

Definition, Spezifikation und Realisierung einer Testumgebung für die Durchführung von anwendungsspezifischen Testfällen für Kraftwerkssystemtechnik

Diplomarbeit

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Engineers (DI)

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von

Sven VASILIC, BSc.

Mat.Nr.: 00926330

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dr.-Ing.Wolfgang Gawlik

Wien, am 8. März 2020

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mir beim erfolgreichen Durchführen dieser Arbeit, sowie dem gesamten Studium unterstützt haben. Der meiste Dank gebührt meinen Eltern Elvira und Zdenko, wie meiner Schwester Anja, die mich zu jeder Zeit vorangetrieben und motiviert haben und mir erst die Möglichkeit boten dieses Studium zu beginnen und erfolgreich abzuschließen.

Für die gewissenhafte Betreuung und Begutachtung meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik bedanken. Weiters Danke ich der Firma Andritz Hydro GmbH und besonders DI(FH) Michael Cech, der es mir ermöglicht hat diese Arbeit überhaupt erst durchzuführen. Besonders seine hilfreichen Anregungen und Kommentare trugen sehr viel zur Qualität und Substanz dieses Werkes bei. Für Ihre Unterstützung danke ich auch DI Luis Toledo, DI Ladislav Leska, Dr. Markus Egretzberger und DI Bernhard Mayrhofer die mir bei jedem Problem hilfreich zur Seite standen.

Kurzbeschreibung

Diese Arbeit ist eine Beschreibung der Tätigkeit zur Umsetzung einer Testumgebung für Kraftwerkssystemtechnik. Es handelt sich dabei um den Spannungsregler HIPASE-E der Firma Andritz Hydro GmbH der für die Erregung von Synchrongeneratoren zur Verwendung kommt. Die ständige Weiterentwicklung der Applikation impliziert ebenso eine ständige Überprüfung der Funktionsweise des Geräts. Daher bestand die Forderung der Firma Andritz darin, eine Testumgebung zu schaffen die in der Lage ist, eine minimale Anzahl an Tests vollständig automatisiert durchzuführen. Die Modellierung von elektrischen Systemen, speziell die Nachbildung des Verhaltens einer Schenkelpolmaschine als mathematisches Modell, dient dabei als fundamentale Basis dieser Arbeit.

Die Kompaktheit des Aufbaus, die zentrale Bedienbarkeit sowie einfache Erweiterungsmöglichkeit für zukünftige Anwendungen bezeichnen die Eckpfeiler der geforderten Eigenschaften. Nach der Auswahl und Zusammenstellung der Mittel wird das verwendete Modell erläutert und die korrekte Funktionsweise anhand von realen Messungen bestätigt und präsentiert.

Abstract

This thesis describes an implementation procedure of a test environment for power plant systems. It is based on a voltage regulator HIPASE-E developed by Andritz Hydro GmbH and mainly used for excitation of synchronous generators. Continuous application of this device also calls for a simultaneous inspection of its functionality. Therefore, Andritz was faced with a requirement to develop a test environment that is able to perform a minimum number of tests completely automatically. The fundamental theory behind this thesis is based on modeling of electric systems, with special focus on using a mathematical model to reproduce the behavior of a salient pole synchronous machine.

The cornerstones of the setup's required properties are its compact design, centralized operability, and possibility to easily add new features in future applications. After selecting and compiling the required means, the used model and its functionality are validated based on measurements and presented here.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	3
2.1	Modellbildung	3
2.2	Modellierung von elektrischen Systemen	4
2.2.1	Mathematische Beschreibung einer Synchronmaschine	5
2.2.2	Die dq0-Transformation	10
2.2.3	Rechnen mit bezogenen Größen	11
2.3	Generatorerregung mittels Spannungsregler	13
3	Analyse der Aufgabenstellung	15
3.1	HIPASE-E	16
3.1.1	Aufbau	17
3.1.2	Schnittstellen des HIPASE-Geräts	17
3.1.3	HIPASE-E Funktionalitäten	19
3.2	Analyse der Diplomarbeit von DI Stefan Knieling	20
3.2.1	Ausarbeitung der Testfälle	20
3.3	Festlegung der notwendigen Mittel	21
4	Aufbau	23
4.1	Auswahl der Mittel	23
4.1.1	Raspberry Pi - RPi	23
4.1.2	SPS - Steuerung	24
4.1.3	Praktische Ausführung des Generatormodells	25
4.1.4	Nachbildung des Feldkreises	28
4.2	Beschreibung des mechanischen Gesamtaufbaus	32
4.3	Beschreibung einzelner Elemente	32
4.3.1	Realisierung der seriellen Kommunikation zwischen RPi und DSP	32
4.3.2	Mathematisches Generatorberechnungsmodell im DSP	35
5	Testfälle und Validierung	48
5.1	Definition und Realisierung der Testfälle	48
5.1.1	Auferregung des Synchrongenerators auf Nennspannung	49
5.1.2	Sollwertsprung der Generatorspannung	51
5.1.3	Eingriff des verzögerten Übererregungsbegrenzers	53
5.1.4	Eingriff des unverzögerten Maximalfeldstrombegrenzers	56
5.1.5	Eingriff des Untererregungsbegrenzers	58
5.1.6	Eingriff des Minimalfeldstrombegrenzers	61

5.1.7	Eingriff des Statorstrombegrenzers	63
5.1.8	Lastabwurf auf Eigenbedarf	65
5.1.9	Externer Fehler: 3-poliger Kurzschluss	67
5.2	Validierung der Testfälle	70
5.2.1	Analyse der Ergebnisse	70
5.2.2	Bewertung des Gesamtaufbaus	73
6	Ausblick	74
	Literaturverzeichnis	78
A	Verwendetes mathematisches Modell	79
B	Foto des Aufbaus	82
	Eidesstattliche Erklärung	83

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

Abkürzungen

RPi	Raspberry Pi
DSP	Digitaler Signaprozessor
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
AMZ	Abhängiger Maximalstrom Zeitschutz
LS	Leistungsschalter

Formelzeichen

u_a, u_b, u_c	Momentanwerte der Statorspannungen pro Strang
i_a, i_b, i_c	Momentanwerte der Statorströme pro Strang
i_{fd}, i_{kd}, i_{kq}	Ströme in Feld- und Dämpferwicklung
u_{fd}	Feldspannung
l_{aa}, l_{bb}, l_{cc}	Statorselbstinduktivität pro Strang
l_{ab}, l_{bc}, l_{ca}	Gegeninduktivität der Stränge
$l_{afd}, l_{akd}, l_{akq}$	Gegeninduktivität zwischen Stator und Rotorkreisen
$l_{ffd}, l_{kkd}, l_{kkq}$	Selbstinduktivität der Rotorkreise
R_a, R_b, R_c	Statorwiderstand pro Strang

Kapitel 1

Einleitung

In modernen Kraftwerken der heutigen Zeit stellen automatisierte Systeme den Großteil der vorhandenen Komponenten dar. Speziell für die Regulierung der Netzstabilität und Gewährleistung der Versorgungssicherheit erlangt die Spannungsregelung von Generatoren eine besondere Bedeutung in den Energienetzen. In der Automatisierungstechnik gelten eindeutige Regeln welche die Stabilität von Reglern in Kombination mit den zu regelnden Systemen definieren. Der theoretischen Erarbeitung dieser eindeutigen Bestimmungen ist stets der praktische Nachweis nachzureichen. Um ständige Weiterentwicklungen bestehender Erregersysteme auf richtige Funktionsweise testen zu können und dabei immer dieselben Standards beizubehalten, besteht die Forderung nach einer Testumgebung welche alle nötigen Eigenschaften besitzt, um ein reales Umfeld für diese Zwecke erzeugen zu können. Vielmehr soll durch einen definierten Ablauf an Versuchen eine valide Aussage über Stabilität und Funktionsweise anhand der erzielten Ergebnisse erfolgen können.

Mit der Diplomarbeit „**Definition, Spezifikation und Analyse stressrelevanter Testfälle für Kraftwerkssystemtechnik**“ von DI Stefan Knieling an der Technischen Universität Wien besteht bereits eine theoretische Ausarbeitung von durchzuführenden Testfällen um eine solche Aussage treffen zu können. Aufbauend darauf beschäftigt sich die folgende Arbeit mit der Umsetzung einer solchen Testumgebung durch Auswahl benötigter Mittel, Erstellung mathematisch relevanter Modelle, sowie Realisierung und abschließender Verifikation.

Zu Beginn folgt in Kapitel 2 ein kurzer Ausflug in die theoretischen Hintergründe und verwendeten mathematischen Werkzeuge die zu einem besseren Verständnis der anschließenden Kapitel dienen sollen.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Analyse der Aufgabenstellung und definiert grob die notwendigen Mittel, die zur Umsetzung nötig sind.

Der essentielle und umfangreichste Teil ist in Kapitel 4 zusammengefasst. Zuerst wird eine Auswahl der einzelnen Komponenten getroffen sowie die übernommenen Aufgaben näher erläutert. Die Realisierung der Modelle findet sich im Anschluss an die Beschreibung der zusammengestellten Hardware des gesamten Aufbaus.

Kapitel 2

Grundlagen

Bevor ein Regler für den Betrieb von Synchrongeneratoren untersucht werden kann, müssen zuerst grundlegende Eigenschaften des zu regelnden Systems geklärt werden. Elektrische Energieumwandlung erfolgt auf mehrere verschiedene Arten. Abhängig vom Primärenergieträger ergeben sich dabei unterschiedliche Anforderungen an die zu treibende elektrische Maschine. Dabei müssen langsam drehende Prozesse, wie etwa bei einem Laufwasserkraftwerk, genauso vom Spannungsregler beherrscht werden können, wie bei hochdynamischen Prozessen eines durch eine Dampfturbine angetriebenen Turbogenerators.

Da es sich bei den zu regelnden Maschinen um elektrisch erregte Synchrongeneratoren mit Scheinleistungen von mehreren hundert Megavoltampere handelt, besteht fast keine Möglichkeit den Spannungsregler an realen Maschinen dieser Größenordnung ohne weiteres zu testen. Um jedoch die dafür nötigen Mittel zu schaffen, kann man sich der Modellbildung bedienen, welche es ermöglicht, ein in diesem Fall elektrisches System vollständig und mit hinreichender Genauigkeit nachzustellen. Es sei hier erwähnt, dass sich der Begriff des Systems ausschließlich auf elektrische Zusammenhänge bezieht.

2.1 Modellbildung

Die Aufgabe der Modellbildung besteht darin ein existierendes System mit Hilfe von mathematischen Werkzeugen so zu beschreiben, dass es dem realen Verhalten, mit einer im Vorhinein definierten Genauigkeit entspricht. Welche Eigenschaften dafür nötig sind muss für jede Anwendung individuell festgelegt werden. Im Allgemeinen lässt sich aber sagen, dass jedes System von außen rein über seine Ein- und Ausgänge betrachtet werden kann, so wie in [Abbildung 2.1](#) dargestellt.

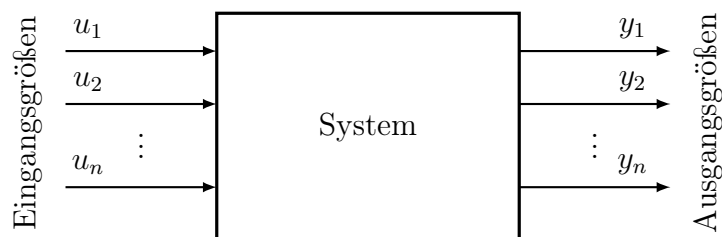


Abbildung 2.1: System in allgemeiner Darstellung[5, S.1]

Kann man nun die Zusammenhänge mathematisch so beschreiben, dass ein bestimmter Eingangswert zu einem definierten Ausgangswert führt, dann ist das System modellierbar. Bevor es jedoch überhaupt soweit kommen kann, müssen alle möglichen Ein- und Ausgangsgrößen erkannt und als diese gekennzeichnet werden. Erst danach kann das eigentliche Systemverhalten nachgebildet werden.

2.2 Modellierung von elektrischen Systemen

In der Elektrotechnik obliegt jedes System einer Menge von mathematischen Gleichungen, welche es erlauben, dieses zu beschreiben. Gesetze, wie die Kirchhofs'schen Gleichungen, das Faraday'sche Induktionsgesetz oder die Maxwell Gleichungen, werden über Bauelementgleichungen miteinander verknüpft und formen somit die Grundlage jeder physikalischen Verhaltensnachbildung. Im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit gibt es eine Vielzahl an Hilfsmitteln, die verwendet werden können. Speziell die Rechnung mit bezogenen Größen sowie die Anwendung der $dq0$ -Transformation finden hier Anwendung und sind in eigenen Abschnitten näher beschrieben.

Bevor ein konkretes System, wie das einer Synchronmaschine, modelliert werden kann, fehlen noch ein paar grundlegende Zusammenhänge aus der Systemtheorie. Jedes lineare und zeitinvariante System lässt sich in folgender Form vollständig beschreiben[5, S.40]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{2.1}$$

Dabei gilt die Notation für die Zustandsgrößen x , die Ausgangsgrößen y und die Eingangsgrößen u :

$$\begin{aligned}x &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \\ y &= [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]^T \\ u &= [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_l]^T\end{aligned}\tag{2.2}$$

wobei weiters \dot{x} für eine verkürzte Schreibweise der zeitlichen Ableitung der Form $\frac{d}{dt}x$ steht.

Zur Erfüllung des Dimensionskriteriums beschreibt die Matrix A eine $(n \times n)$ Matrix, B eine $(n \times l)$ Matrix, C eine $(m \times n)$ Matrix und D eine $(m \times l)$ Matrix.

Da es sich bei dem im Abschnitt 4.3.2 realisierten mathematische Modell der Synchronmaschine um ein digitales System handelt, müssen die beiden Gleichungen aus (2.1) zeitdiskretisiert werden. Für eine feste Abtastzeit T_s gilt der Ausdruck:

$$\frac{x_{k+1} - x_k}{T_s} = Ax_k + Bu\tag{2.3}$$

Nach Umformen auf x_{k+1} und Herausheben von x_k folgt die zeitdiskrete Systemgleichung:

$$x_{k+1} = (AT_s + E)x_k + BT_s u \quad (2.4)$$

wobei E für die Einheitsmatrix steht. Für die Zeitdiskretisierung müssen also die aufgestellten Matrizen A und B auf die zeitdiskrete Form umgerechnet werden und anschließend als A_z und B_z bezeichnet werden.

$$A_z = AT_s + E \quad (2.5)$$

$$B_z = BT_s \quad (2.6)$$

Damit wird (2.1) zu:

$$x_{k+1} = A_z x_k + B_z u \quad (2.7)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.8)$$

Bereits hier kann eine wichtige Aussage über die Stabilität des Systems getätigt werden. Allgemein gilt ein zeitkontinuierliches System als stabil wenn die Eigenwerte der Matrizen in der linken komplexen Halbebene liegen, gleichbedeutend mit $\Re(\lambda) < 0$ [5, Satz 3.4].

