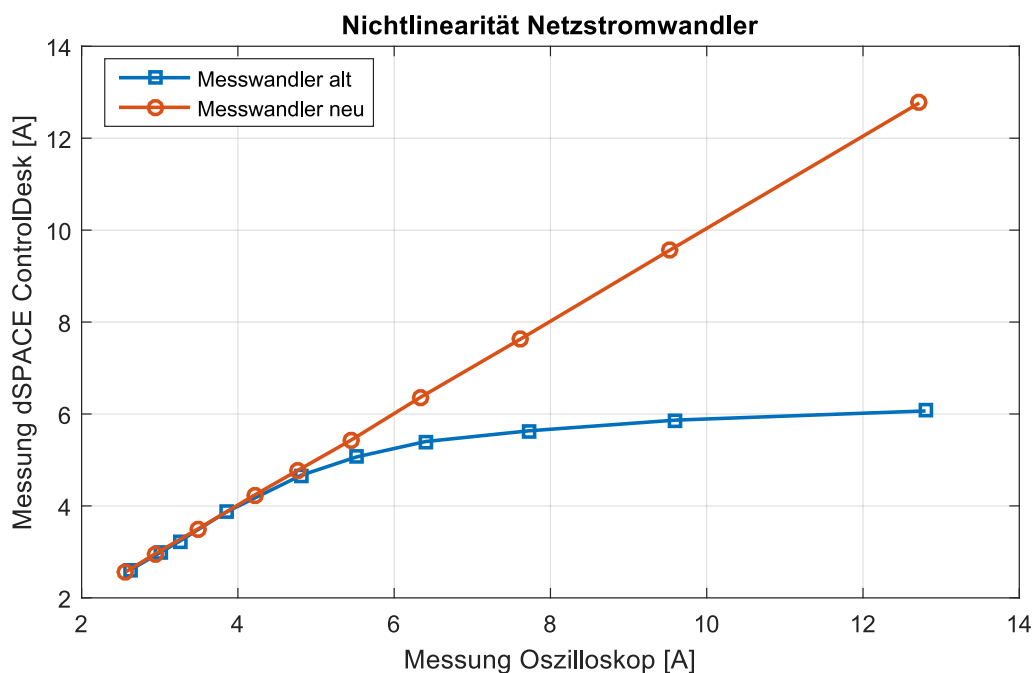


Abbildung 3.4: Vergleich defekter und nichtdefekter Messwandler für Netzstrommessung

diese Nichtlinearität dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass der defekte Messwandler bei circa 6 A eine Sättigung aufweist, wobei der neue Messwandler durch eine Winkelhalbierende beschrieben wird.

4 Änderungen vorhergehender Regelungen

In [Zen14] wurde eine Drehzahlregelung für die ASM mit Vollumrichter und in [Bü15] für die DGASM entworfen. Diese beiden Arbeiten dienen als Grundlage für diese Thesis da sowohl die Drehzahlregelung als auch die Leistungsregelung auf eine funktionierende Stromregelung auf Netz- und Maschinenseite aufbaut.

Da insbesondere bei der DGASM die Drehzahlregelung aus [Bü15] noch nicht vollständig funktioniert, müssen diese Fehler zuerst analysiert und behoben werden bevor mit der Auslegung der Leistungsregelung begonnen werden kann. Dieses Kapitel analysiert die Fehler und beschreibt deren Behebung.

4.1 Änderungen doppelt gespeiste Asynchronmaschine

Die in diesem Kapitel beschriebenen Änderungen beziehen sich auf das Programm zur Regelung des Generators.

Bisher war das Problem der DGASM, dass die Maschine nicht die volle Leistung erbracht hat. Die in [Bü15] entwickelte Regelung erreichte bei dem Nennrotorstrom von $6,2 A$ nur ein Drehmoment von $12,5 Nm$. Das Nenndrehmoment der Maschine berechnet sich nach Datenblattangaben jedoch zu:

$$M_N = \frac{P_N}{n_N} = \frac{5000 W}{1450 \frac{1}{min}} \approx 33 Nm \quad (4.1)$$

Dies entspricht einem Leistungsverlust von $\approx 62\%$. Zudem war unklar, warum bei der Stromregelung die A - und B -Achse nach Abbildung 2.6 vertauscht waren, das heißt, dass die für das Drehmoment verantwortliche Rotorstromkomponente nicht die B -Achse sondern die A -Achse

war.

Bei der Regelung von Maschinenströmen in einem transformierten Gleichgrößensystem nach Kapitel 2.3.3 ist ersichtlich, dass die Imaginärkomponente des Maschinenstroms direkt proportional zum entwickelten elektrischen Moment der Maschine ist und nicht die Realkomponente. Eine Vertauschung der Komponenten ist somit Definitionssache und auf eine nicht konsistente Transformation der Maschinenströme zurückzuführen. Die Transformation muss nach den Gleichungen in Kapitel 2.2 durchgeführt werden. Nach Implementierung der neuen Raumzeigertransformation kann das Drehmoment der Maschine über die B -Komponente des Maschinenstroms eingestellt werden.

Um das maximale Drehmoment und dadurch die maximale Leistung der Maschine zu erreichen, ist es notwendig, die zu regelnden Rotorströme \vec{I}_2^K mit dem exakt richtigen Transformationswinkel in das statorflussfeste Koordinatensystem zu transformieren. Ein Fehler des Transformationswinkels wirkt sich auf das Drehmoment wie folgt aus:

$$M_{Mi,tatsächlich} = M_{Mi,theoretisch} - M_{Mi,theoretisch} \cdot \sin(\text{Winkelfehler}) \quad (4.2)$$

Bei richtigem Transformationswinkel folgt aus einem Stromsprung der imaginären Rotorstromkomponente I_{2B} ein Statorwirkleistungssprung wobei die Statorblindleistung keine Veränderung aufweist. Ebenso verhält es sich mit der Statorblindleistung bei einem Führungsgrößensprung der realen Rotorstromkomponente I_{2A} . Bei falschem Transformationswinkel zeigen sich Verkopplungen zwischen Wirk- und Blindleistung. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Dazu wird mit Hilfe der Simulation je ein Führungsgrößensprung für beide Rotorstromkomponenten vorgegeben und die resultierende Statorleistung gemessen. Im linken Teil ist keine Verkopplung zwischen Wirk- und Blindleistung zu sehen. Ein Führungsgrößensprung in I_{2A} -Richtung führt nur zu einem Sprung der Blindleistung und ein Sprung in I_{2B} -Richtung bewirkt ein Sprung der Wirkleistung. Im rechten Teil hingegen wurde der Transformationswinkel für die Rotorströme um 30° verschoben. Gut zu erkennen ist die daraus resultierende Verkopplung zwischen Wirk- und Blindleistung. Dadurch kann die Maschine nicht mehr volles Drehmoment entwickeln, da der Strom in I_{2B} -Richtung nicht nur Wirkleistung, sondern auch Blindleistung erzeugt.

Für die Raumzeigertransformation ist die Lage des Statorstromraumzeigers \vec{U}_1 notwendig. Messtechnisch werden die Spannungen zwischen zwei Leitern erfasst. Für die Berechnung ist jedoch die Strangspannung maßgeblich. Die Strangspannung lässt sich aus der Leiterspannung wie folgt

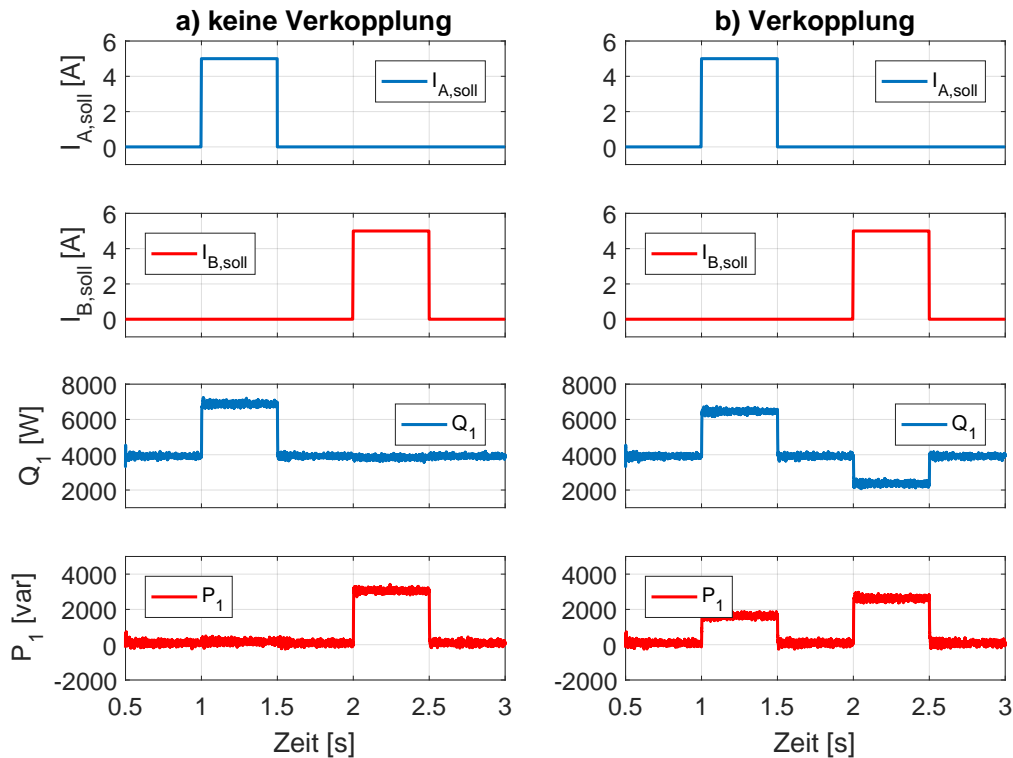


Abbildung 4.1: Simulation DGASM Rotorströme und Statorleistung

berechnen:

$$\vec{U}_{Str} = \frac{\vec{U}_L}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad (4.3)$$

Dies bedeutet, dass nicht nur die Beträge mit dem Faktor $\frac{1}{\sqrt{3}}$ multipliziert werden müssen, sondern auch die Phasenlage um -30° gedreht werden muss. Dies stellt die erste behobene Fehlerquelle dar.