Für zeitdiskrete Systeme gilt eine ähnliche Bedingung, jedoch ist die Stabilitätsgrenze nicht die linke komplexe Halbebene, sondern der Einheitskreis der z -Ebene. Ein zeitdiskretes System gilt dann als stabil, wenn der Betrag aller Nullstellen des Einheitskreispolynoms $n(z)$ im offenen Inneren des Einheitskreises liegt, gleichbedeutend muss für alle Wurzeln von $z_i, i = 1 \dots n, |z_i| < 1$ sein. [5, Definition 6.3].

2.2.1 Mathematische Beschreibung einer Synchronmaschine

Zur vereinfachten Beschreibung einer Synchronmaschine werden vorweg gewisse Annahmen getroffen. Dies dient in erster Linie dazu, eine elegante Art der mathematischen Formulierung zu ermöglichen, ohne dabei signifikanten Eingriff in das physikalische Verhalten realer Maschinen zu tätigen:

- Nutungseffekte und andere feldverzerrende Einflüsse werden nicht berücksichtigt.
- Die Statorwicklungen sind hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung des Rotors sinusförmig entlang des Luftspalts verteilt.
- Magnetische Hystereseeffekte können vernachlässigt werden.
- Sättigungseffekte in allen magnetischen Kreisen werden vernachlässigt.

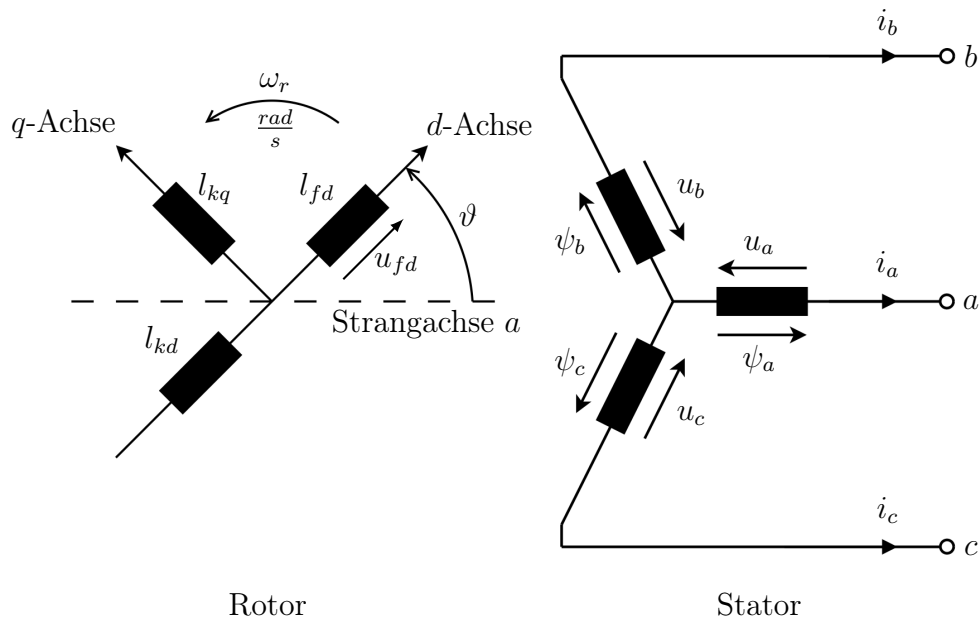


Abbildung 2.2: Stator und Rotor Ersatzschaltbild

Eine elektrisch erregte Synchronmaschine setzt sich zusammen aus einer Drehfeldwicklung, meist der Stator, und einer Erregerwicklung, zumeist im Rotor. Obwohl sich Bauformen stark unterscheiden können, lassen sich die Grundeigenschaften anhand einem Beispiel einer zweipoligen „Ersatzmaschine“ vollständig beschreiben. Sowohl für den Stator als auch für den Rotor können elektromagnetische Ersatzanordnungen angegeben werden, wie in Abbildung 2.2 gezeigt. Die drei Stränge werden um 120 Grad sowohl räumlich als auch elektrisch phasenversetzt als ideale Spulen und dem daraus erzeugten Fluss ψ je Phase dargestellt. Die jeweilige Strangachse fällt dabei entgegengesetzt mit dem zugehörigen Flussraumzeiger zusammen.

Die Erregerwicklung einer Synchronmaschine führt Gleichstrom. Aufgrund der Rotation im regulären Betrieb sieht ein auf dem Stator fest sitzender Beobachter jedoch ein sich konstant drehendes Wechselfeld mit der elektrischen Frequenz ω_e . Für Maschinen mit der Polparzahl $2p = 2$ entspricht die elektrische Drehzahl auch der mechanischen Drehzahl. Für alle anderen Polparzahlen müssen die Drehzahlunterschiede mit

$$\omega_e = p \cdot \omega_m \quad (2.9)$$

angepasst werden. Abbildung 2.2 links zeigt die räumliche Darstellung der Erregerwicklung mit angelegter Erregerspannung u_{fd} und dem daraus resultierenden Erregerstrombelag i_{fd} , in weiterer Folge auch Feldstrom genannt. Die beiden Strombeläge i_{kd} und i_{kq} erzeugen in den jeweils kurzgeschlossenen Induktivitäten l_{kd} und l_{kq} ebenfalls magnetische Flüsse. Damit lassen sich Wirkungen der im Betriebsfall auftretenden (Verlust-)Ströme im Dämpferkäfig oder etwaige Wirbelstromverluste berücksichtigen. Besonders bei Turbogeneratoren spielen diese Wirbelstromverluste eine Rolle, da aus mechanischen Gründen der Rotor zumeist als massiver Körper gefertigt ist und nicht aus gegeneinander isolierten Blechpaketen wie bei der Schenkelpolmaschine. Der Index k deutet darauf hin,

dass die Anzahl der modellierten Spulen keineswegs begrenzt ist. Vielmehr gibt es Bauformen von Synchrongeneratoren die zum Beispiel mehr als einen Dämpferkäfig besitzen. Eben solche Unterschiede lassen sich mit Hilfe verschiedener k Indizes auf mehrere unterschiedliche Spulen aufteilen und berücksichtigen.

Der eingezeichnete Winkel ϑ zwischen der Strangachse a und der Feldachse d heißt Polradwinkel und bezeichnet den Öffnungswinkel zwischen zwei zugehörigen Polen im Stator und Rotor. Sein Wert variiert in Abhängigkeit des mechanischen und elektrischen Lastpunktes und wird in elektrischen Grad gemessen.

Für die weiteren Berechnungen ist es vorteilhaft alle elektrischen Größen einer Synchronmaschine, welche als Raumzeiger in der komplexen Ebene dargestellt werden können, in zwei Komponenten aufzuteilen, wie im nachfolgenden Abschnitt 2.2.2 der $dq\theta$ -Transformation näher beschrieben wird. Eine der beiden Komponenten liegt in Phase mit dem Strombelagszeiger des Erregerfeldes und wird als d -Achse bezeichnet. Dazu in 90 Grad mathematisch positiv gezählt steht die q -Achse. Dieses Koordinatensystem rotiert im mathematisch positiven Sinn mit der Winkelgeschwindigkeit ω_r , gemessen in elektrischen Radiant pro Sekunde.

Aus den grundlegenden Beobachtungen rotierender magnetischer Felder koppelt das Faraday'sche Induktionsgesetz diese direkt mit der daraus folgenden induzierten Spannung. Somit lassen sich für alle drei Stränge die Statorspannungsgleichungen über das in Abbildung 2.3 gezeigte Ersatzschaltbild angeben zu [6, S.61]:

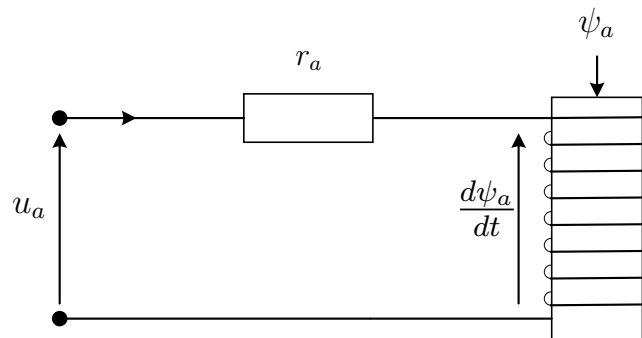


Abbildung 2.3: Einsträngige Spannungsinduktion

$$u_a = \frac{d\psi_a}{dt} - r_a i_a \quad (2.10)$$

$$u_b = \frac{d\psi_b}{dt} - r_b i_b \quad (2.11)$$

$$u_c = \frac{d\psi_c}{dt} - r_c i_c \quad (2.12)$$

Dabei beschreibt ψ_a den im Strang a verketteten Gesamtfluss und setzt sich zu jedem beliebigen Zeitpunkt wie folgt zusammen:

$$\psi_a = -l_{aa} i_a - l_{ab} i_b - l_{ac} i_c + l_{afd} i_{fd} + l_{akd} i_{kd} + l_{akq} i_{kq} \quad (2.13)$$

Für die Flussverkettungsgleichungen in den Strängen b und c gilt ein analoger Ansatz.

Unter Verwendung der Umrechnung aus dem nachfolgenden Abschnitt 2.2.2 lassen sich die Spannungs- und Verkettungsflussgleichungen in die zugehörigen $dq0$ Komponenten zerlegen.

$$u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q - r_a i_d \quad (2.14)$$

$$u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d - r_a i_q \quad (2.15)$$

$$u_0 = \frac{d\psi_0}{dt} - r_a i_0 \quad (2.16)$$

Aufgrund der Symmetrie der Anordnung von Stator- und Rotorwicklungen ist dieser Verkettungsfluss abhängig von allen Koppelinduktivitäten sowie durchfließenden Strömen innerhalb der Maschine:

$$\psi_d = -(L_{ad} + L_\sigma) i_d + L_{ad} i_{fd} + L_{ad} i_{1d} \quad (2.17)$$

$$\psi_q = -(L_{aq} + L_\sigma) i_q + L_{aq} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} \quad (2.18)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (2.19)$$

Für den Rotorkreis lassen sich in gleicher Weise Gleichungen angeben die das elektrische Verhalten beschreiben

$$u_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + r_{fd} i_{fd} \quad (2.20)$$

$$0 = \frac{d\psi_{1d}}{dt} + r_{1d} i_{1d} \quad (2.21)$$

$$0 = \frac{d\psi_{1q}}{dt} + r_{1q} i_{1q} \quad (2.22)$$

$$0 = \frac{d\psi_{2q}}{dt} + r_{2q} i_{2q} \quad (2.23)$$

mit den zugehörigen Flussgleichungen

$$\psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{f1d} i_{1d} - L_{ad} i_d \quad (2.24)$$

$$\psi_{1d} = L_{f1d} i_{fd} + L_{11d} i_{1d} - L_{ad} i_d \quad (2.25)$$

$$\psi_{1q} = L_{11q} i_{1q} + L_{aq} i_{2q} - L_{aq} i_q \quad (2.26)$$

$$\psi_{2q} = L_{aq} i_{1q} + L_{22q} i_{2q} - L_{aq} i_q \quad (2.27)$$

Zu Abbildung 2.3 können mit Hilfe desselben Ansatzes vier Gleichungen für den Rotorersatzkreis formuliert werden. Gleichung (2.20) beschreibt eine dem Feldkreis entsprechenden Spannung, zusammengesetzt aus dem Ohm'schen Abfall an der Feldwicklung sowie der Rotor selbstinduktion.

Elektrisch erregte Synchrongeneratoren verfügen oft über einen sogenannten Dämpferkäfig. Betriebsfälle, in denen der Rotor dem Statormagnetfeld gegenüber asynchron läuft, sind im Allgemeinen zu vermeiden. Ein Dämpferkäfig ist daher ähnlich aufgebaut wie der Kurzschlussläufer einer Asynchron-Käfigläufermaschine. Im asynchronen Fall wirkt ein mit der Schlupffrequenz rotierendes Feld auf diesen Käfig und induziert eine Spannung. Daraus erzeugen im Kurzschlusskäfig resultierende Ströme wiederum ein elektrisches Moment, das dämpfend auf die Ursache der Asynchronität wirkt. Die elektromagnetischen Folgen dieser Ströme aus Dämpferkäfig und verschiedenen Wirbelstromverlusten werden, aufgetrennt in ihre jeweiligen Komponenten, in den Gleichungen (2.25), (2.26) und (2.27) beschrieben.

Rotationseigenschaften

Abhängig vom momentanen Arbeitspunkt entwickelt ein Synchrongenerator, aufgrund der im Stator fließenden Ströme, ein elektrisches Moment, das im Fall eines Generators bremsend und im Fall eines Motors beschleunigend auf den Rotor wirkt. Beschrieben wird dieses Moment über die sogenannte Luftspaltleistung und lässt sich in $dq\theta$ Komponenten angeben zu:

$$p_e = u_d i_d + u_q i_q + 2 u_0 i_0 \quad (2.28)$$

Im stationären Fall gilt für das Produkt $u_0 \cdot i_0 = 0$ im Nullsystem, womit weiters die Beziehung zwischen Leistung und Moment bei synchroner Drehzahl ω_s zur Momentengleichung führt:

$$p_e = \omega_s m_e \quad (2.29)$$

$$m_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (2.30)$$

Für einen stationären Betrieb muss stets ein Gleichgewicht zwischen antreibendem

und bremsenden Moment vorherrschen, welches auf die Maschine wirkt. Besteht eine Differenz zwischen diesen beiden Größen erfährt der Rotor eine Beschleunigung oder eine Verzögerung, was abhängig vom Vorzeichen der Differenz sowie dem Trägheitsmoment der Welle ist. Dies kann in der mechanischen Gleichung ausgedrückt werden als

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = m_e - m_m \quad (2.31)$$

wobei H für das mechanische Trägheitsmoment, ω_r für die mechanische Winkelgeschwindigkeit in elektrischen rad/s und m_m für das auf die Welle wirkende mechanische Moment des Rotors steht.

2.2.2 Die dq0-Transformation

Der Betriebszustand einer rotierenden Drehfeldmaschine lässt sich sehr anschaulich in der komplexen Ebene als sogenanntes Zeigerdiagramm darstellen. Die für die Funktion fundamentalen elektrischen Größen können ohne großen Aufwand darin abgebildet werden. Ist die Lage der einzelnen Zeiger im Diagramm über ihren Betrag und Phasenlage bekannt, lässt sich mit einem Blick eine Aussage über den Betriebszustand der Maschine treffen, sofern ein stationärer Arbeitspunkt vorliegt. Aus diesem Grund eignet sich die Art der Darstellung von Zuständen in $dq0$ Komponenten besonders gut für die Regelung von elektrischen Maschinen für Generator- und Motorbetrieb.

Rechnet man die einzelnen Komponenten der drei Stränge abc auf die d und q Achsen um, ergeben sich die beiden Ausdrücke:

$$i_d = k_d \left[i_a \cos(\theta) + i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.32)$$

$$i_q = -k_q \left[i_a \sin(\theta) + i_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.33)$$

Die beiden Konstanten k_d und k_q stehen für Korrekturfaktoren zur Anpassung des resultierenden Spitzenwerts, wie noch gezeigt wird. Für symmetrische Betriebsfälle fließen in den drei Strängen die Momentanwerte der Ströme:

$$i_a = \hat{I} \sin(\omega_s t) \quad (2.34)$$

$$i_b = \hat{I} \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.35)$$

$$i_c = \hat{I} \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.36)$$

Diese Beziehungen können nun in die Gleichung 2.32 eingesetzt werden:

$$\begin{aligned}
 i_d &= k_d \left[\hat{I} \sin(\omega_s t) \cos(\theta) + \hat{I} \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \hat{I} \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\
 &= k_d \frac{3}{2} \hat{I} \sin(\omega_s t - \theta)
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

Auf gleiche Weise folgt die Berechnung für die auf i_d orthogonal stehende Komponente i_q mit:

$$i_q = -k_q \frac{3}{2} \hat{I} \cos(\omega_s t - \theta) \tag{2.38}$$

Aus der Bedingung zur Angleichung der Spitzenwerte werden die Werte der Anpassungskonstante k_d und k_q mit $2/3$ gewählt. Zur Vollständigkeit der Dimensionen halber muss eine dritte Komponente als Ergebnis der Transformation existieren. Hierfür wird der Strom im Nullsystem i_0 eingeführt:

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \tag{2.39}$$

Für den Fall eines reinen Mitsystems ergibt die Summe aus den drei Phasenströmen null, womit zugleich kein Nullsystem vorhanden ist.

Die Transformation aus dem Dreiphasensystem abc in ein $dq0$ System lässt sich schließlich anhand einer Matrixdarstellung vereinfachen:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

Zusammen mit der zu Beginn des Kapitels beschriebenen Methodik der Modellierung von elektrischen Systemen mit Hilfe von Zustandsmatrizen bilden diese zwei mathematischen Werkzeuge die Grundlage der in 4.3.2 beschriebenen Entwicklung des Modells eines Synchrongenerators.

2.2.3 Rechnen mit bezogenen Größen

Sowohl in der Regelungstechnik als auch in der Energietechnik hat sich die Verwendung von bezogenen Größen etabliert. Diese Einführung hat dazu beigetragen, den Lösungsweg in Komplexität und Anschaulichkeit stark zu vereinfachen.

Die Idee dahinter besteht darin einzelne Größen auf einen fest definierten Wert, die sogenannte Bezugsgröße, zu beziehen, um dadurch einen Verhältniswert zu erhalten, der es ermöglicht eine anschauliche Aussage über den aktuellen Zustand

des elektrischen Systems zu treffen. Ist man in dieser Wahl der Bezugsgrößen für alle Systeme konsistent, so lassen sich zum Beispiel unterschiedliche physikalische Größen einer Synchronmaschine für konkrete Betriebszustände anschaulich miteinander vergleichen. Es kann somit eine schnelle Aussage über den aktuellen Belastungszustand der Maschine getroffen werden.

Die vom Leistungsschild entnommenen Daten werden oft als Bezugsgrößen herangezogen, da sie gleichzeitig die Bemessungsdaten der Maschine darstellen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom sogenannten p.u. (per Unit) System.

Um die mathematische Sinnhaftigkeit beizubehalten, kann nicht jede Bezugsgröße frei gewählt werden. Es ist zuerst festzulegen, ob auf den Effektivwert oder auf den Spitzenwert der vorkommenden Schwingungen bezogen wird. Grundsätzlich lassen sich für Synchronmaschinen drei unabhängige Bezugsgrößen angeben:

U_B ... Effektivwert der Nennstrangspannung in Volt

I_B ... Effektivwert des Nennstrangstroms in Ampere

f_B ... Nennfrequenz in Herz

Alle weiteren benötigten Größen lassen sich daraus ableiten:

$$\begin{aligned}
 \omega_{e,B} &= 2\pi f_B \\
 \omega_{m,B} &= \omega_{e,B} \left(\frac{2}{p} \right) \\
 Z_B &= \frac{U_B}{I_B} \\
 L_B &= \frac{Z_B}{\omega_{e,B}} \\
 \Psi_B &= L_B I_B = \frac{U_B}{\omega_{e,B}} \\
 S_B &= \sqrt{3} U_B I_B \\
 M_B &= \frac{S_B}{\omega_{m,B}} \\
 H &= \frac{1}{2} \frac{J \omega_{0m}^2}{U_B I_B}
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

Sowohl in Abschnitt 2.2.1 als auch in Abschnitt 2.2.2 wurden bereits bezogene Größen angegeben.

2.3 Generatorerregung mittels Spannungsregler

Jeder Erzeuger, der Energie ins Verbundnetz einspeist, muss sich zu jedem Zeitpunkt in einem stabilen Arbeitspunkt befinden. Der Leistungsfluss im besagten Verbundnetz ist dabei keineswegs konstant. Ständige Zu- und Abschaltungen von Kraftwerken und Lasten führen zu einer ununterbrochenen Anpassung von Erzeugung und Verbrauch. Dabei besteht die Aufgabe des Spannungsreglers, und in weiterer Folge der gesamten Generatorerregung darin, die vorgegebene Regelgröße in bester Näherung konstant zu halten. Abhängig von der Art des Kraftwerks und der jeweiligen Aufgabe zum Beitrag der Netzstabilität kann diese Regelgröße entweder die Netzspannung, die einspeisende Blindleistung oder der Leistungsfaktor der Maschine sein. Alle drei dieser Betriebspunkte müssen vom Spannungsregler beherrscht werden.

Der Großteil aller elektrisch erregten Synchrongeneratoren in Kraftwerken arbeiten im sogenannten Nebenschlussprinzip. Der schematische Grundaufbau ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Da die Feldspannung in den meisten Fällen um ein vielfaches kleiner ist als die Statorspannung wird ein sogenannter Erregertransformator eingesetzt. Dieser ist mit der primären Seite direkt an die Stator клемmen des Generators angeschlossen und versorgt eine Thyristorbrücke in B6 Schaltung an der Sekundärseite. Anhand der Messung von Statorspannungen und Strangströmen berechnet der Spannungsregler den aktuellen Betriebspunkt der Maschine und reagiert mit der Vorgabe des Zündwinkels der Thyristorbrücke. Durch diese Phasenanschnittsteuerung wirkt der Regler direkt auf die Bildung der Feldspannung ein. Auf indirektem Weg wird dadurch der Feldstrom geregelt, worauf hin sich eine resultierende Statorspannung einstellt. Somit schließt sich der Regelkreis wieder schließt.

Befindet sich der Generator im Stillstand, existiert keine Statorspannung mit der man die Feldspannung bilden kann. Es besteht zwar die Möglichkeit einen Synchrongenerator mit Unterstützung von im Eisen verbliebener Remanenzfeldstärke aufzu-erregen, jedoch dauern solche Vorgänge in Normalfall sehr lange. Abhilfe wird durch die sogenannte „Batteriespritze“ geschaffen. Beim Start der Erregerleinrichtung wird eine Gleichspannung aus einer, in den meisten Fällen vorhandenen Kraftwerkshausbatterie an die Feldwicklung angelegt. Dadurch beschleunigt sich der Anstieg des Feldstromes und gleichzeitig der induzierten Spannung in de Stator. Nach Erreichen von ca. 10% bis 20% der Statornennspannung wird die Batterie wieder weggeschaltet und der Auferregungsvorgang stützt sich selbst. Dieser Vorgang ist später bei der Testfallpräsentationen schön zu erkennen.

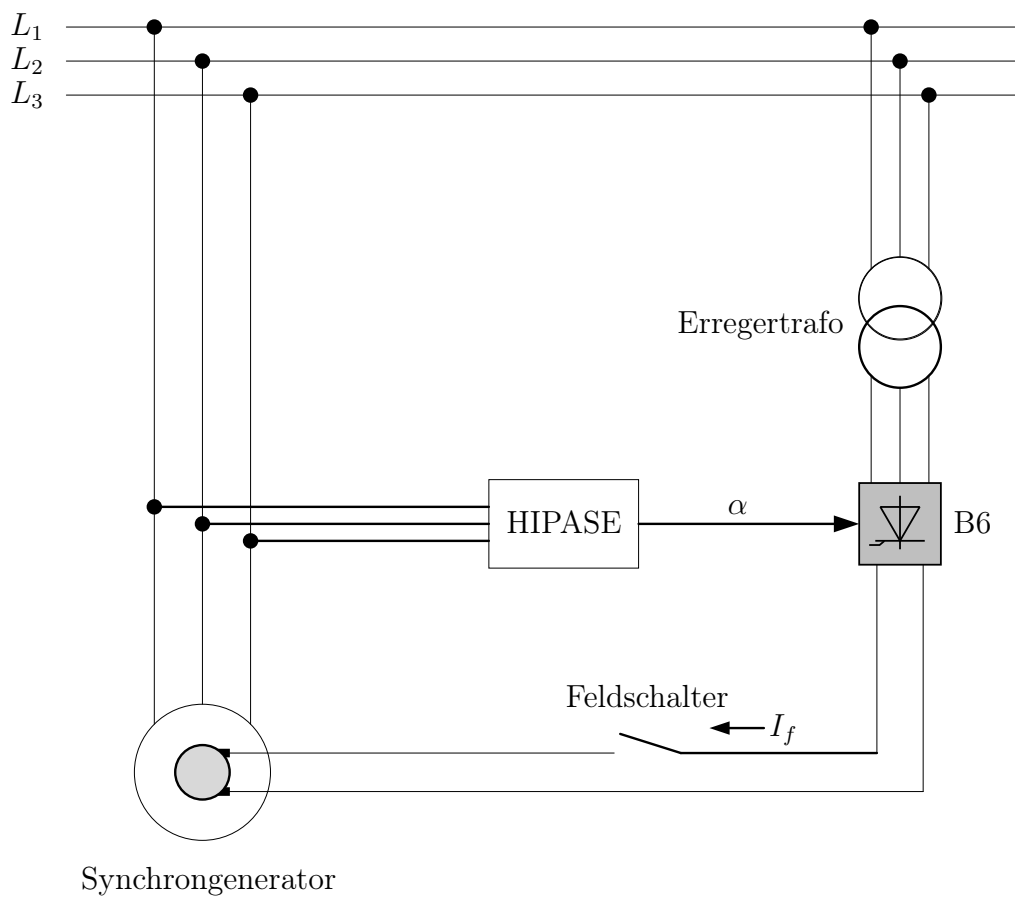


Abbildung 2.4: Schematischer Grundaufbau eines Synchrongenerators im Nebenschluss

Kapitel 3

Analyse der Aufgabenstellung

Vor dem Beginn der Ausarbeitung wurde eine klare Anforderung formuliert. Offene Punkte, die das Ziel dieser Arbeit behandeln, ebenso wie das gewünschte Endergebnis, das erreicht werden soll, wurden seitens der Firma Andritz Hydro GmbH sowie der Technischen Universität formuliert und abgesegnet. Nach Fertigstellung aller Aufgaben soll eine, den Mindestanforderungen entsprechend vollständige Testumgebung für Kraftwerkssystemtechnik betreffend Generatorerregung entstehen.

Im Allgemein lässt sich sagen, dass die Systemtechnik in einem Kraftwerk vier Teilbereiche umfasst. Diese bestehen aus einer elektrischen Schutzeinrichtung, einem System zum Synchronisieren des Generators mit dem Netz, einem Turbinenregler sowie einer Erregungseinheit zur Regelung der Generatorspannung und Blindleistungserzeugung. Die Firma Andritz Hydro hat hierfür eine Produktschiene mit dem Namen HIPASE auf den Markt gebracht, welche in unterschiedlichen Versionen in allen vier Teilbereichen zum Einsatz kommt. Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Testumgebung für die Erregungseinheit mit dem Produktnamen HIPASE-E.

Der Spannungsregler HIPASE-E wird laufend verbessert und weiterentwickelt, weswegen für jede neue Version eine Möglichkeit bestehen muss, diese auf Funktionalität zu überprüfen bevor sie in Betrieb genommen werden kann. Es ist daher gleich zu Beginn festzuhalten, dass es sich hier um eine Ausarbeitung einer Testumgebung handelt mit der es möglich sein soll einen Versionstest für die Applikation und die verwendeten Baugruppen (siehe 3.1.2) durchzuführen, nicht aber ein Testverfahren zur Verifikation der Applikation selbst. Die richtige Funktionsweise des Reglers an sich wird vorausgesetzt.

Damit die Vollständigkeit der benötigten Eigenschaften abgedeckt werden kann, müssen zuerst essentielle Punkte geklärt werden:

- a) Welche Eigenschaften sollen getestet werden?
- b) Unter welchen Bedingungen soll getestet werden?
- c) Welche Mittel sind dafür notwendig?
- d) Welche Ergebnisse erhofft man sich durch diese durchgeführten Tests?