Die zweite Fehlerquelle ist die Kalibrierung der Nulllage des Winkelgebers. Für die Transformation ist nach Gleichung 2.60 der Winkel β_K zwischen Stator und Rotor notwendig. Deshalb muss die exakte Position des Rotors mit Hilfe des Inkrementalgebers gemessen werden. Dazu ist eine Kalibrierung der Nullspur erforderlich. Dafür wird ein Drehstromtransformator mit einer geringen Spannung an den Rotorkreis angeschlossen. Mindestens zwei Rotor- und durch den Rotor induzierte Statorspannungen werden mit einem Oszilloskop angezeigt und die Welle der Maschine langsam verdreht. Liegen jeweils beide Spannungen übereinander, ist die Nulllage der Maschine eingestellt. In dieser Position wird der Inkrementalgeber an der Welle befestigt, wobei darauf geachtet werden

muss, dass die Anzeige des Winkels über den Inkrementalgeber auf dem dSPACE-System bei Null bleibt. Nach diesen beiden Korrekturen kann die Maschine das im Datenblatt angegebene Drehmoment erreichen.

Der Winkelfehler aus der falschen Umrechnung von Leiter- in Strangspannungen beträgt 30° . Die Neukalibrierung des Rotorlagegebers ergab einen Winkelfehler von 8° . Somit beträgt der gesamte Winkelfehler 38° . Nach Gleichung 4.2 lässt sich der dadurch verursachte Drehmomentverlust berechnen:

$$M_{Mi,tatsächlich} = 33Nm - 33 Nm \cdot \sin(38^\circ) \approx 12,5 Nm \quad (4.4)$$

Dies entspricht dem in diesem Abschnitt eingangs beschriebenen Drehmomentverlust. Dadurch ist der Fehler theoretisch erklärt und praktisch ebenso behoben.

Des Weiteren wird eine Neuauslegung der Stromregelung für den Maschinenwechselrichter nach den Einstellvorschriften in Kapitel 2.4 vorgenommen.

$$T_n = \sigma \cdot \frac{L_2}{R_2} = 12,9 \text{ ms} \quad (4.5)$$

$$K_i = \frac{T_n \cdot R_2}{2 \cdot T_T} = 19,1 \quad (4.6)$$

Die bisherige Regelung aus [Bü15] hatte einen anderen Wert für die Verstärkung des Reglers angenommen. Die alten sowie die neuen Werte sind in Tabelle 4.1 gegenübergestellt. Mit den neuen

	alte Parameter	neue Parameter
K_i	119,2	19,1
T_n	12,9	12,9

Tabelle 4.1: Gesamtwirkungsgrad Generatorsysteme

Parametern können bessere Ergebnisse für die Stromregelung erzielt werden (vgl. Abbildung4.2).

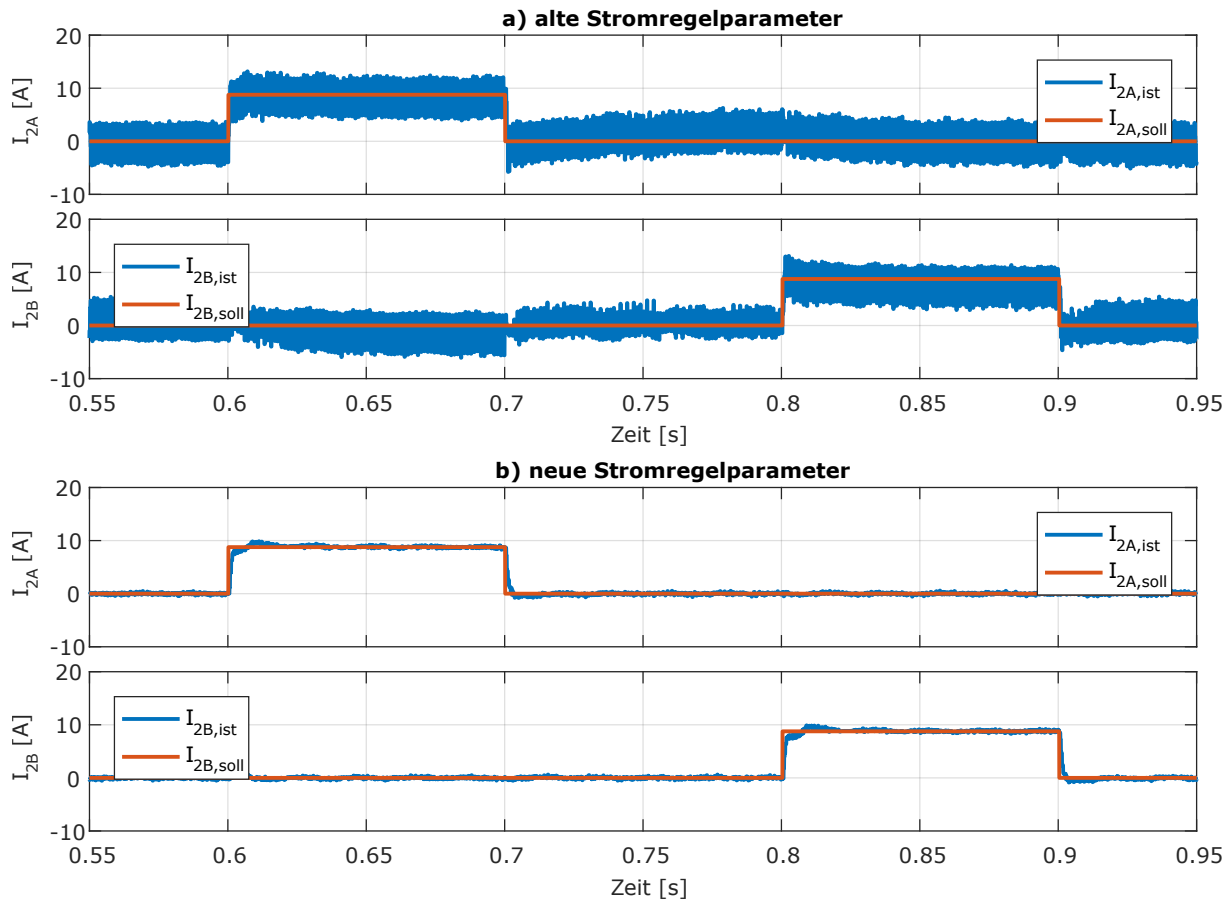


Abbildung 4.2: Vergleich der alten Parameter a) mit den neuen Parametern b)

4.2 Beide Betriebsarten

Dieses Kapitel beschreibt die Änderungen, welche für beide Betriebsarten, ASM mit Vollumrichter und DGASM, gelten.

Um bessere Messwerte zu erhalten, wird die sogenannte Burstmessung implementiert. Die Einstellungen können Abbildung 4.3 entnommen werden. Der Start der Messung wird durch den PWM-Interrupt bei steigender Flanke ausgelöst. Danach werden per Timer-Interrupt 20 Messungen im Abstand von $0,8 \mu s$ durchgeführt. Anschließend wird durch Mittelwertbildung über alle 20 Messwerte die zu messende Größe berechnet. Dadurch wird eine Glättung der verrauschten Messsignale erreicht. Dies wirkt sich positiv auf die Regelung aus, da es dadurch stationär zu kleineren Stellgrößenschwankungen kommt.