Basierend auf der Durchführung dieser Arbeit zur Erstellung der besagten Testumgebung für einen Spannungsregler für Synchrongeneratoren sind diese Fragen wie folgt zu beantworten:

- zu a) Es gilt den grundsätzlichen Betrieb von Synchrongeneratoren unter Normalbedingungen abzudecken. Alle weiteren Szenarien, die von diesem Grundbetrieb abweichen, gelten als Spezialfälle und stellen keine gültige Anforderung auf Berücksichtigung dar. Als Basis dieser Ausarbeitung wurde die Diplomarbeit[4] von DI Stefan Knieling der Technischen Universität Wien herangezogen, die sich mit der theoretischen Ausarbeitung von Testfällen auseinandersetzt und gleichzeitig eine Mindestanforderung an durchzuführenden Versuchen im Zuge von realen Kraftwerksinbetriebsetzungen definiert.
- zu b) Es gelten ausschließlich reale Bedingungen, wie sie in einem elektrischen Verbundnetz vorkommen. Etwaige Abweichungen, wie etwa drehzahlvariable Arbeitspunkte oder Frequenzsprünge sind nicht Teil der Validierung.
- zu c) Um eine realgetreue Testumgebung zu entwerfen, müssen alle Schnittstellen des HIPASE-E Geräts mit der Kraftwerksumgebung abgedeckt und nachgebildet werden. Dies soll in einer Weise geschehen, für die keine Änderung oder Anpassung der eigentlichen Funktion des HIPASE Geräts erforderlich ist. Die nötigen Signale sollen also mindestens in Form von elektrisch verdrahteten Meldungen oder einer Variante der unterstützten Netzwerkprotokolle erfolgen.
- zu d) Nachdem eine theoretisch ausgearbeitete Arbeit[4] vorliegt die Simulationsergebnisse der Versuche bietet, soll beim abschließenden Vergleich ein nahezu identes Verhalten vom realisierten Gesamtaufbau nachgewiesen werden können. Die Testumgebung soll eine uneingeschränkte Möglichkeit bieten den Spannungsregler in jetziger und aller weiteren Entwicklungsformen unter den hier definierten Bedingungen testen zu können.

3.1 HIPASE-E

Mit der Erregungseinheit HIPASE-E hat die Firma Andritz Hydro einen modernen Spannungsregler auf den Markt gebracht, der alle Aufgaben der Steuerung von Generatoren in Kraftwerken erfüllt. Jedes Kraftwerk unterscheidet sich in den Anforderungen, die zu bewerkstelligen sind. Um einen möglichst großen Teil dieser Anforderungen abzudecken, muss der Spannungsregler an diese Gegebenheiten ohne viel Aufwand angepasst werden können. Die gesamte HIPASE Produktfamilie erfüllt durch ihr Konzept und modulares Design diese Notwendigkeit auf eine sehr einfache und effiziente Weise.

3.1.1 Aufbau



Abbildung 3.1: Produktfoto des Spannungsreglers HIPASE-E Medium

Für den mechanischen Aufbau dient ein Gehäuse in der Ausführung Medium oder Large. Mit einem auf der Vorderseite angebrachten Touchpanel können aktuelle Messwerte abgelesen oder auch Sollwerte vorgegeben werden. Die Rückseite gestaltet sich je nach Anwendung. Aufgeteilt in 10 Slots beim Medium Gehäuse, beziehungsweise 21 Slots beim Large Gehäuse kann eine mehr oder weniger individuelle Zusammenstellung von Baugruppen erfolgen. Als Minimalanforderung muss jedoch immer eine Wandlerbaugruppe zur Messung von Spannungen und Strömen, eine Prozessorbaugruppe zur Abarbeitung der Applikation sowie eine Baugruppe für die Spannungsversorgung und Verarbeitung digitaler Ein- und Ausgangssignale vorhanden sein. Mit Hilfe der eigens entwickelten Software mit dem Namen „HIPASE Engineering Tool“ erfolgt die Programmierung des Geräts für die jeweilige Anwendung.

3.1.2 Schnittstellen des HIPASE-Geräts

Die Aufgabe der Kraftwerksleittechnik besteht darin, einen definierten Arbeitspunkt vorzugeben, unterschiedliche Systeme einzubinden und gleichzeitig einen ständigen Überblick über die Messwerte und den allgemeinen Kraftwerkszustand zu behalten. Eingeteilt in die verschiedenen Baugruppen bietet das HIPASE-E Gerät eine Reihe von unterschiedlichen Schnittstellen nach Außen. Weiters muss der Spannungsregler die Möglichkeit besitzen, Messwerte in analoger und digitaler Form zu erfassen. Dafür stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

Wandlerbaugruppe

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben benötigt ein Regler die Information über den Ist-Zustand, um daraus die Regelabweichung zu bestimmen. Die Wandlerbaugruppe bietet die Möglichkeit durch voneinander entkoppelte Eingänge Spannungen und Ströme zu messen. Da es sich um Generatoren im Leistungsbereich mehrerer Megavoltampere handelt, ist es nötig, die jeweiligen Messgrößen zuerst über sogenannte

Messwandler zu führen. Diese müssen an den Messbereich der Wandlerbaugruppe angepasst werden, der definiert ist zwischen 0 V und 200 V , beziehungsweise zwischen 0 A und 5 A . Über das HIPASE Engineering Tool kann wiederum festgelegt werden ob es sich zum Beispiel um ein Ein- oder Dreiphasen System handelt oder ob zwischen Außenleitern oder gegen den Sternpunkt gemessen wird. Aus diesen Messdaten kann stets auf den Zustand der Maschine rückgerechnet werden und dadurch kann die Vorgabe der Feldspannung erfolgen.

Prozessorbaugruppe

Die Prozessorbaugruppe übernimmt mehrere Aufgaben des Spannungsreglers. In erster Linie wird hier die Applikation der Erregung abgearbeitet. Als zentrale Baugruppe laufen hier alle Messdaten, sowohl analog als auch digital, zusammen und werden während der jeweiligen Taskzyklen abgearbeitet. Nach jedem Zyklusdurchlauf erfolgt die Ausgabe der angepassten Regelgröße sowie die Bereitstellung von Messdaten oder interner Variablen für die Leittechnik oder anderer Systeme. Dafür existieren eigene Schnittstellen, die unterschiedliche Kommunikationsprotokolle unterstützen:

- TCP/IP
- IEC 61850
- IEC 60870-5-103
- IEC 60870-5-104
- Modbus

Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Einkopplung über Lichtwellenleiter.

Applikationsbaugruppe Erregung

Für jede Applikation des HIPASE Geräts gibt es eine eigens dafür entwickelte Baugruppe. In Abbildung 2.4 ist angedeutet, dass die Thyristorbrücke über die Vorgabe des Zündwinkels vom Spannungswandler gesteuert wird. Realisiert wird das über die synchronisierte Ansteuerung der Brücke durch rechteckige Zündimpulse. Die Erzeugung dieser Impulse erfolgt durch die Applikationsbaugruppe mit anschließender Nachschaltung einer Verstärkerstufe.

Im Abschnitt 4.1.4 folgt eine genaue Beschreibung der Feldstrommessung. Zusammen mit der Feldspannung werden beide Größen an den zugehörigen Analogeingängen der Baugruppe erfasst. Zusätzlich bietet sich je nach Anforderung die Möglichkeit, neben weiteren analogen Ein- und Ausgängen auch auf Temperaturmessungen zu erweitern.

Spannungsversorgung und digitale I/Os

Über Sensoren kommen aus dem ganzen Kraftwerk Informationen zusammen die verarbeitet werden müssen. Die Baugruppe die gleichzeitig auch die Spannungsversorgung des gesamten Geräts darstellt bietet die Möglichkeit digitale Eingangssignale auszuwerten sowie eigene digitale Ausgangssignale abzusetzen.

Damit der Regler seinen regulären Betrieb überhaupt aufnehmen kann, müssen stets gewisse Voraussetzungen erfüllt sein, die Informationen über den aktuellen Betriebspunkt enthalten. Bevor die Erregung in den meisten Fällen in Betrieb genommen wird, muss sich der Generator zumindest annähernd auf Nenndrehzahl befinden. Zusätzliche Meldungen, wie Gleichspannungsversorgung in Ordnung, Leistungsschalter Öffnungsmechanismus in Ordnung und weitere, bilden eine Gesamtzahl an Informationen die von Anlage zu Anlage unterschiedlich ist. Rückmeldungen dieser Art erfolgen großteils über digitale Ein- und Ausgänge und werden von der Spannungsversorgungsbaugruppe verarbeitet.

3.1.3 HIPASE-E Funktionalitäten

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, handelt es sich beim HIPASE-E Gerät um einen kaskadierten Regler. Dies bedeutet, dass sich der gesamte Regelkreis auf eine Kaskadenschaltung einzelner Regler aufteilen lässt. Abhängig von der zum Zeitpunkt benötigten Regelung kann zwischen mehreren Betriebsarten ausgewählt werden.

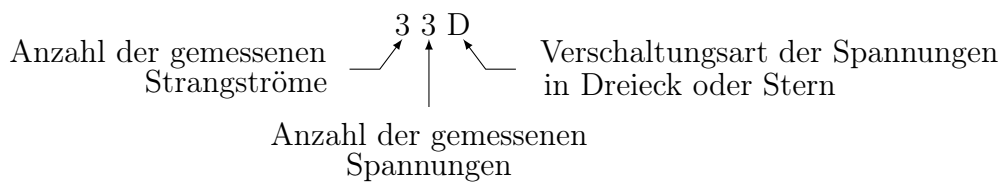
Tabelle 3.1: Betriebsarten der Erregung

Betriebsarten	
Spannungsregelung	Automatikbetrieb
Blindleistungsregelung	
$\cos(\phi)$ Regelung	
Feldstromregelung	Handbetrieb

Im Allgemeinen muss zwischen automatischem Betrieb und Handbetrieb unterschieden werden. Letztendlich laufen alle Regelarten auf die Regelung des Feldstroms hinaus, jedoch lassen sich für die unterschiedlichen Betriebsarten verschiedene Stellgrößen vorgeben. Der Feldstromregler im Handbetrieb dient ausschließlich für Tests, wie bei Inbetriebsetzungen und kann während des regulären Betriebs nicht ausgewählt werden.

Messmethoden

Für die richtige Funktion des HIPASE-E Reglers muss eine ständige Messwertbildung elektrischer Größen der Synchronmaschine erfolgen. Als Mindestanforderung ist die Messung einer Außenleiterspannung und des Statorstroms in einer Phase nötig. Aufgrund anlagenbedingter Unterschiede kann die Anzahl der verfügbaren Messgrößen variieren, weshalb im Gerät zwischen sieben verschiedenen Messmethoden[1] unterschieden wird. Für die Bezeichnung der verwendeten Messmethode ist die folgende Abkürzung definiert:



Als mögliche Messmethoden eignen sich somit:

11D 12D 13D 13Y 32D 33D 33Y

3.2 Analyse der Diplomarbeit von DI Stefan Knieling

Um ein Generatormodell realisieren zu können, muss geklärt werden, welche Fähigkeiten vom Modell überhaupt gefordert werden. Die Beantwortung dieser Fragestellung liefert die Diplomarbeit von DI Stefan Knieling[4], die sich exakt mit dieser Frage beschäftigt hat. Die vorliegende Arbeit ist somit eine Fortsetzung, beziehungsweise eine Umsetzung der von DI Knieling ausgearbeiteten theoretischen Testfälle.

Die Grundlage der Durchführung beider wissenschaftlicher Arbeiten stützt sich auf der Dokumentation der sogenannten Inbetriebsetzungsprotokolle und der Erfahrung der Ingenieure der Andritz Hydro GmbH. Im Zuge einer Inbetriebsetzung der Erregungseinheit eines entweder neu gebauten oder erneuerten Kraftwerk werden verschiedene Testfälle durchgeführt. Dadurch kann in erster Linie die richtige Funktion und damit in weiterer Folge auch die Stabilitätsgrenze des Spannungsreglers untersucht werden. Gegeben durch theoretische Grundlagen, sowie der langjährigen Erfahrung der Firma Andritz, hat sich eine standardisierte Durchführung von Testfällen etabliert. Der Einfachheit halber werden hier nur Testfälle für Generatoren mit statischer Erregung im Nebenschluss betrachtet, weil diese auch den Großteil der realen Betriebszustände darstellen.

3.2.1 Ausarbeitung der Testfälle

Kapitel 4 der Diplomarbeit von DI Stefan Knieling beschäftigt sich mit der Untersuchung typischer Betriebsszenarien eines statischen Erregersystems. Abbildung 2.4 zeigt die schematische Darstellung, auf die in weiterer Folge Bezug genommen wird.

Ingesamt ergeben sich 9 unabhängige Testfälle, die für eine Durchführung von Funktionstests sinnvoll erscheinen. Daraus ergeben sich wiederum die Forderungen an das zu realisierende Generatormodell. Das Verhalten eines Synchrongenerators ist für diese 9 Szenarien so nachzubilden, dass das regelnde System keinen Unterschied zu einer realen Maschine erkennen kann. Die nachfolgende Tabelle enthält die einzelnen Szenarien und referenziert auf den Abschnitt, indem sie behandelt werden.

Tabelle 3.2: Testfalldefinitionen

Abschnitt	Testfall	Seite
5.1.1	Auferregung des Synchrongenerators auf Nennspannung	49
5.1.2	Sollwertsprung der Generatorspannung	51
5.1.3	Eingriff des verzögerten Übererregungsbegrenzers	53
5.1.4	Eingriff des unverzögerten Maximalstrombegrenzers	56
5.1.5	Eingriff des Untererregungsbegrenzers	58
5.1.6	Eingriff des Minimalfeldstrombegrenzers	61
5.1.7	Eingriff des Statorstrombegrenzers	63
5.1.8	Latabwurf auf Eigenbedarf	65
5.1.9	Externer Fehler: 3-poliger Kurzschluss	67

Alle diese Szenarien beschreiben typische Versuche im Zuge einer Inbetriebsetzung eines Kraftwerks. Ist der Spannungsregler während jedem einzelnen dieser Testfälle stabil, kann angenommen werden, dass das System auch im Normalbetrieb stets stabil geregelt werden kann. Wie die einzelnen Tests durchzuführen sind und auf welche Größen und Parameter dabei besonders beachtet werden muss, ist Teil der Validierung und wird in Kapitel 5 behandelt.

3.3 Festlegung der notwendigen Mittel

Zur Realisierung einer Testumgebung gehört zuerst die Festlegung der grundlegenden Mittel, die dafür nötig sind. Der Ansatz aller Überlegungen war, das Verhalten eines Kraftwerks mit allen dafür nötigen Signalen und Messwerten in einer Minimalanwendung nachzubilden. In erster Linie handelt es sich dabei um Signale, die Informationen über vorliegende Betriebszustände bereitstellen. Unabhängig davon muss eine Instanz existieren, die für die Vorgabe dieser Betriebszustände verantwortlich ist. Dieses System übernimmt damit die Aufgabe der Kraftwerksleittechnik.

Gleich zu Beginn der Überlegungen stellte sich die Anforderung der einfachen Bedienbarkeit des gesamten Aufbaus. Die Steuerung soll vollständig über einen zentralen Punkt erfolgen, der zusätzlich die Möglichkeit einer Eingliederung in ein Netzwerk und dadurch einen Fernzugriff ermöglicht. Die einzelnen Anforderungen lassen sich in folgende Aspekte unterteilen:

- Spannungsregler: Das zu testende Objekt HIPASE-E ist so einzubauen, wie es auch in einem realen Kraftwerk Anwendung findet. Dafür müssen zumindest die minimalen Anforderungen an bereitzustellenden Größen für einen regulären Betrieb erfüllt werden.
- Zentrale Bedienstelle: Es muss ein Konzept entwickelt werden, welches es ermöglicht, alle Teilkomponenten direkt anzusprechen, Befehle über Arbeitspunkt, Betriebsverhalten, Regelungsart u.a. entgegenzunehmen und dementsprechend weitere Schritte zu setzen.

- Alle für den Betrieb notwendigen Signale müssen bereitgestellt werden können. Um das System nicht weiter zu beschränken, müssen mindestens alle möglichen digitalen Inputs und Outputs des HIPASE-E Geräts unabhängig voneinander verarbeitet werden können.
- Generatormodell: Es ist ein eigenständiger Aufbau zu realisieren, der die Eigenschaften einer Synchronmaschine nachbildet. Informationen über das aktuell wirkende mechanische Wellenmoment sowie Betrag und Phasenlage der Netzspannung sind zwar über die zentrale Bedienstelle einstellbar, in die Berechnung der physikalischen Nachbildung der Maschine kann jedoch nicht eingegriffen werden, da sie ein in sich geschlossenes System darstellt.
- Feldkreis: Zur Realisierung des Erregerfeldes ist ein realgetreuer Aufbau zu entwickeln, welcher die Verarbeitung der vom Spannungsregler ausgegebenen Pulse zu einer realen Feldspannung ermöglicht. Diese Feldspannung wird dem Generatormodell als reale Eingangsgröße rückgeführt.

Kapitel 4

Aufbau

Die Gestaltung des Aufbaus wurde grundsätzlich durch die zukünftige Anwendung inspiriert. Bestimmt durch die Festlegungen im Abschnitt 3.3 wurden mögliche Betriebsmittel analysiert, aufeinander abgestimmt und schließlich als Gesamtkomposition in einem kompakten Aufbau realisiert. In den folgenden Abschnitten ist die Wahl jedes einzelnen Betriebsmittels angegeben und eine Beschreibung der Umsetzung geforderter Aufgaben dokumentiert.

4.1 Auswahl der Mittel

Testabläufe beschreiben Mechanismen, die entweder manuell in Einzelfolgen durchgeführt, oder als Automatismus nacheinander in vordefinierter Weise abgearbeitet werden. Welche Form zu welchem Zeitpunkt in Frage kommt, ist abhängig von der Art der zu überprüfenden Funktion. Diese Tatsache verlangt daher nach einer flexiblen Gestaltungs- und Ausführungsmöglichkeit besagter Tests.

4.1.1 Raspberry Pi - RPi

Besonders die Realisierung der einfachen und effizienten Bedienbarkeit verlangt nach einer zentralen Kommunikationsstelle welche die Verbindung zwischen der Außenwelt, beziehungsweise dem Benutzer, und dem gesamten Testaufbau herstellt. Gleich zu Beginn stand fest, dass diese zentrale Einheit mehrere Systeme auf unterschiedliche Weise und vor allem auf unterschiedlichen Kommunikationswegen zusammenführen muss. Mit der zusätzlichen Anforderung der Kompaktheit fiel die Wahl auf das single-board Computersystem Raspberry Pi (RPi)¹, welches sich durch simple Erweiterungsmöglichkeit und Gestaltungsfreiraum hervorheben konnte.

Schnittstellen

Aus Sicht des RPi ähnelt das Kommunikationssystem einem Strahlennetz. Jede Einheit kommuniziert mit dem single-board Computersystem, welches in Folge weitere Schritte in der Prozessabarbeitung setzt. In der folgenden Übersicht ist jede Komponente mit der kommuniziert wird sowie die dafür nötige Schnittstelle zusammen-

¹<https://www.raspberrypi.org>

gefasst. Die Beschreibung der jeweiligen Gegenstelle ist in den folgenden Punkten dieses Kapitels enthalten.

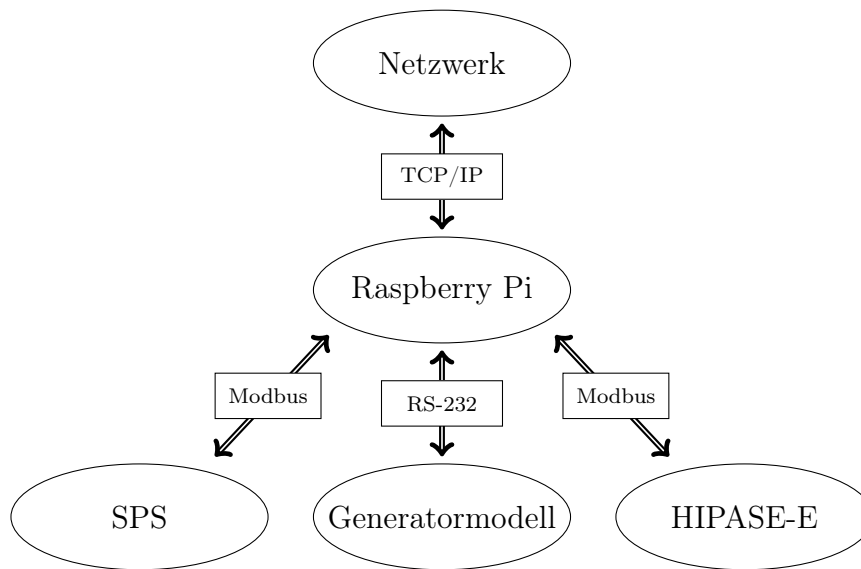


Abbildung 4.1: Kommunikationswege der Systeme mit dem Raspberry Pi

Python3 [®]

Für eine effiziente Abarbeitung aller Aufgaben die dem RPi zukommen, benötigt es eine gemeinsame Basis, die alle verwendeten Kommunikationswege unterstützt. Nachdem der RPi auf einer Debian² basierten Linux³-Distribution läuft, unterstützt es alle gängigen Programmiersprachen. Als besonders für ihre Einfachheit in der Handhabung bekannte scriptbasierte Sprache fiel die Wahl auf Python3⁴, da damit alle Schnittstellen und Kommunikationswege in dasselbe Programm integrierbar und die eventuellen Erweiterungsmöglichkeiten in Richtung einer grafischen Oberfläche sehr einfach realisierbar sind. Sowohl für die Kommunikation über Modbus, RS-232 sowie TCP/IP gibt es bereits vorgefertigte Module, welche sich leicht einbinden und verwalten lassen. Abgesehen von den beiden anderen Kommunikationsarten stellt die serielle Verbindung RS-232 nur eine normierte Übertragungsform dar, die Gestaltung des Informationsflusses bleibt dem Anwender überlassen. Wie diese Verbindung realisiert wurde und wozu sie fähig ist, wird im Abschnitt 4.3 beschrieben.

4.1.2 SPS - Steuerung

Während des Normalbetriebs in einem Kraftwerk werden dem HIPASE-E Gerät stets Meldungen über verschiedene Zustände anderer Betriebsmittel bereitgestellt. So kann der Spannungsregler über vorhandene digitale Eingänge Werte einlesen, wie zum Beispiel die Position des Leistungsschalters, oder Stellbefehle erhalten, die besonders für den Fernbetrieb aus einer Leitzentrale von Bedeutung sind.

Um die Testumgebung so nahe wie möglich an die Realität heranzuführen enthält

²<https://www.debian.org>

³<https://www.linux.org>

⁴<https://www.python.org/>



Abbildung 4.2: Symbolbild des verwendeten single-board Computers Raspberry Pi

der Aufbau eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), dessen Aus- und Eingänge direkt mit denen des HIPASE Geräts verbunden sind. Gesteuert werden diese Ausgänge über ein Modbus fähiges Zusatzmodul, welches die Befehle wiederum durch das auf dem RPi ausgeführte Python Script erhält. Im Zuge der Projektierung wurden dabei benötigte Meldungen an die jeweiligen Ein- und Ausgänge zugewiesen. Tabelle 4.1 zeigt die Mindestanforderung an den zu bereitstellenden Signalen.

Tabelle 4.1: Mindestanforderung der zu bereitstellenden Signale an das HIPASE-Gerät

Bedeutung	HIPASE Variablenname	Datentyp
Überspannungsschutz in Ordnung	SB.crowbar.VOLT.OK	Bool
DC/DC Converter in Ordnung	SB.DC-DCconv.OK	Bool
DC-Versorgung in Ordnung	SB.DC-SPLY.OK	Bool
Drehzahl über 90% erreicht	CB_speed_for_start	Bool

Aufgrund früherer Erfahrungen der Firma Andritz fiel die Auswahl der Steuerung auf die Firma Panasonic⁵ mit der Serie FP-C60P PLC. Bedingt durch die hohe Anzahl an Ein- und Ausgängen des Spannungsreglers waren drei Erweiterungsmodule mit der Bezeichnung E30P nötig. Insgesamt stehen demnach 70 Ausgänge und 80 Eingänge zur Verfügung.

4.1.3 Praktische Ausführung des Generatormodells

Vorab ist hier zu erwähnen, dass in dieser Arbeit die Bezeichnung des Generatormodells sowohl für die realisierte Hardware als auch für das in Punkt 4.3.2 beschriebene Berechnungsmodell steht. Erstes beschreibt die Realisierung des Generators in Form realer physikalische Größen wie, Strom und Spannung, zweites beschreibt ein mathematisches Modell, welches das Verhalten des Generators in Echtzeit nachbildet. Dieser Unterpunkt beschäftigt sich ausschließlich mit der mechanischen

⁵<https://www.panasonic-electric-works.com/eu/fp-x-plc.htm#product-description-Download>



Abbildung 4.3: Symbolbild der verwendeten SPS-Steuerung

Realisierung.

Aus den Überlegungen bezüglich der Modellbildung des Generators erging gleich zu Beginn die Erkenntnis, dass es sich um ein Echtzeitsystem handeln muss. Dies bedeutet, dass für die geforderte Anwendung ein Mikroprozessor mit genügend schneller Zykluszeit die beste Realisierungsmöglichkeit darstellt. Weiters soll ausreichend Speicherplatz und Rechenleistung zur Verfügung stehen um das eigentliche Modell als Quellcode verarbeiten zu können.

Mit der Wahl eines digitalen Signalprozessors (DSP) konnten alle diese Forderungen erfüllt werden. Der DSP von Analog Devices⁶ mit der Bezeichnung AD-SP++ 21369 bietet hierfür 8 analoge Spannungsausgänge und 2 analoge Spannungseingänge. Sechs der acht Spannungsausgänge werden genutzt, um 2 dreiphasen-Spannungssysteme zu erzeugen und dadurch einerseits die Statorspannungen des Generators zu erzeugen und andererseits ein zweites dreiphasen-Spannungssystem zur Verfügung zu haben um für zukünftige Anwendungen eventuell einen zweiten Generator oder das Verbundnetz nachbilden zu können. Die beiden verbleibenden Ausgänge werden zur Bildung des einphasigen Generatorstroms sowie des berechneten Feldstroms verwendet. Der Ausgang für den Generatorstrom wurde hierfür zu einer spannungsgesteuerten Stromquelle umgebaut. Durch Reihenschaltung eines Leistungswiderstandes mit 10Ω kann somit ein Strom von bis zu 1.8 A angelegt werden. Die Ausgabe des Feldstroms wird in Abschnitt 4.1.3 genauer beschrieben. Aus dem Datenblatt des DSP geht eine maximale Ausgangsspannung von 1 V hervor. Für die Messung dieser Spannung durch das HIPASE-E Gerät und der weiteren Bildung der Feldspannung über die B6 Thyristorbrücke ist dieser Wert unzureichend. Als Abhilfe dienen nachgeschaltete Verstärkerendstufen der Firma Hypex

⁶<https://www.analog.com>

Electronics BV⁷ mit denen gleichzeitig eine Leistungssteigerung auf 180 W Ausgangsleistung erzielt werden konnte. Das Datenblatt des Herstellers gibt eine maximale Ausgangsspannung von 18 V Effektivwert bei konstantem Ausgangsstrom von 10 A Effektivwert an. Die Nennspannung der HIPASE-E Messwandler ist mit 100 V angegeben. Um den Messbereich bestmöglich auszunutzen befindet sich hinter jeder Endstufe ein Trafo zur Steigerung der Ausgangsspannung. Das Übertragungsverhältnis soll absichtlich so gewählt werden um einen höheren Wert als die Nennspannung des HIPASE-Geräts zu erreichen. Somit ist gewährleistet, dass eine Überspannung simuliert werden kann, wie sie etwa bei Lastabschaltungsversuchen auftritt. Gewählt wurden einfache Ringkerntransformatoren mit einem Übersetzungsverhältnis von $230\text{ V}/18\text{ V}$

Der Arbeitsbereich ohne Sättigung des Trafoeisenkerns ist gleichbedeutend mit der Klemmenspannung am HIPASE-E Gerät mit:

$$\ddot{u} = \frac{U_{HIPASE}}{U_{Endstufe}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.1)$$

Daraus resultiert der maximale Effektivwert am Ausgang von:

$$U_{HIPASE} = \frac{230}{18} \cdot (0\text{ V} \dots 18\text{ V}) = 0\text{ V} \dots 230\text{ V} \quad (4.2)$$

Der Spannungsregler HIPASE-E wirkt auf das Verhalten einer Synchronmaschine ausschließlich über Vorgabe der Rotorfeldspannung. Im Großteil aller Kraftwerke laufen Synchrongeneratoren im sogenannten Nebenschlussbetrieb. Dabei wird die Klemmenspannung am Stator gleichgerichtet und über Schleifringe an die Feldwicklung am Rotor angelegt. Um die im Betrieb nötige variable Feldspannung zu erzeugen, bedient man sich in den meisten Fällen einer Thyristorbrücke in B6 Schaltung. Der Spannungsregler bildet somit die Feldspannung aus der Vorgabe des Zündwinkels. Das Generatormodell muss daher über eine Möglichkeit verfügen diese resultierende Spannung messen und auswerten zu können. Bei den zwei erwähnten Spannungseingängen des DSP handelt es sich um Stereo-Eingänge für Audiosignale. Abbildung 4.4 zeigt die schaltungstechnische Realisierung eines der beiden Eingänge. Exakt die gleiche Anordnung findet sich auch beim zweiten Eingang des DSP wieder. Audiosignale sind reine Wechselgrößen und haben daher keinen Gleichanteil. Der relevante Anteil der gebildeten Feldspannung über die Thyristorbrücke ist jedoch genau der repräsentative Gleichanteil. Im regulären Betrieb eines Synchrongenerators kann dieser sowohl positiv als auch negativ sein und muss daher bipolar erfasst werden. Um diese Messung zu ermöglichen wurde Abhilfe geschaffen indem bei beiden Kanälen der Serienkondensator $C162$ überbrückt wurde. Zusätzlich wurden die Massepotentiale der beiden Kanäle verbunden und diese erlauben dadurch eine bipolare Erfassung der Feldspannung als Gleichgröße.