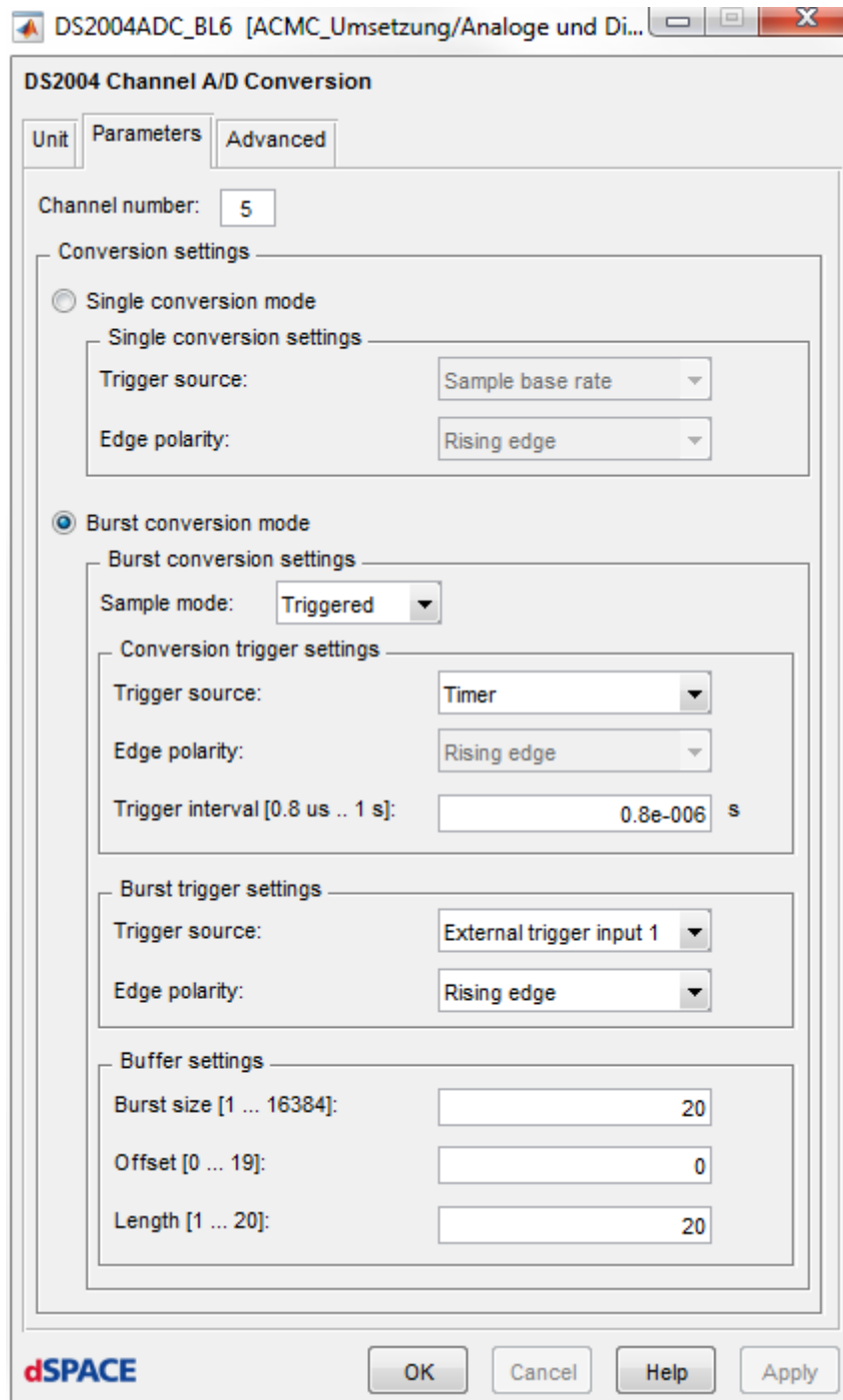


Abbildung 4.3: Einstellungen A/D Wandler für Burstmessung

Außerdem wird ein neues Interruptkonzept eingeführt. Dieses sieht vor, dass die Wandlung der Analog Digital Converter (ADC) Kanäle durch den PWM-Interrupt getriggert werden. Sobald der

letzte Kanal gewandelt ist, wird durch einen Softwareinterrupt die Berechnung der Regelung gestartet. Dadurch kann sichergestellt werden, dass immer mit den aktuellen Werten gerechnet wird und nicht ein Teil der Messgrößen um einen Zeitschritt veraltet sind.

Ein weiterer Punkt ist die Erhöhung der Zwischenkreisspannung. Um Energie ins Netz einspeisen zu können, muss am Ausgang des netzseitigen Umrichters stets eine größere Spannung als die Netzspannung bereitgestellt werden. Bei einer zu kleinen Zwischenkreisspannung kann keine Energie aus dem Zwischenkreis in das Netz übertragen werden. Bei einer netzseitigen effektiven Spannung von $U_N = 400 \text{ V}$ beträgt somit die minimale Zwischenkreisspannung U_{ZK} um Energie aus dem Zwischenkreis in das Netz zu übertragen:

$$U_{ZK,min} = 400 \text{ V} \cdot \sqrt{2} = 566 \text{ V} \quad (4.7)$$

Diese minimal benötigte Spannung kann sich jedoch durch die Forderung von Blindstrom und den daraus resultierenden Spannungsabfall an der Netzdrossel erhöhen oder verkleinern (vgl. Zeigerdiagramm in Abbildung 4.4). Die Netzinduktivität kann bei diesen Betrachtungen vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zur Netzdrossel deutliche kleinere Werte annimmt. Bei einem Wechselrichter gilt unter Vernachlässigung der Aussteuerverluste näherungsweise:

$$U_{ZK} \approx U_{WR} \quad (4.8)$$

Die benötigte Zwischenkreisspannung berechnet sich dann bei Betrachtung im Verbraucherpeilsystem zu:

$$U_{ZK} = (U_N - U_L) \cdot \sqrt{2} \quad (4.9)$$

Je nachdem ob der geforderte Blindstrom positiv oder negativ ist, hat der Spannungsabfall an der Netzdrossel ein positives oder negatives Vorzeichen. Im schlechteren Fall, positiver Blindstrom bei Verbraucherpeilsystem, muss also die Spannung am Ausgang des Wechselrichters noch um den Spannungsabfall an der Netzdrossel vergrößert werden. In Abbildung 4.5 ist dieser Sachverhalt durch einen Plot verdeutlicht, wobei in a) ein positiver und in b) ein negativer Blindstrom eingepreßt und jeweils die Zwischenkreisspannung von 590 V auf 620 V angehoben wird. Die Ergebnisse stammen aus einer Simulation, sind vom Prinzip her jedoch identisch mit den Messungen an der realen Anlage. In Teil a) ist deutlich zu erkennen, dass mit einer zu geringen Zwischenkreisspannung (linke Hälfte) die geforderten Ströme nicht mehr angesteuert werden können, da für einen positiven Blindstrom (Wechselrichter ist Verbraucher) der Spannungsabfall an der Netzdrossel

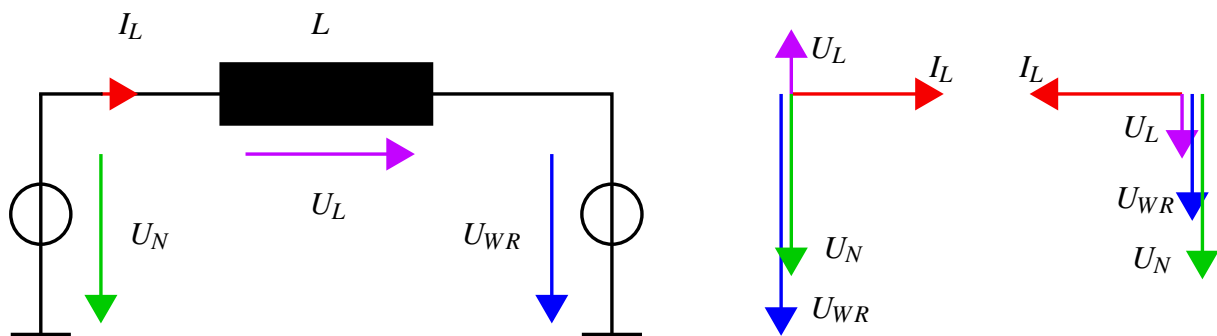


Abbildung 4.4: Ersatzschaltbild Netzanschluss Wechselrichter mit Netzdrossel mit dazugehörigem Zeigerdiagramm

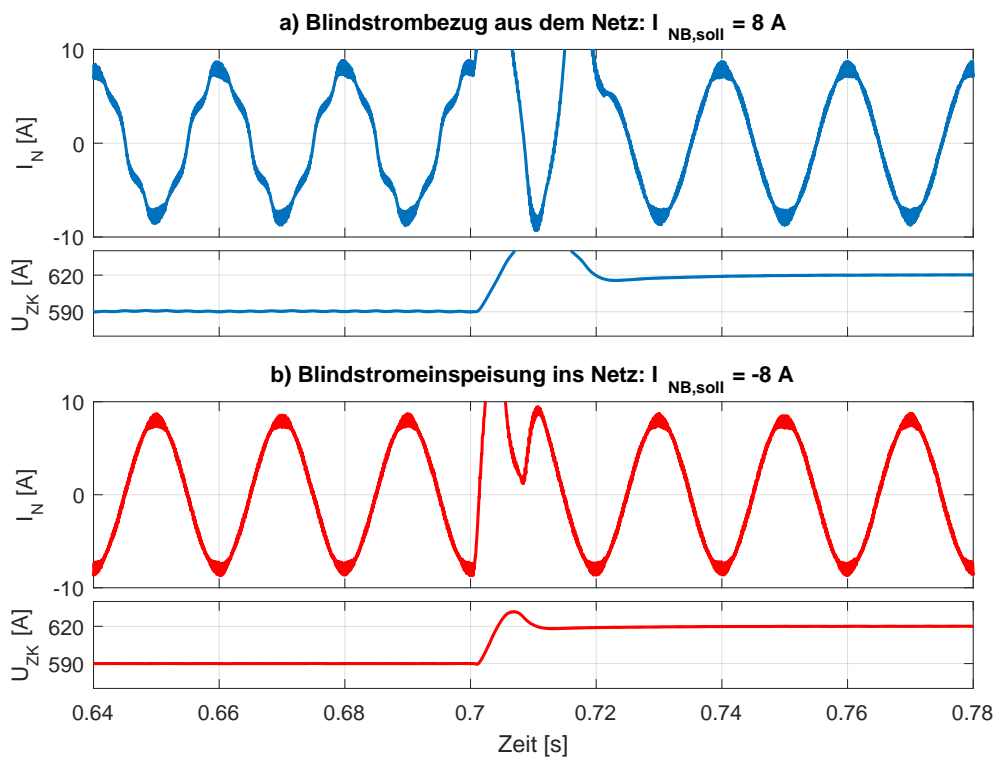


Abbildung 4.5: Auswirkung der Zwischenkreisspannung auf die Bereitstellung von Blindleistung

nach der Zählrichtung aus Abbildung 4.4 positiv ist. Die Stromrichtung wird in Teil b) umgekehrt, wodurch der Spannungsabfall an der Netzdrossel negativ wird. In diesem Fall kann der Wechselrichter den geforderten Blindstrom problemlos auch mit einer niedrigeren Zwischenkreisspannung

aussteuern.

Im bisherigen Versuchsstand war netzseitig ein Sinusfilter verbaut. Diese werden üblicherweise nur motorseitig eingesetzt um die Motorwicklungen vor den gepulsten Spannungen zu schützen. Der

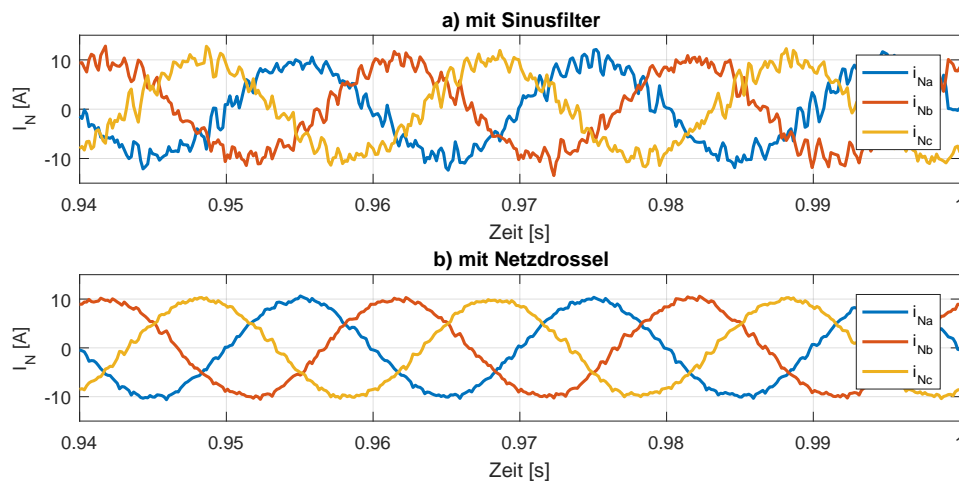


Abbildung 4.6: Vergleich des Netzstroms mit Sinusfilter und Netzdrossel

Unterschied ist in Abbildung 4.6 deutlich zu erkennen. Durch die Kapazität des Sinusfilters wird das Stromrauschen verstärkt. Die Netzdrossel glättet mit erhöhter Induktivität (an dieser Anlage $8,2 \text{ mH}$) die Netzströme.

Als letztes sei hier die Anti-Wind-Up Bedingung des Netzwechselrichters erwähnt. Diese dient dazu, bei Begrenzung der Stellgröße durch die Regelstrecke den I-Anteil des PI-Reglers zu sperren. Dadurch kann verhindert werden, dass die Integration des Reglers fortwährend integriert, ohne dass die Stellgröße zunimmt.

Im Falle der übergelagerten Regler, Zwischenkreisregelung bei Netzwechselrichter und Leistungsregelung bei Maschinenwechselrichter, wird die Stellgröße durch die jeweiligen maximal zulässigen Ströme begrenzt. Maschinenseitig ist dies der maximal zulässige Maschinenstrom. Netzseitig gibt es jedoch eine solche Begrenzung nicht. In diesem Falle gilt der maximal zulässige Strom des Umrichters als Begrenzung, um diesen zu schützen. Bei der verwendeten Laboranlage beträgt dieser 18 A . Es muss jedoch beachtet werden, dass alle Sicherungen des Schaltschranks auf diesen Strom ausgelegt sind.

5 Realisierung

Um die Entwicklung und Validierung der Regelalgorithmen zu vereinfachen, wird zunächst ein möglichst originalgetreues Simulationsmodell der gesamten Anlage erstellt. Dies bietet den Vorteil, dass ein früher, einfacher und vor allem sicherer Test möglich ist, ohne einen Schaden der Anlage in Kauf nehmen zu müssen. Die Simulationsmodelle für beide Betriebsarten (Vollumrichter und DGASM) sind auf einer CD dieser Arbeit beigelegt.

Nach einem ausgiebigen Test der Leistungsregelung mit Hilfe der Simulation, werden die Regelalgorithmen auf der realen Anlage implementiert und getestet.

5.1 Simulation

Als Grundlage für die Simulation der ASM mit Vollumrichter und DGASM dienen die Modelle aus [Zen14] beziehungsweise [Bü15], wobei insbesondere die Simulation der DGASM zuerst um die in Kapitel 4.1 beschriebenen Änderungen korrigiert wird. In der Simulation kann jede beliebige physikalische Größe gemessen werden. Da dies am realen Versuchsstand nicht möglich ist, wird die Simulation möglichst genau nach der Anlage aufgebaut und nur tatsächlich zugängliche Messstellen verwendet.

Als Grundlage dient ein Modell der Asynchronmaschine, welches aus der Simulink[®]Bibliothek entnommen werden kann. Der elektrische Teil der Maschine ist als Zustandsraummodell fünfter Ordnung und der mechanische Teil als System zweiter Ordnung implementiert. Es ist zu beachten, dass die rotorseitigen elektrischen Größen auf die Statorseite bezogen sind. Das bedeutet, dass die Rotorgrößen mit dem Übersetzungsfaktor (siehe Gleichung 5.1) umgerechnet werden müssen. Dies wurde bei der Simulation aus [Bü15] nicht beachtet, weshalb die Maschine in der Simulation

nicht die im Datenblatt angegebene Nennleistung erreichen konnte. Das Übersetzungsverhältnis berechnet sich zu:

$$\ddot{u} = \frac{U_N}{U_{2,0}} = \frac{400 \text{ V}}{500 \text{ V}} = 0,8 \quad (5.1)$$

U_N : Nennspannung

$U_{2,0}$: Rotorstillstandsspannung

Die Nennspannung und Rotorstillstandsspannung sind dem Datenblatt (vgl. Tabelle 3.1) der Maschine zu entnehmen. Die Rotorströme lassen sich dann wie folgt berechnen:

$$I_2 = \ddot{u} \cdot I_2' \quad (5.2)$$

I_2 : Effektivwert Rotorstrom

I_2' : Effektivwert Rotorstrom bezogen auf Stator

Bei der Simulation der Vollumrichter ASM wird der Rotor der Maschine kurzgeschlossen. Statorseitig folgt nach einem Sinusfilter die Umrichtereinheit. Diese besteht aus einer netz- und einer maschinen-seitigen Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)-Brücke, sowie einen dazwischen liegenden Gleichstromzwischenkreis mit Bremswiderstand. Dies bedeutet, dass Energie in beide Richtungen übertragen werden kann. Vor einer zu hohen Zwischenkreisspannung schützt der Bremswiderstand die Umrichtereinheit. Nach der Umrichtereinheit folgen eine Netzdrossel und das 400 V-Versorgungsnetz. Die Rotorseite ist kurzgeschlossen. Eingangsgrößen der Simulation sind die Drehzahl der ASM sowie die Führungsgrößen für Wirk- und Blindleistung.

Das Simulationsmodell der DGASM ist ähnlich aufgebaut. Jedoch ist, gemäß dem Funktionsprinzip, der Stator mit dem Netz verbunden. Der Rotor wird über einen Sinusfilter an die Umrichtereinheit angeschlossen und diese wiederum über eine Netzdrossel mit dem Netz verbunden. Die Eingangsgrößen des Modells sind die gleichen wie bei der ASM mit Vollumrichter.

In Abbildung 5.1 ist ein Prinzip-Blockschaltbild für den neu entwickelten Leistungsregelungsblock zu sehen. Dabei unterscheiden sich die Blöcke für a) Vollumrichter und b) DGASM ausschließlich in ihren Ausgangsgrößen zur Beeinflussung von Wirk- und Blindleistung wie sie in Kapitel 2.5.1 hergeleitet wurden.

Die Netzleistung im Block „Leistungsberechnung“ wird nach den Gleichungen 2.41 und 2.42 implementiert. Dazu werden die Netzströme und -Spannungen zunächst mit Hilfe der Raumzeigertransfor-

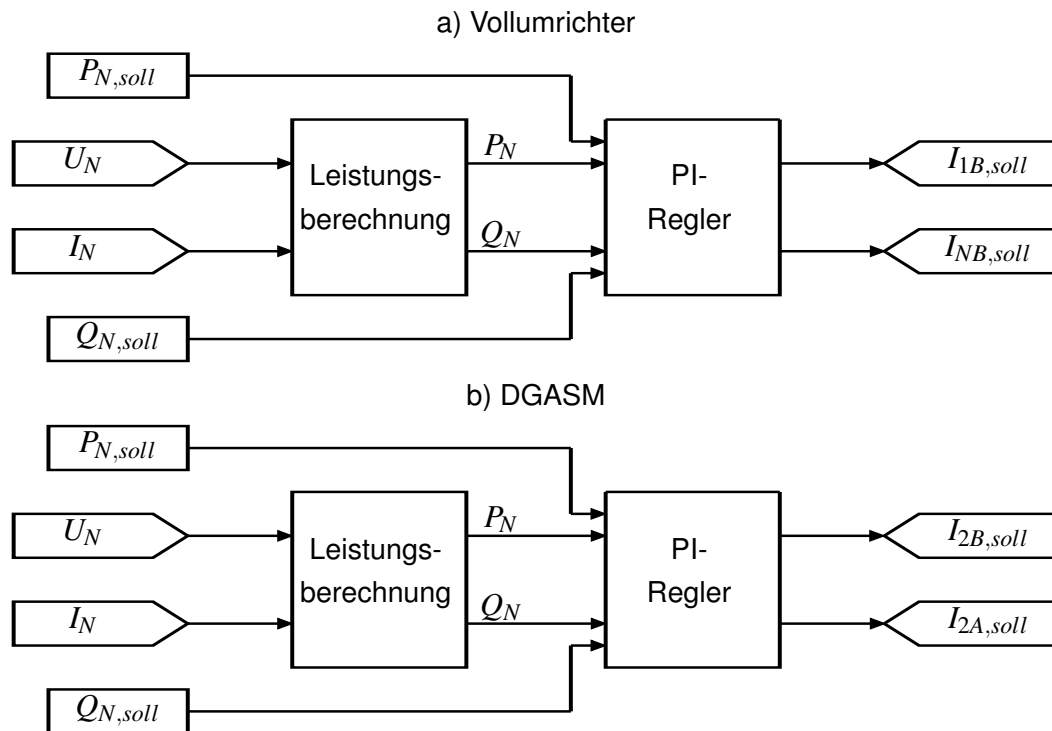


Abbildung 5.1: Blockschaltbild Leistungsregelung für beide Betriebsarten

mation in ein zweiachsiges α - β -Koordinatensystem transformiert, wobei die Abszissenachse als Realteil und die Ordinatenachse als Imaginärteil der physikalischen Größen betrachtet wird. Die Netzwerk- und Blindleistung lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$P_N = \frac{3}{2} (U_\alpha \cdot I_\alpha - U_\beta \cdot I_\beta) \quad (5.3)$$

$$Q_N = \frac{3}{2} (U_\alpha \cdot I_\beta + U_\beta \cdot I_\alpha) \quad (5.4)$$