⁷<https://www.hypex.nl>

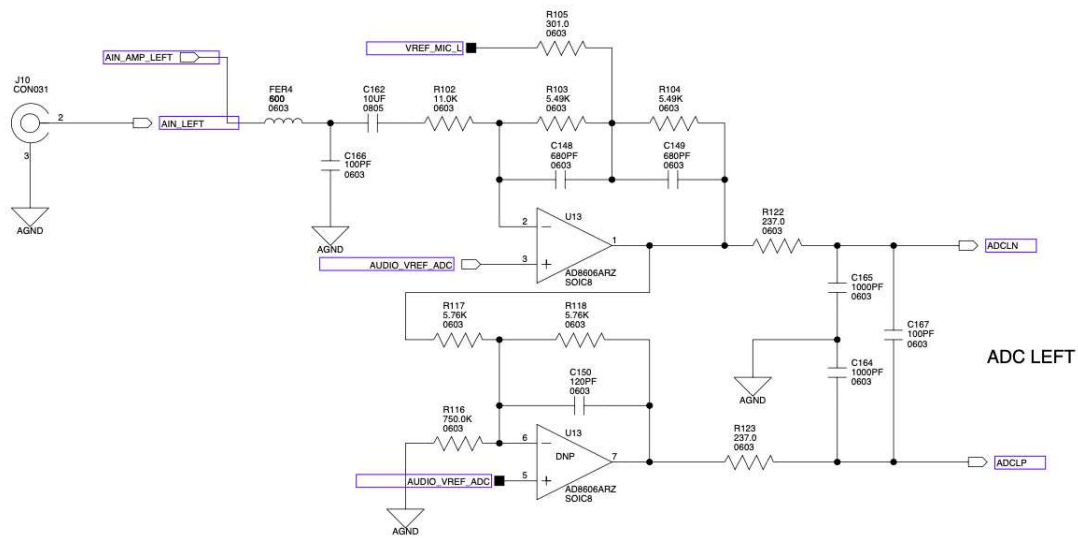


Abbildung 4.4: Spannungseingang zur Messung der Feldspannung

Kommunikation

Im Grunde arbeitet der DSP als vollkommen eigenständiges System. Durch die Messung und Auswertung der aktuellen Feldspannung, die vom Spannungsregler gebildet wird, werden die resultierenden Stranggrößen berechnet und ausgegeben. Für gewisse Arbeitspunkte ist es jedoch von Bedeutung, ob beispielsweise der Leistungsschalter geschlossen ist, oder mit welchem mechanischen Moment die Generatorwelle gerade angetrieben wird. Diese Information muss dem laufenden Quellcode des Modells übermittelt werden. Hierfür ist der RPi als zentrale Kommunikationseinheit zuständig. Wie Abbildung 4.1 bereits gezeigt hat, verfügen sowohl der DSP als auch der RPi über eine serielle Kommunikationsschnittstelle des Typs RS-232, welche für den benötigten Austausch besagter Setzwerte verwendet wird. Für die Übertragung der einzelnen Werte wurde ein eigenes Telegramm erstellt, welches es ermöglicht, verschiedene Datentypen in beide Richtungen zu senden und zusätzlich zur Erkennung von Übertragungsfehlern beiträgt. Die genaue Beschreibung der Realisierung ist dem Punkt 4.3 zu entnehmen.

4.1.4 Nachbildung des Feldkreises

Im Abschnitt 3.1.3 wird ein Überblick über die möglichen Messmethoden des Spannungsreglers gegeben, wie sie in realen Kraftwerken Verwendung finden. Nachdem das realisierte Generatormodell mit acht analogen Ausgängen begrenzt ist und daher der Statorstrom nur in einer Phase ausgegeben werden kann, wurde die Messmethode 13D gewählt. Die Beschaltung ist in Abbildung 4.5 dargestellt und ist ein Auszug aus der Beschreibung von den Systemkomponenten der Erregungsapplikation HIPASE-E[1]. Das Bild zeigt zusätzlich die nötige Beschaltung im Falle einer Querkompensation von parallel laufenden Maschinen, die auf dieselbe Sammelschiene speisen. Da dieser Betrieb zukünftig ebenfalls in den Testumfang aufgenommen werden soll, wurden bei der Realisierung des Modells bereits Vorbereitungen getroffen um dies zu ermöglichen, was aber nicht Teil dieser Arbeit ist

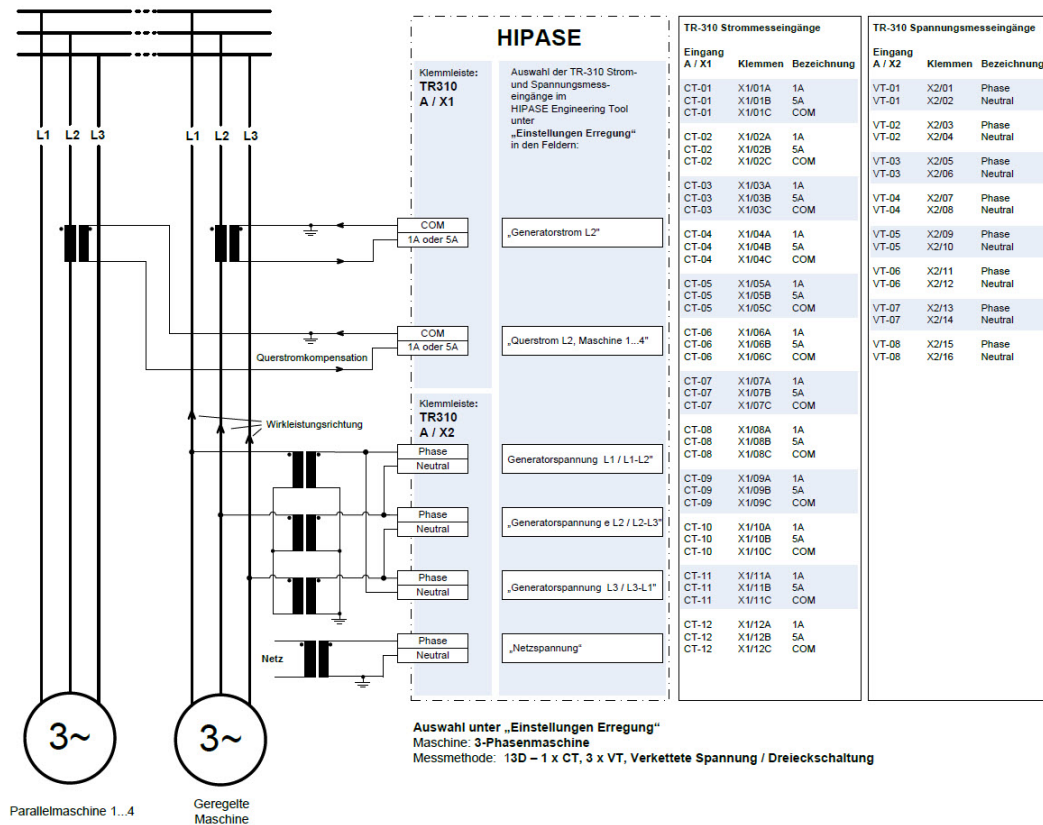


Abbildung 4.5: Anschlusschema der gewählten Messmethode

und daher nicht weiter behandelt wird.

Das HIPSE-E Gerät erwartet also ein dreiphasiges Spannungssystem in Dreieck mit einer Nennspannung von 100 V und einen einphasigen Statorstrom mit einem Nennwert von 1 A . Diese Größen werden, wie in Punkt 4.1.3 bereits angedeutet, vom Generatormodell geliefert. Als Ausgabe liefert der Regler den Zündwinkel für die B6 Thyristorbrücke zur Bildung der Feldspannung, welche wiederum vom Generatormodell gemessen wird. Damit die Feldspannung gebildet werden kann, muss die Thyristorbrücke einen Mindeststrom führen, der über dem charakteristischen Haltestrom der Halbleiterelemente liegt. Die dafür nötige Last setzt sich zusammen aus einer Spule und einem ohmschen Widerstand, über die der Strom getrieben wird. Gleichzeitig kann so die ohmsch-induktive Eigenschaft einer realen Feldwicklung eines Synchrongenerators nachgebildet werden. Befindet sich die Maschine im Leerlauf, so lässt sich die Impedanz im Rotorkreis auch tatsächlich durch eine konstante Induktivität mit ohmschem Anteil beschreiben. Kommt es aber aufgrund von verschiedenen Lastpunkten zu einem Stromfluss im Stator, bewirkt dies einen Einfluss auf die im Feldkreis wirkenden Induktivität. Es kommt die sogenannten Ankerrückwirkung zum Tragen. Ändert sich das Belastungsmoment an der Welle, so ändert sich folglich auch der Polradwinkel zwischen Rotor- und Statorfeld. Der vom Rotor aus gesehene Verkettungsfluss verändert sich sowohl in Betrag und Phase und führt ebenfalls zwingendermaßen zu einer Änderung der wirkenden Induktivität. Der tatsächlich fließende Feldstrom i_f kann nicht mehr über die verwendete Beschaltung mit konstanter Last gebildet werden. Aus diesem Grund wird der Feldstrom im

laufenden Generatormodell des DSP rechnerisch gebildet und ausgegeben. Die verwendete Beschaltung im Leistungskreis dient also ausschließlich dazu, den nötigen Stromfluss über die Thyristorbrücke zu treiben.

Im normalen Regelbetrieb von Synchrongeneratoren kann die Feldspannung ebenfalls negative Werte erlangen. Speziell beim Entregen der Maschine im fehlerfreien Zustand wird eine negative Spannung an den Feldkreis angelegt, um die gespeicherte magnetische Energie schneller abzubauen. Dies ist nur dadurch möglich, da der Rotorkreis stark induktiv wirkt und der Feldstrom nicht sprunghaft verschwinden kann. Er klingt viel mehr exponentiell nach der sogenannten Rotorzeitkonstante ab und zwingt somit die Thyristorbrücke zur Übertragung der negativen Feldspannung. Fällt der Betrag des Feldstroms unter den Haltestrom der Thyristorelemente, sperrt die Brücke und der Feldkreis ist nahezu spannungsfrei. Je nach Verhältnis zwischen Induktivität und Resistanz im Rotorkreis stellt sich folgende charakteristische Rotorzeitkonstante ein:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (4.3)$$

Für den Gesamtaufbau dieser Testumgebung wurde eine Spule mit 20 mH und ein Widerstand mit 10Ω eingebaut. Daraus ergibt sich eine simulierte Rotorzeitkonstante von:

$$\tau = \frac{20\text{ mH}}{10\Omega} = 2\text{ ms} \quad (4.4)$$

Verglichen mit realen Synchrongeneratoren im Megavoltampere Leistungsbereich ist diese Zeitkonstante gering. Für größere Werte müsste entweder die Induktivität der Spule erhöht, oder der Serienwiderstand des Kreises verringert werden. Dies bedeutet aber wiederum einen Anstieg des Stromes und würde zu einer unnötigen Belastung der Bauelemente führen. Nachdem der tatsächliche Feldstrom der Maschine ohnehin im Modell rechnerisch ermittelt und separat vom Modell ausgegeben wird, besteht kein dringender Grund, die Zeitkonstante anzupassen.

Ein weiterer Effekt der bedingt durch die kleine Rotorzeitkonstante auftritt, ist der schnelle Abklingvorgang des fließenden Stromes beim Entregungsvorgang des Spannungsreglers. Bedingt dadurch erlischt die Leitfähigkeit der Thyristorbrücke nahezu unverzüglich beim Anlegen einer Feldspannung von kleiner-gleich 0 V . Diese Eigenschaft hat zur Folge, dass bei dem realisierten Aufbau praktisch keine negative Spannung an die Feldwicklung angelegt werden kann. Ein Entregen mit negativer Spannung kann somit nicht Teil der Testszenarien sein. Abhilfe hierfür kann durch die Modellierung einer synthetischen Thyristorbrücke geschaffen werden. Da dies jedoch einer eher aufwendigen Entwicklung bedarf, wurde bewusst darauf verzichtet und der Kompromiss mit den jetzigen zur Verfügung stehenden Möglichkeiten geschlossen.

Feldstrommessung bei realen Synchronmaschinen

Der Feldstrom einer elektrisch erregten Synchronmaschine kann je nach Größe zwischen einigen Ampere bis hin zu einigen Kiloampere betragen. Da Ströme in dieser Größenordnung nicht einfach ohne weiters messbar sind, nutzt man gewisse Hilfsmittel.

Während des Betriebs eines Synchrongenerators fließt im Rotorkreis ausschließlich Gleichstrom. Als eine der verbreitetsten Methoden findet hier die Messung mittels Hallsensoren die häufigste Anwendung. Dabei sind zwei grundlegende Typen zu unterscheiden:

- I/I - Wandler
- I/U - Wandler

Ersterer bildet den Feldstrom von zumeist Kiloampere auf einen leichter erfassbaren Strom in der Größenordnung von Milliampere ab. Beim I/U - Wandler erfolgt die Umwandlung von Feldstrom auf eine repräsentative Gleichspannung, meist im Bereich von 0 bis 10 V. Die Applikationsbaugruppe aus 3.1.2 verfügt über zwei eigens dafür berücksichtigte Analogeingänge. Je nach vorhandener Messmethode kann zwischen einem Stromeingang von 0 bis 20 mA, oder einem Spannungseingang im Bereich +/- 10 V gewählt werden.