Im Block „PI-Regler“ wird ein diskreter PI-Regler mit Anti-Wind-Up Verriegelung, um den I-Anteil bei Überschreiten der maximal zulässigen Stellgröße zu sperren, implementiert. In Abbildung 5.2 ist ein Blockschaltbild eines diskreten PI-Reglers zu sehen, wobei I der Integralanteil, P der Proportionalanteil und T_s die Diskretisierungszeit, also die Zeit zwischen zwei Abtastungen, ist. Der Eingang (IN) ist die Regeldifferenz, in diesem Beispiel $P_{N,soll} - P_{N,ist}$, der Ausgang (OUT) ist die Stellgröße I_{soll} des Reglers. Für eine derartige Parallelstruktur gilt für den Proportional- und Integralanteil

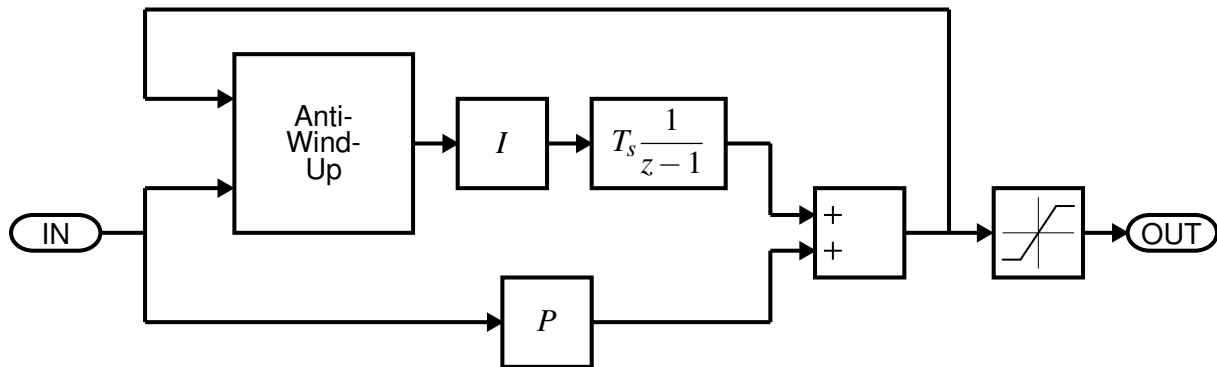


Abbildung 5.2: Parallelstruktur eines diskreten PI-Reglers

folgendes:

$$P = K_p \quad (5.5)$$

$$I = \frac{K_p}{T_p} \quad (5.6)$$

K_p : Verstärkung PI-Regler

T_p : Nachstellzeit PI-Regler

Wie in Kapitel 2.5.3 erläutert, werden für die Nachstellzeit und die Verstärkung des PI-Reglers verschiedene, systematisch festgesetzte Werte angenommen und mit Hilfe der Simulation die Dynamik des Reglers getestet. Für folgende Werte werden gute Ergebnisse erzielt:

$$K_p = 0,001 \quad (5.7)$$

$$T_p = 5 * T_{ers,i} = 6 \text{ ms} \quad (5.8)$$

$T_{ers,i}$: siehe Gleichung 2.83

Zur Ermittlung von K_p kommen die Überlegungen aus Kapitel 2.5.3 zur Anwendung. Bei einem Leistungssprung von 1000 W würde bei einem P-Anteil von 1 kurzzeitig ein Strom von 1000 A durch den Regler gefordert werden [Wor07]. Deshalb wird der P-Anteil auf einen Wert von 0,001 gesetzt. Dies hat zur Folge, dass bei einem Sollwertsprung von 1000 W der Regler einen Strom von 10 A fordert, was dem Umrichter und der Maschine keinen Schaden zufügt. Bei der Wahl der Regelparameter muss immer ein Kompromiss zwischen Dynamik und Stabilität gefunden werden, wobei für gute Dynamik die Nachstellzeit so gering wie möglich und die Verstärkung so hoch wie

möglich gewählt wird.

Die Simulationsergebnisse mit den Werten aus Gleichung 5.7 und 5.8 sind in Abbildung 5.3 dargestellt. In Teil a) wird ein Leistungssprung von 1000 W auf 3000 W simuliert. Das negative Vorzeichen in der Abbildung ist dem Verbraucherpeilsystem geschuldet und bedeutet hier, dass Leistung in das Netz eingespeist wird. Teil b) zeigt einen Blindleistungssprung von 1000 var auf 3000 var . Gut zu erkennen bei beiden Leistungssprüngen ist, dass keine Kopplung zwischen Wirk- und Blindleistung vorhanden ist. Als Ausregelzeit wird jeweils eine Dauer von 30 ms festgestellt.

In Teil c) wird eine Störgröße simuliert. Da an der realen Anlage aufgrund zu großer mechanischer Belastung keine Drehzahlsprünge vorgegeben werden können, wird in der Simulation eine Generatorbeschleunigung mit einem linearen Verlauf von $1300\frac{1}{\text{min}}$ auf $1700\frac{1}{\text{min}}$ innerhalb von 150 ms simuliert. Diese Beschleunigung hat wie erwartet keinen Einfluss auf die Blindleistung, lediglich ist ein minimaler Anstieg der Wirkleistung, aufgrund der Beziehung zwischen Drehzahl n und mechanischer Leistung P_{mech} nach Gleichung 5.9, im Bereich der Beschleunigung zu erkennen.

$$P_{mech} = M \cdot \Omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (5.9)$$

Dieser bleibt jedoch deutlich innerhalb des 5% -Toleranzbandes bezüglich der 5 kW Bemessungsleistung des Generators.

Bei der Simulation des Generators im doppelt gespeisten Betrieb werden ähnliche Ergebnisse erzielt (vgl. Abbildung 5.4). Wirk- und Blindleistungssprünge können ohne erkennbare Verkopplung schnell ausgeregelt werden. Für die Leistungsregelung der DGASM werden folgende Regelparameter verwendet.

$$K_p = 0,0008 \quad (5.10)$$

$$T_p = 5 * T_{ers,i} = 6\text{ ms} \quad (5.11)$$

Da bei der DGASM der Rotorstrom zur Erzeugung des Drehmoments verantwortlich ist, muss für den P-Anteil des Leistungsreglers dieser als Grundlage genommen werden. Bei Nenndrehmoment sind die Rotorströme kleiner als die Statorströme, weshalb auch der P-Anteil kleiner gewählt werden muss. Die Ausregelzeit beträgt wie bei der Vollumrichter ASM ungefähr 30 ms . Auch eine schnelle Generatorbeschleunigung kann ohne Abweichung aus dem 5% -Toleranzband ausgeregelt werden.