Feldstrommessung bei aktuellem Aufbau

Wie im einleitenden Absatz bereits erwähnt, wird der zum aktuellen Betriebspunkt zugehörige Feldstrom im Modell mathematisch berechnet. Um einer der beiden verfügbaren Messmethoden der Applikationsbaugruppe zu entsprechen, fiel die Entscheidung auf einen I/U - Wandler. Dafür wurde die Beschaltung des achten Ausgangs des DSP auf das in Abbildung 4.6 dargestellte Schema erweitert. Der berechnete Feldstrom wird als reines Sinussignal an den DSP Ausgang gelegt und anschließend über die Endstufe verstärkt (V1). Die nachfolgende Gleichrichtung bildet die für den Analogeingang nötige Gleichspannung, welche anschließend noch über ein Tiefpassfilter erster Ordnung geglättet wird. Der Widerstand (R2) dient zur Strombegrenzung und der Widerstand (R4) dient als Simulation des Innenwiderstands des HIPASE Messeingangs. Bedingt durch die im Allgemeinen sehr hohe Wicklungsinduktivität im Rotor ist der Feldstrom nahezu ideal glatt. Um dieser Eigenschaft so gut es geht zu entsprechen, wurde die Frequenz des Sinussignals auf 1 kHz erhöht, was zu einer besseren Glättung nach der Gleichrichtung führt.

Hilfserregung beim Hochfahren

Generatoren im Nebenschluss benötigen bekanntlich eine Hilfsspannung beim Anfahren aus dem Stillstand um den Aufbau des Erregerfeldes zu beschleunigen. Eine häufige Abhilfe schafft dafür die zumeist vorhandene eigene Hausbatterie des Kraftwerks, so wie im letzten Absatz des Abschnitts 2.3 beschrieben. Diese Anforderung bildet sich auch auf das realisierte Generatormodell ab. Im Normalbetrieb eines Kraftwerks ist die Eigenschaft, dass es sich bei der Hilfsspannungsquelle um eine Batterie, also ein Galvanisches Element, handelt, nicht von Bedeutung. Es ist daher

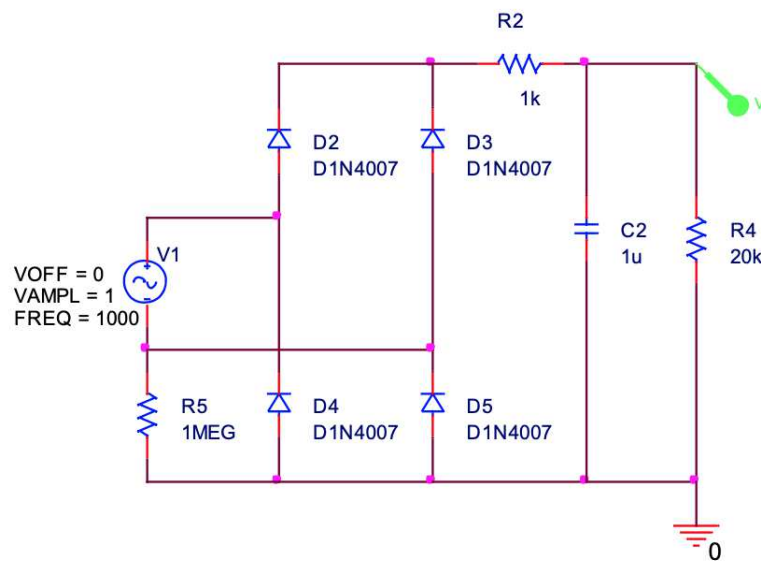


Abbildung 4.6: Zusatzbeschaltung für Feldstrommessung

ausreichend sich einer konstanten Gleichspannungsquelle zu bedienen. Aus diesem Grund verfügt der Aufbau über ein 12 V Netzteil, welches vom Spannungsregler im Zuge des Anfahrbetriebs zu- und wieder weggeschaltet werden kann.

Während der Auferregung einer Synchronmaschine ist die Zuschaltung der Hilfsspannungsquelle am Verlauf der Statorspannung klar zu erkennen. Im Kapitel 5 wird dieses Verhalten im Zuge der Validierung der Testfälle genauer analysiert.

4.2 Beschreibung des mechanischen Gesamtaufbaus

Die Überlegungen bezüglich des Gesamtaufbaus verliefen vorrangig in Richtung einer kompakten Zusammenstellung aller Geräte und nötigen Komponenten in einer mobilen Einheit. Dabei wurde an bereits bestehende Testaufbauten, wie etwa dem Testrahmen für den Turbinenregler und die Synchronisierung, angelehnt. Der Vorgang bei der Erstellung war dem einer typischen Projektierung eines Erregerschanks in konventionellen Kraftwerken ident. In einem erstellten Plansatz wurden alle nötigen Verbindungen zwischen den verwendeten Komponenten eingezeichnet und beschriftet, wodurch gleichzeitig eine Dokumentation des realen Aufbaus geschaffen wurde. Daraus entstand letztendlich ein mobiler Aufbau aus Abbildung B.1.

4.3 Beschreibung einzelner Elemente

4.3.1 Realisierung der seriellen Kommunikation zwischen RPi und DSP

Als Vorbereitung zur Implementierung dieses Kommunikationswegs musste zuerst eine Reihe von Anforderungen erarbeitet werden. Gleich zu Beginn war klar, dass es sich um verschiedene Datentypen handelt, die übertragen werden sollen. Die Information über die Position des Leistungsschalters kann beispielsweise als bool'sche Variable mit zwei Zuständen interpretiert werden, während zum Beispiel das aktu-

elle Turbinenmoment als Gleitkommazahl übertragen werden muss. Weiters besteht die Anforderung, die Korrektheit eines übertragenen Telegramms verifizieren zu können. Aus diesem Grund wurde ein eigenes Protokoll zur Kommunikation zwischen DSP und RPi erstellt. Insgesamt haben sich zwei Telegrammstrukturen, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, etabliert. Allgemein werden bei der Übertragung über eine RS-232 Schnittstelle einzelne Datenpakete mit einer Größe von einem Byte zwischen Sender und Empfänger ausgetauscht. Folglich werden alle Blöcke des Telegramms näher beschrieben.



Abbildung 4.7: Telegrammtypen der seriellen Schnittstelle

- **! - Präambel**

Die Kommunikation zwischen RPi und dem DSP erfolgt in Blöcken mit der festen Größe von einem Byte. Da das gesamte zu übertragende Telegramm jedoch aus mehreren Bytes besteht, muss dieses vor der Übertragung in adäquate Pakete aufgeteilt und vom Sender wieder zu einem Gesamtelegramm zusammengesetzt werden. Nachdem es durchaus zu einer zyklischen Kommunikation ohne erkennbare Sende- und Empfangszeit kommen kann, ist es nötig den Anfang jedes Telegramms eindeutig zu markieren. Hierfür wurde das Rufzeichensymbol als Präambel gewählt. Der Empfänger registriert jedes empfangene Paket, beginnt aber erst dann mit der Auswertung des Telegramms nachdem ein Rufzeichen empfangen wurde. Damit wird ein Übertragungsbeginn eines gültigen Telegramms markiert. Die Codierung von ASCII Symbolen erfolgt mittels UTF-8 Standard, daher ist die Paketgröße der Präambel mit exakt einem Byte festgelegt.

- **CSP - Checksumposition**

Für die Validierung des übertragenen Telegramms dient die sogenannte Checksum Methode. Vor der Übertragung wird eine algebraische Summe aus allen übertragenen Werten, beginnend mit dem OPCODE, erstellt und an einer bestimmten Stelle im Telegramm angehängt und übertragen. Damit der Empfänger eine korrekte Übertragung verifizieren kann, muss die Position der übertragenen Checksum mitgesendet werden. Der Empfänger berechnet eine eigene Checksum mit Hilfe der gleichen Methode aus der Summe aller empfangenen Werte und vergleicht diese danach mit dem Wert der empfangenen Checksum an besagter Stelle. Stimmen diese beiden Werte überein, so ist von einer korrekten Übertragung auszugehen und die empfangenen Werte können

weiterverarbeitet werden. Stimmen beide Werte nicht überein, wird das empfangene Telegramm ignoriert und dem Sender ein Übertragungsfehler mitgeteilt. Die Checksumposition enthält die Position des ersten Blocks der Checksum im Telegramm. Die Checksumposition wird als Integer Wert übertragen und benötigt daher 4 Byte.

- **OPCODE**

Im dritten Teil folgt der sogenannten OPCODE. Dieser sagt aus, um welche Art von Information es sich bei den empfangenen Daten handelt. Enthält das empfangene Telegramm zum Beispiel die Information über die Position des Leistungsschalters, so wird ein eindeutiger OPCODE verwendet, der von allen anderen unterschieden werden kann. Demnach bedeutet die Festlegung eines OPCODEs auch die direkte Information über die verwendete Telegrammstruktur aus Abbildung 4.7. Für den Fall der Leistungsschalterinformation hat der OPCODE den Wert 1 zum Beispiel. Der Einfachheit halber können nur ganzzahlige Werte, beginnend mit 0, verwendet werden. Der daraus resultierende Integer Datentyp benötigt 4 Byte bei der Übertragung.

- **Wert**

Soll ein numerischer Wert über die serielle Schnittstelle an den DSP gesendet werden, so wird dieser immer als Gleitkommazahl des Datentyps Float gesendet. Dies hat den Vorteil, dass bei der Übertragung nicht zwischen mehreren Datentypen unterschieden werden muss. Der Datentyp Float nimmt ebenfalls 4 Byte an Blockgröße ein.

- **Zeit**

Um die Möglichkeit verschiedener Dynamiken in der Änderung der Setzwerte zu bieten, kann ein Zeitparameter mitgesendet werden. Es handelt sich dabei um den Absolutwert der Zeit in Sekunden, in der der vorgegebene Endwert anhand einer linearen Rampe erreicht werden soll. Wird der Wert „0“ empfangen, ändert sich der zugehörige Ausgang sprunghaft. Der DSP berechnet das nötige Inkrement pro Zyklusdurchlauf, um nach der vorgegebenen Zeit den neuen Setzwert zu erreichen. Für die Änderung des bezogenen Turbinenmoments von beispielsweise 0 auf 1 p.u. in 10 Sekunden bedeutet dies ein Inkrement von

$$\Delta T = \frac{T_{Soll} - T_{Ist}}{t_{Soll}} = \frac{1 \text{ p.u.} - 0 \text{ p.u.}}{10 \text{ s}} = 0,1 \frac{\text{p.u.}}{\text{s}} \quad (4.5)$$

was bei einer Abtastfrequenz des DSP von 48 kHz einem Inkrement von

$$\Delta T' = \frac{\Delta T}{f_{Sample}} = \frac{0,1 \frac{p.u.}{s}}{48000 \frac{1}{s}} = 2,083 \cdot 10^{-6} \frac{p.u.}{Sample} \quad (4.6)$$

pro Zyklusdurchlauf gleichkommt.

- **Bitmaske**

Einer der Vorteile des realisierten Hardwareaufbaus des Generatormodells liegt in der individuellen Steuerbarkeit jedes einzelnen Ausgangs. Im Hinblick auf zukünftige Erweiterungen ist diese Eigenschaft besonders attraktiv, da die Simulation von Unsymmetrien in der Belastung oder das Verhalten bei Erd- und Kurzschlüssen in einzelnen Phasen nachgebildet werden kann.

Die mitgesendete Bitmaske kann als „Sieb“ verstanden werden. Jedes einzelne Bit repräsentiert einen der acht analogen Ausgänge. Soll der empfangene Wert beispielsweise auf das Spannungssystem von System 1 wirken, muss die Bitmaske in der Form „11100000“ übertragen werden, um zu signalisieren, dass sich der neue Setzwert auf alle drei Phasen der Generatorspannung auswirkt. Gegeben durch die Anzahl von exakt acht Ausgängen benötigt die Bitmaske eine Größe von 1 Byte.

Spannung						Strom	
System 1			System 2				
L_1	L_2	L_3	L_1	L_2	L_3	I_1	I_2
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7

Abbildung 4.8: Einzelne Bits mit der Zugehörigkeit zu den jeweiligen Kanälen

- **Checksum**

Wie bereits im Abschnitt **Checksumposition** erwähnt wird der Wert der Checksum als letzter Teil des Telegramms übertragen. Er wird gebildet aus der algebraischen Summe aller Werte beginnend mit dem OPCODE und abschließend mit der ins Dezimalsystem umgerechneten Bitmaske. Dabei erfolgt bei Bedarf eine Typumwandlung[3], sogenanntes „Casting“ der Summanden in den Datentyp Float und belegt somit 4 Byte für die Übertragung.

4.3.2 Mathematisches Generatorberechnungsmodell im DSP

Beginnend mit der Entwicklung des Modells sind an dieser Stelle zwei grundlegende Werke zu nennen, mit deren Hilfe die Beschreibung und Realisierung dieser Arbeit erst möglich wurde. In erster Linie stellt das Buch „Power System Stability and Control“ von PRABHA KUNDUR[6] die Grundlage für den Großteil der umgesetzten mathematischen Gleichungen und Modelle dar. Beginnend mit elektrischen

Zusammenhängen des Aufbaus eines Synchrongenerators, bis hin zur Rechnung mit bezogenen Größen und der Darstellungsform in $dq0$ Komponenten bietet dieses Werk eine vollständige Beschreibung von elektrisch erregten Synchronmaschinen. Als zweiter Teil ist ebenfalls die IEEE Norm 1110[2] mit dem Titel „Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses“ zu nennen, die ebenfalls als erweiternde Wissensquelle für die modellierung des in dieser Arbeit beschriebenen Systems diene.

Im einleitenden Kapitel 2.2 wurde bereits ein einfacher Überblick über die grundlegenden Zusammenhänge und mathematischen Gleichungen gegeben. Das Ziel ist es nun, alle elektrischen und mechanischen Eigenschaften physikalisch richtig zusammenzufassen um ein System zu entwickeln, welches in seinem Verhalten dem einer elektrisch erregten Synchronmaschine vollständig entspricht.