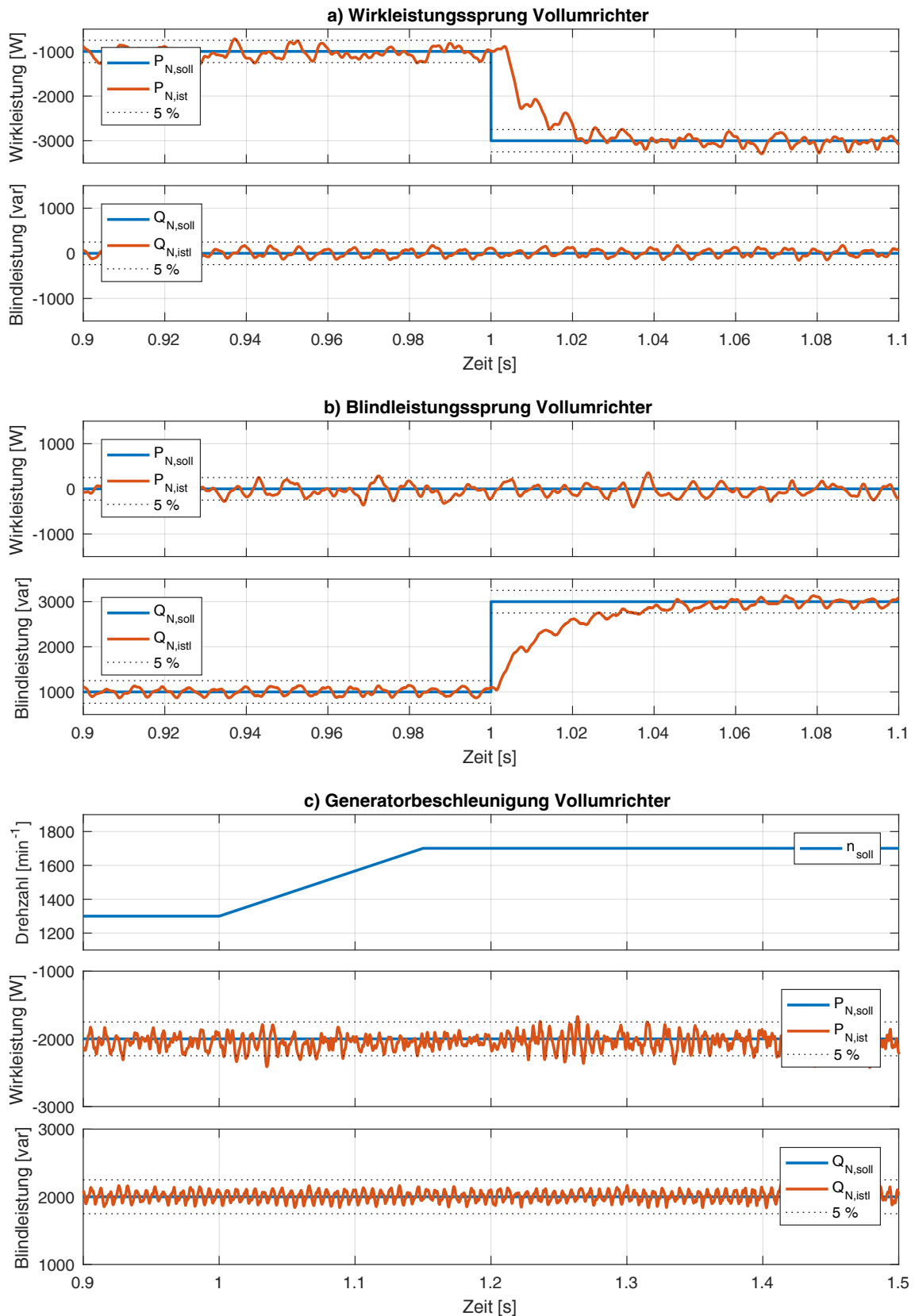


Abbildung 5.3: Simulationsergebnis Vollumrichter bei Leistungssprung und Generatorbeschleunigung

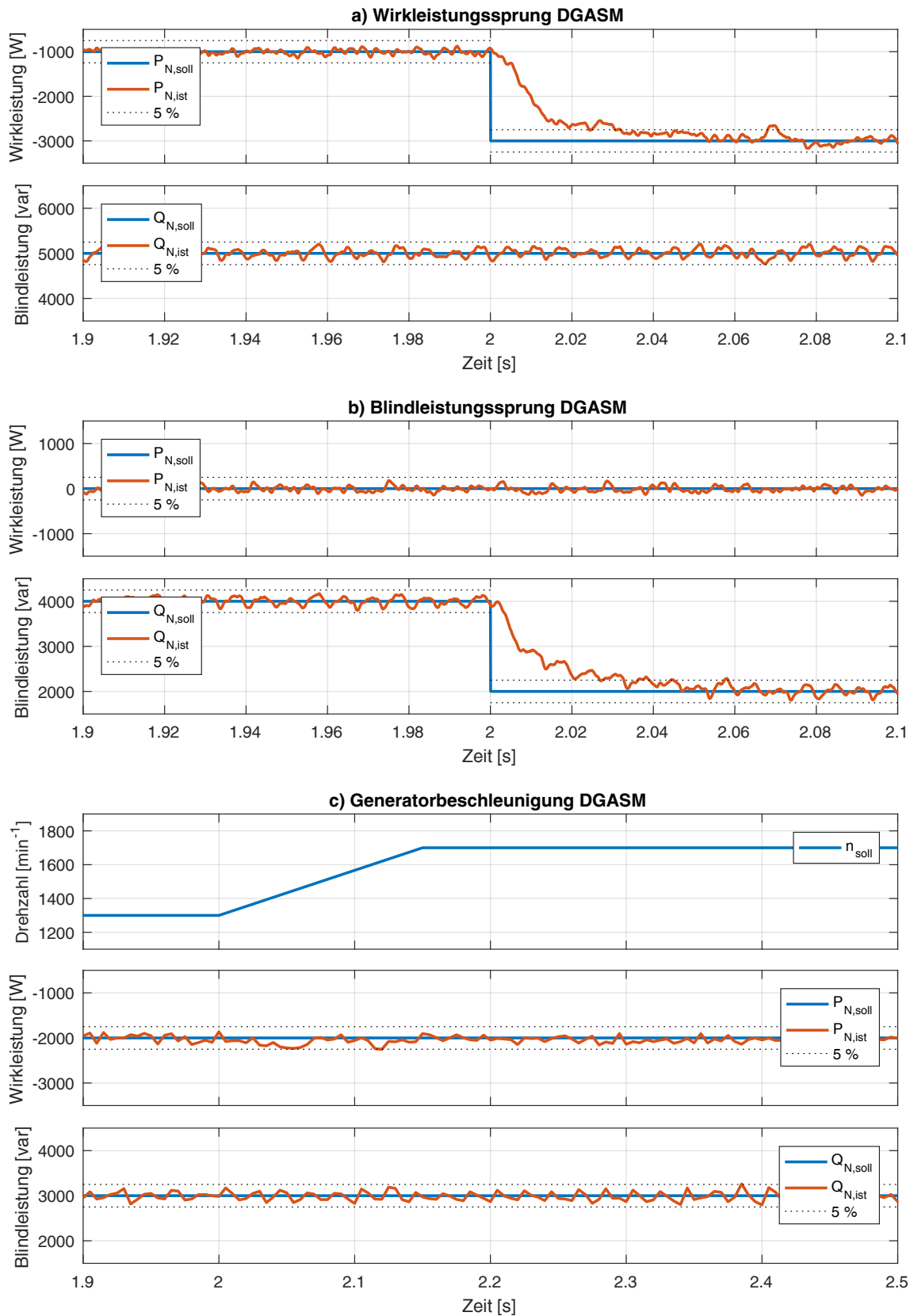


Abbildung 5.4: Simulationsergebnis DGASM bei Leistungssprung und Generatorbeschleunigung

5.2 Laboranlage

Nach erfolgreichem Test der Leistungsregler mit Hilfe der Simulation, werden die zwei Generator-konzepte am realen Versuchsstand umgesetzt. Dazu bietet dSPACE die Möglichkeit der grafischen Programmierung mit Hilfe von Simulink[®]. Somit können die Regelungsblöcke aus der Simulation direkt für das Programm der Anlage verwendet werden. Es müssen lediglich die Ein- und Ausgänge der Regelung an die Anlage angepasst werden. Dafür stehen Bibliotheken für sowohl digitale als auch analoge Ein- und Ausgänge zur Verfügung. Für die Regelung werden zwei Netzströme, zwei Netzspannungen, zwei Netzwechselrichterströme, zwei Maschinenwechselrichterströme, die Zwischenkreisspannung, die Drehzahl sowie der Rotorlagewinkel erfasst. Ausgänge sind die Ansteuerungssignale für Netz- und Maschinenwechselrichter und die Ansteuerung für den Bremswiderstand.

Für die Regelung werden die in der Simulation ermittelten Regelparameter verwendet. Diese sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

	K_p	T_p
Vollumrichter	0.001	6 ms
DGASM	0.0008	6 ms

Tabelle 5.1: Regelparameter der Leistungsregelung

Die Ergebnisse für die Vollumrichter ASM sind in Abbildung 5.5 und für die DGASM in Abbildung 5.6 dargestellt. Zur Validierung werden die gleichen Versuche wie mit der Simulation durchgeführt.

Sowohl bei der Vollumrichter ASM als auch bei der DGASM sind leichte Kopplungen zwischen Wirk- und Blindleistung zu erkennen. Diese fallen jedoch nur sehr gering aus und können durch die optimierten PI-Regler ausgeregelt werden.

Die Ausregelzeit für den Wirk- und Blindleistungssprung beträgt jeweils wie in der Simulation 30 ms. Auch die Störgröße durch eine Generatorbeschleunigung kann wie in der Simulation ohne Veränderung der Leistung ausgeregelt werden.

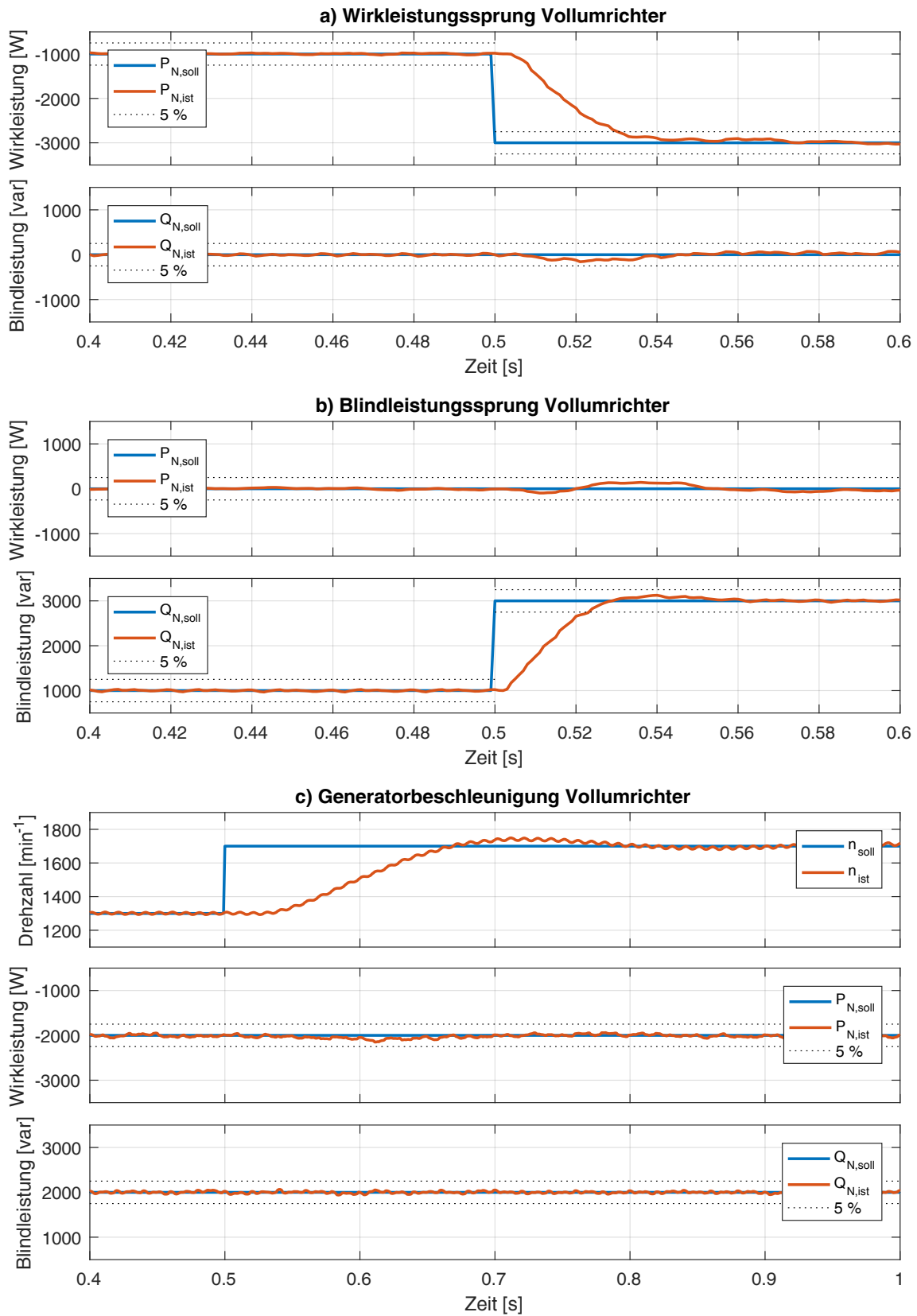


Abbildung 5.5: Ergebnis Vollumrichter bei Leistungssprung und Generatorbeschleunigung

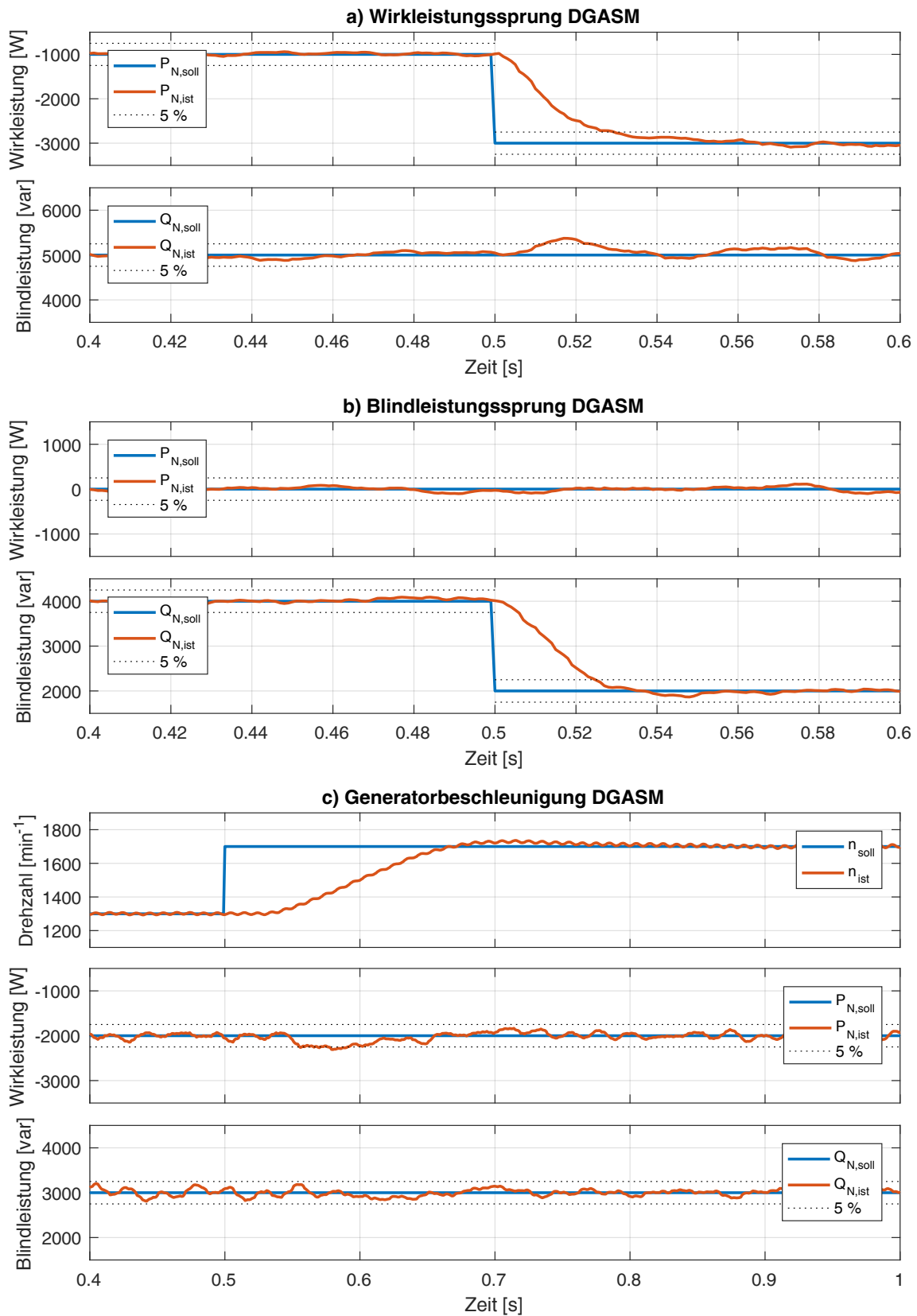


Abbildung 5.6: Ergebnis DGASM bei Leistungssprung und Generatorbeschleunigung

6 Zusammenfassung

Die in Kapitel 1.2 definierte Aufgabe, eine Leistungsregelung für einen Windkraftgenerator zu entwerfen, wurde sowohl theoretisch als auch praktisch bearbeitet. Außerdem wurden an der bestehenden Anlage systematisch nach Fehlern gesucht und diese behoben. Dadurch wurde der bisherige Versuchsstand in einen Zustand versetzt, der die Entwicklung einer Leistungsregelung ermöglichte. Aufbauend darauf, wurde eine Leistungsregelung entwickelt und abschließend einem Praxistest unterzogen.

Es wurden die Grundlagen der Windkraftausnutzung beleuchtet und die daraus resultierenden Generatorkonzepte zur Erzeugung von Strom mit Hilfe von Drehstromgeneratoren erläutert. Basierend auf dem Konzept der Transformation von Dreiphasensystemen in zeitlich umlaufende Zweiphasensysteme wurden die Grundgleichungen für eine Asynchronmaschine aufgestellt. Somit konnten die relevanten Gleichungen zur Beeinflussung der Statorleistung für die beiden Generatorkonzepte, Asynchronmaschine mit Vollumrichter und Asynchronmaschine mit Teilumrichter im Rotorkreis (DGASM), hergeleitet werden. Anschließend wurde die Theorie der Netzleistungsregelung für beide Betriebsarten untersucht. Nach einer Beschreibung des in der HAW Hamburg verwendeten Versuchsstands folgte eine Umsetzung der Leistungsregelung für beide Generatorkonzepte mit Hilfe einer Simulation in Simulink[®]. Die in der Simulation entwickelten und getesteten Leistungsregler wurden anschließend auf die reale Anlage portiert und dort ebenfalls getestet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 in einer Übersicht dargestellt.

Die Funktionalität der Leistungsregelung wurde bereits im vorhergehenden Kapitel nachgewiesen. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit der Anlage gleiche oder sogar minimal bessere Ergebnisse, verglichen mit der Simulation, erzielt werden konnten. Der Einsatz einer Simulation hat ausschlaggebend zur Beschleunigung und sicheren Entwicklung der Leistungsregelung beigetragen.

Mit einer Ausregelzeit von ca. 40 ms bei einem Leistungssprung von 6 kW kommt die Regelung den Ergebnissen aus [Ars89] sehr nahe. Dort wurde eine Ausregelzeit von 50 ms erreicht.

In [Zah16] wurde der Versuchsstand mit der in dieser Arbeit implementierten Leistungsregelung im Hinblick auf Leistungsfluss und Wirkungsgrad untersucht. Die Ergebnisse der Wirkungsgradanalyse sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Für die Asynchronmaschine wurde ein Wirkungsgrad von 0,83 ermittelt.

Betriebsart	Gesamtwirkungsgrad η_{ges}
ASM direkt am Netz	0,83
ASM mit Vollumrichter	0,77
DGASM	0,79

Tabelle 6.1: Gesamtwirkungsgrad Generatorsysteme

Im Datenblatt der Maschine ist ein Wirkungsgrad von 0,821 angegeben. Für die beiden Generatorsysteme werden aufgrund der Umrichterverluste Gesamtwirkungsgrade erwartet, welche unterhalb dieses Werts liegen. Wie eingangs bereits erwähnt, wird bei der DGASM ein besserer Wirkungsgrad erwartet als bei der Vollumrichter ASM. Diese Erwartung bestätigen die Ergebnisse aus [Zah16], was als Indiz für eine korrekte Regelung gewertet werden kann.

6.1 Ausblick

Bei einer geplanten Duplizierung des Versuchsstands sollte das Konzept der doppelt gespeisten Asynchronmaschine mit Transformator nicht weiter verfolgt werden. Dieses wurde zwar in dieser Arbeit auch umgesetzt, jedoch hat es keine praktische Bedeutung, da aktuell in Windkraftanlagen rotorseitig keine Transformatoren zur Reduzierung der Zwischenkreisspannung eingesetzt werden. Dies würde auch die Kompensation der Blindleistung über den netzseitigen Umrichter erschweren, da bei niedrigen Spannungen zu hohe Ströme zur Kompensation erforderlich wären.

Das Programm für den Versuchsstand und die Simulation mit Simulink[®] sind auf einem Datenträger dieser Ausarbeitung beigelegt, oder können bei Prof. Dr.-Ing. Michael Röther eingesehen werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland	6
1.2	Asynchrongenerator direkt am Netz	7
1.3	Asynchrongenerator mit Vollumrichter	8
1.4	Doppelt gespeister Asynchrongenerator	8
1.5	Anlagenzubau nach Anlagenkonzept	9
2.1	Winkelbeziehungen der Raumzeigertransformation	12
2.2	Koordinatensysteme und Raumzeiger	14
2.3	Prinzipbild einer Drehfeldmaschine	16
2.4	T-Ersatzschaltbild einer ASM	20
2.5	Signalflussplan der ASM	22
2.6	Zeigerdiagramm mit Winkelbeziehungen	24
2.7	Signalflussplan der DGASM	27
2.8	Stellgrößen für Wirk- und Blindleistung	30
2.9	Regelungstechnisches Blockschaltbild Vollumrichter	31
2.10	Regelungstechnisches Blockschaltbild DGASM	33
3.1	Maschinenseite des Versuchsstands	35
3.2	Versuchsstand von vorne	36
3.3	Stecktafel	37
3.4	Vergleich Messwandler	38
4.1	Simulation Verkopplung	41
4.2	Vergleich der alten Parameter a) mit den neuen Parametern b)	43
4.3	Einstellungen A/D Wandler	44
4.4	Ersatzschaltbild Netzanschluss mit Zeigerdiagramm	46

4.5	Auswirkung der Zwischenkreisspannung	46
4.6	Vergleich Netzstrom	47
5.1	Blockschaltbild Leistungsregelung	50
5.2	Parallelstruktur diskreter PI-Regler	51
5.3	Simulationsergebnis Vollumrichter	53
5.4	Simulationsergebnis DGASM	54
5.5	Ergebnis Vollumrichter	56
5.6	Ergebnis DGASM	57

Tabellenverzeichnis

3.1	Kenndaten des Asynchrongenerators	37
4.1	Gesamtwirkungsgrad Generatorsysteme	42
5.1	Regelparameter der Leistungsregelung	55
6.1	Gesamtwirkungsgrad Generatorsysteme	59

Symbolverzeichnis

1 Index Statorgrößen

2 Index Rotorgrößen

α, β Real- Imaginärteil statorfestes Koordinatensystem

β_K Winkel zwischen allgemeinem und statorfestem Koordinatensystem

β_L Winkel zwischen rotorfestem und statorfestem Koordinatensystem

β_S Winkel zwischen α -Achse und Statorstromraumzeiger

i Übersetzungsverhältnis Stator zu Rotor

η Wirkungsgrad

γ_i Winkel zwischen A-Achse und Statorstromraumzeiger

\Im Imaginärteil

\Re Realteil

ρ	Winkel zwischen Netzspannungsraumzeiger und Imaginärteil der Netzspannung
σ	Blondelscher Streukoeffizient
Θ	Trägheitsmoment
Ω_0	Winkelgeschwindigkeit Netzspannung
Ω_1	Winkelgeschwindigkeit statorfestes Koordinatensystem
Ω_K	Winkelgeschwindigkeit allgemeines Koordinatensystem
Ω_L	Winkelgeschwindigkeit rotorfestes Koordinatensystem
Ω_m	mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors
Ω_{el}	elektrische Winkelgeschwindigkeit des Rotors
$\vec{\Psi}$	Flussraumzeiger
\vec{a}	komplexe Drehung um 60°
\vec{I}	Stromraumzeiger
\vec{I}_m	Magnetisierungsstromraumzeiger
\vec{I}_{m1}	erweiterter statorbasierter Magnetisierungsstromvektor
\vec{U}	Spannungsraumzeiger

K Hochindex für allgemeines Koordinatensystem

L Hochindex für rotorfestes Koordinatensystem

S Hochindex für statorfestes Koordinatensystem

' auf Stator bezogene Rotorgrößen

* konjugiert komplexer Raumzeiger

A Einheit Ampere

A^*, B^* netzspannungsorientiertes Koordinatensystem

I_L Strom durch Netzdrossel

$i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ Statorströme Real- und Imaginärteil

i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} Momentanwerte Statorströme

j imaginäre Zahl

K_p Verstärkung PI-Leistungsregler

L Eigeninduktivität

L_σ Streuinduktivität

L_h Hauptinduktivität

M Gegeninduktivität zwischen Stator und Rotor

M_W Widerstandsdrehmoment

M_{Mi} inneres Drehmoment

N Drehzahl

N Index Netzgrößen

n Drehzahl

P Wirkleistung

Q Blindleistung

R Widerstand

s Schlupf

T Zeitkonstante

T_Σ Summenzeitkonstante

T_C Periodendauer Stromregelung

T_n Nachstellzeit PI-Regler

T_p Nachstellzeit PI-Leistungsregler

T_s	Diskretisierungszeit
T_T	Totzeit Stromregelung
$T_{ers,i}$	Ersatzzeitkonstante Stromregelkreis
T_{Mess}	Messgliedverzögerung
T_{PWM}	PWM Periodendauer
U_L	Spannung zwischen zwei Leitern
U_L	Spannungsabfall an Netzdrossel
$U_{2,0}$	Rotorstillstandsspannung
U_{Str}	Strangspannung
U_{WR}	Spannung am Ausgang des Netzwechselrichters
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung
V	Einheit Volt
V_R	Verstärkung PI-Regler
V_S	Verstärkung Strecke
var	Einheit Blindleistung

W Einheit Watt

Z_p Polpaarzahl

*

Sollgrößen

A, B Real- Imaginärteil allgemeines Koordinatensystem

I Integralanteil PI-Regler

k, l Real- Imaginärteil rotorfestes Koordinatensystem

P Proportionalanteil PI-Regler

s Parameter aus Laplace-Transformation

z Parameter aus der Z-Transformation

Abkürzungsverzeichnis

ADC Analog Digital Converter

ASG Asynchrongenerator

ASM Asynchronmaschine

DGASM doppelt gespeiste Asynchronmaschine

GM Gleichstrommaschine

IGBT Insulated-Gate Bipolar Transistor

MWR Maschinenwechselrichter

NWR Netzwechselrichter

PWM Pulse Width Modulator (deutsch: Puls Weiten Modulator)

Literaturverzeichnis

- [Ars89] Arsudis, Dipl.-Ing. D.: *Doppeltgespeister Drehstromgenerator mit Spannungszwischenkreis-Umrichter im Rotorkreis für Windkraftanlagen*. Dissertation, 1989
- [Bü15] Büsis, Fabian: *Steuerung und Regelung einer Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator*. Masterthesis, 2015
- [dSp05] dSpace: *Squirrel Cage Induction Motor Control with DS1103 Controller Board*. Application Notes, 2005
- [Fra09] Fraunhofer: *14. Kassler Symposium Energie-Systemtechnik - Windenergiesysteme*. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2009
- [Fra12] Fraunhofer: *Windenergie Report Deutschland 2011*. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2012
- [Leo96] Leonhard, Werner: *Control of Electrical Drives*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [PRP13] Pardalos, Panos M.; Rebennack, Steffen; Pereira, Maria V. F.; Iliadas, Niko A.; Pappu, Vijay: *Handbook of Wind Power Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [Sch07] Schröder, Dierk: *Elektrische Antriebe - Grundlagen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007

- [Sch09] Schröder, Dierk: *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [Ste13] Steinhart, Prof. Dr.-Ing. H.: *Dynamik Elektrischer Antriebe Wintersemester 2013/2014*. Vorlesungsskript, 2013
- [Wor07] Wornik, Christian: *Regelung eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators für einen Windenergieanlagenprüfstand*. Diplomarbeit, 2007
- [Zah16] Zahel, Marco: *Leistungsfluss- und Wirkungsgradanalysen an Asynchrongenerator-Systemen für den Versuchsstand Windenergie-Netzeinspeisung*. Bachelorthesis, 2016
- [Zen14] Zeneli, Shaban: *Steuerung und Regelung für eine Windenergie-Netzeinspeisung mit vollumrichter-gespeistem Asynchrongenerator*. Masterthesis, 2014

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die direkt oder indirekt zum Gelingen dieser Master Thesis beigetragen haben, bedanken.

Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Röther für die sehr gute Betreuung dieser Arbeit und für die vielen guten Ratschläge.

Ebenso großer Dank gilt den Mitarbeitern welche sich immer für professionelle fachliche Hilfe zur Verfügung gestellt haben. Dieser Dank gilt besonders Dominik Bothe sowie Frank Korpel.

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 06.10.2016

Ort, Datum

Unterschrift