Wie in jedem elektrischen System lässt sich auch eine elektrische Maschine repräsentativ aus ohm'schen Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten beschreiben. In der Literatur werden deswegen Größen eingeführt, die dafür unverzichtbar sind. Durch Zuhilfenahme der $dq0$ Transformation aus 2.2.2 lassen sich die einzelnen Komponenten in ihre orthogonalen Wirkungsrichtungen aufspalten. Unter Berücksichtigung aller Streueffekte und Umrechnung der Feldkomponenten des Erregerkreises im Rotor auf Statorgrößen, lassen sich zwei äquivalente vereinfachte Schaltungen konstruieren welche die jeweilige Wirkung der d-Achse (Abb. 4.9) und der q-Achse (Abb. 4.10) beschreiben. Der Statorwiderstand R_S und folglich auch der verursachte Spannungsabfall wurden aufgrund der geringfügigen Wirkung vernachlässigt.

Das Ersatzschaltbild der d-Achse enthält die Induktivität $L_{f1d} - L_{dh}$ im Serienkreis. Diese Induktivität ist ein Maß für die Streuung zwischen dem Dämpferkäfig und der Hauptfeldinduktivität. In weiterer Folge wird diese Komponente vernachlässigt, da die Dämpferwicklung sehr nahe am Luftspalt liegt und der eingefasste Fluss nahezu gleich dem Fluss des Hauptfeldes entspricht.

Für die Berechnungen aller nötigen Komponenten der beiden Ersatzschaltbilder müssen zuerst elementare Zusammenhänge angegeben werden. Eine mathematisch einfache und effiziente Methode bietet die Analyse der beiden Schaltungen durch Laplace-Transformation in den Bildbereich.

Dynamische Vorgänge, wie sie im Betrieb einer Synchronmaschine ständig vorkommen, äußern sich stets in einer Änderung der Flussverteilung in der d- und q-Achse. Vereinfacht man die beiden Ersatzschaltbilder aus Abbildung 4.9 und 4.10 zu einem Gesamtnetzwerk, welches im Fall der d-Achse zusätzlich von der Eingangsgröße u_{fd} abhängig ist, lässt sich das System durch folgende zwei Gleichungen vollständig beschreiben:

$$\Delta\psi_d(s) = G(s)\Delta u_{fd}(s) - L_d(s)\Delta i_d(s) \quad (4.7)$$

$$\Delta\psi_q(s) = -L_q(s)\Delta i_q(s) \quad (4.8)$$

Es existiert also eine Übertragungsfunktion $G(s)$ welche die Statorkomponente des Flusses mit der Feldspannung im Rotor in Verbindung bringt. Gleichzeitig beschreibt $L_d(s)$ die vollständige in d-Richtung wirkende und $L_q(s)$ die vollständige in q-Richtung wirkende Induktivität. Unter Voraussetzung, dass folgende Beziehungen

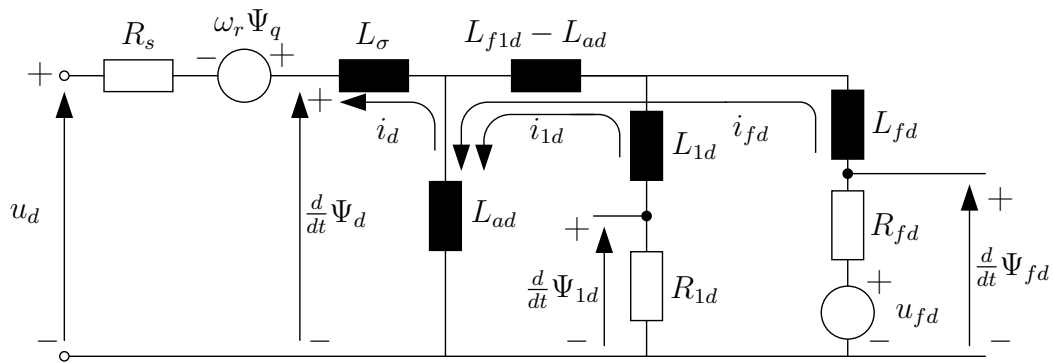


Abbildung 4.9: Äquivalente Schaltung der d-Achse

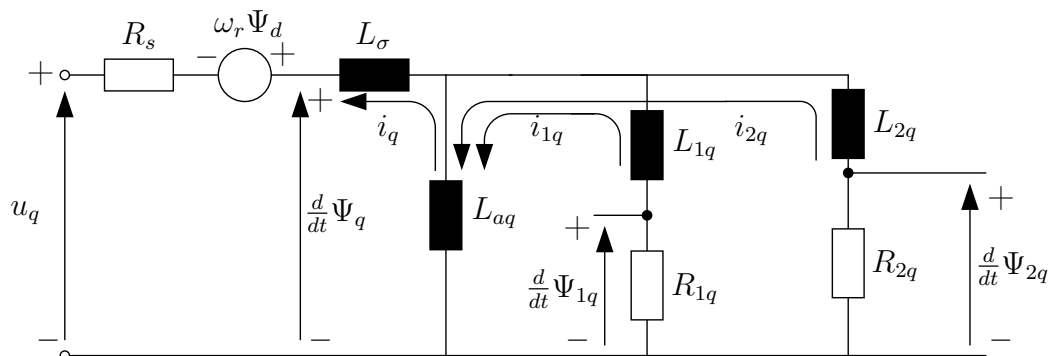


Abbildung 4.10: Äquivalente Schaltung der q-Achse

gelten

$$L_d = L_{ad} + L_\sigma \quad (4.9)$$

$$L_{ffd} = L_{ad} + L_{fd} \quad (4.10)$$

$$L_{11d} = L_{ad} + L_{1d} \quad (4.11)$$

$$L_{11q} = L_{aq} + L_{1q} \quad (4.12)$$

$$L_{22q} = L_{aq} + L_{2q} \quad (4.13)$$

transformieren sich die Gleichungen der d-Achse 2.17, 2.24, 2.25 und 2.27 in den Bildbereich zu:

$$\psi_d(s) = -L_d i_d(s) + L_{ad} i_{fd}(s) + L_{ad} i_{1d}(s) \quad (4.14)$$

$$\psi_{fd}(s) = -L_{ad} i_d(s) + L_{ffd} i_{fd}(s) + L_{ad} i_{1d}(s) \quad (4.15)$$

$$\psi_{1d}(s) = -L_{ad} i_d(s) + L_{ad} i_{fd}(s) + L_{11d} i_{1d}(s) \quad (4.16)$$

$$\psi_{2q}(s) = -L_{aq} i_q(s) + L_{22q} i_{2q}(s) + L_{aq} i_{1q}(s) \quad (4.17)$$

Abschließend fehlen noch die transformierten Rotorspannungsgleichungen um auf die Übertragungsfunktion $G(s)$ umformen zu können:

$$u_{fd}(s) = s\psi_{fd}(s) - \psi_{fd}(0) + R_{fd}i_{fd}(s) \quad (4.18)$$

$$0 = s\psi_{1d}(s) - \psi_{1d}(0) + R_{1d}i_{1d}(s) \quad (4.19)$$

Für den weiteren Vorgang ist es von Vorteil, ausschließlich die Änderung der Rotorspannung zu betrachten und die magnetischen Flüsse durch die Gleichungen 4.14, 4.15 und 4.16 zu ersetzen. Dadurch entfallen die Komponenten der Initialflüsse $\psi_{fd}(0)$ und $\psi_{1d}(0)$ und die beiden Gleichungen ergeben sich zu:

$$\Delta u_{fd}(s) = -sL_{ad}\Delta i_d(s) + (R_{fd} + sL_{ffd})\Delta i_{fd}(s) + sL_{ad}\Delta i_{1d}(s) \quad (4.20)$$

$$0 = -sL_{ad}\Delta i_d(s) + sL_{ad}\Delta i_{fd}(s) + (R_{1d} + sL_{11d})\Delta i_{1d}(s) \quad (4.21)$$

Nun lassen sich zwei Gleichungen für die beiden Ströme $\Delta i_{fd}(s)$ und $\Delta i_{1d}(s)$ formen, die ausschließlich von der Änderung der Feldspannung $\Delta u_{fd}(s)$ und des d-Stroms $\Delta i_d(s)$ abhängig sind:

$$\Delta i_{fd}(s) = \frac{1}{D(s)} [(R_{1d} + sL_{11d})\Delta u_{fd}(s) + sL_{ad}(R_{1d} + sL_{1d})\Delta i_d(s)] \quad (4.22)$$

$$\Delta i_{1d}(s) = \frac{1}{D(s)} [-sL_{ad}\Delta u_{fd}(s) + sL_{ad}(R_{fd} + sL_{fd})\Delta i_d(s)] \quad (4.23)$$

wobei die Beziehung gilt:

$$D(s) = s^2(L_{11d}L_{ffd} - L_{ad}^2) + s(L_{11d}R_{fd} + L_{ffd}R_{1d}) + R_{1d}R_{fd} \quad (4.24)$$

Damit ist die Grundlage geschaffen, die Übertragungsfunktion $G(s)$ des Netzwerks anzugeben. Setzt man die beiden Gleichungen 4.22 und 4.23 unter Verwendung der Beziehungen aus 4.9, 4.10 und 4.12 in die Flussgleichung 4.14 ein, ergibt sich dieselbe Form wie Anfangs in Gleichung 4.7. Durch Koeffizientenvergleich erhält man schließlich die beiden Beziehungen:

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + (T_4 + T_5)s + T_4T_6s^2}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1T_3s^2} \quad (4.25)$$

$$G(s) = G_0 \frac{(1 + sT_{kd})}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1T_3s^2} \quad (4.26)$$

Hier zeigen sich nun die charakteristischen Zeitkonstanten einer Synchronmaschine. In der folgenden Zusammenstellung sind die einzelnen Beziehungen angegeben:

$$\begin{aligned}
G_0 &= \frac{L_{ad}}{R_{fd}} & T_{kd} &= \frac{L_{1d}}{R_{1d}} \\
T_1 &= \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}} & T_2 &= \frac{L_{ad} + L_{1d}}{R_{1d}} \\
T_3 &= \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right) & T_4 &= \frac{1}{R_{fd}} \left(L_{fd} + \frac{L_{ad}L_{\sigma}}{L_{ad} + L_{\sigma}} \right) \\
T_5 &= \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_{\sigma}}{L_{ad} + L_{\sigma}} \right) & T_6 &= \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_{fd}L_{\sigma}}{L_{ad}L_{\sigma} + L_{ad}L_{fd} + L_{fd}L_{\sigma}} \right)
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Sowohl 4.25 als auch 4.26 lassen sich in der faktorisierten Form darstellen:

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \tag{4.28}$$

$$G(s) = G_0 \frac{(1 + sT_{kd})}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \tag{4.29}$$

Diese Beziehung enthält schließlich die, für die weitere Entwicklung des Modells wichtigen, Maschinenparameter der transienten und subtransienten Zeitkonstanten T'_d und T''_d im Kurzschluss.

Ein typisches Datenblatt eines Synchrongenerators enthält in den meisten Fällen folgende charakterische Größen der Maschine:

Tabelle 4.2: Typische Maschinenparameter aus Datenblatt

Symbol	Größe
T'_{d0}	transiente Zeitkonstante der d-Achse im Leerlauf
T''_{d0}	subtransiente Zeitkonstante der d-Achse im Leerlauf
T'_{q0}	transiente Zeitkonstante der q-Achse im Leerlauf
T''_{q0}	subtransiente Zeitkonstante der q-Achse im Leerlauf
L_d	synchrone Induktivität der Längsachse
L'_d	transiente Induktivität der Längsachse
L''_d	subtransiente Induktivität der Längsachse
L_q	synchrone Induktivität der Querachse
L'_q	transiente Induktivität der Querachse
L''_q	subtransiente Induktivität der Querachse
L_{σ}	Statorstreuinduktivität
R_s	Statorwiderstand
H	Masseträgheitsmoment des Rotors

Zumeist werden auch die Werte der Induktivitäten bei Sättigung angegeben. Nachdem in dieser Arbeit Sättigungseffekte aber vollständig vernachlässigt wurden sind diese hier nicht von Bedeutung.

Für die Simulation der Ersatzschaltbilder der d- und q-Achse werden jedoch weitere Maschinenparameter benötigt. Die Beziehungen aus 4.27 lassen sich allesamt so weit umformen, sodass lediglich die Werte für die in der Tabelle 4.2 dargestellten Größen ausreichen.

Um die Berechnungen zu vereinfachen, kann eine weitere Annahme getroffen werden. Der Wert von R_{1d} ist typisch um ein Vielfaches größer als der Wert von R_{fd} , was wiederum dazu führt, dass T_2 und T_3 um ein Vielfaches kleiner sind als T_1 und T_6 um ein vielfaches kleiner sind als T_4 . Daher kann im Koeffizientenvergleich zwischen 4.28 mit 4.25 folgende Näherung verwendet werden:

$$\begin{aligned} T'_{d0} &\approx T_1 \\ T''_{d0} &\approx T_3 \\ T'_d &\approx T_4 \\ T''_d &\approx T_6 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Nun sollen alle noch fehlenden Beziehungen, die für die Berechnung des Modells nötig sind, hergeleitet werden.

Untersucht man Gleichung 4.28 bezüglich möglicher auftretender Betriebsfälle, lassen sich alle drei benötigten Längsinduktivitäten berechnen. Im stationären Zustand geht die Laplace-Variable s gegen Null und liefert die erste Lösung der Gleichung. Für schnelle transiente Vorgänge, wie beispielsweise im Falle von Lastsprüngen, geht sich die Laplace-Variable s gegen unendlich. Die Lösung der Gleichung liefert damit den Wert der subtransienten Längsinduktivität L''_d . Bei Nichtberücksichtigung des Einflusses eines Dämpferkäfigs errechnet sich mit derselben Methodik die Größe der transienten Längsinduktivität L'_d .

$$\begin{aligned} L_d &= L_d(0) \\ L'_d &= L_d(\infty) = L_d \left(\frac{T'_d}{T'_{d0}} \right) \\ L''_d &= L_d(\infty) = L_d \left(\frac{T'_d T''_d}{T'_{d0} T''_{d0}} \right) \end{aligned} \tag{4.31}$$

Nach Einsetzen der bekannten Größen aus Tabelle 4.2 lassen sich durch diese drei Beziehungen die transiente und die subtransiente Zeitkonstante T'_d und T''_d berechnen. Durch nachfolgendes Einsetzen der Zeitkonstanten aus 4.27, beziehungsweise 4.31 werden die beiden Induktivitäten mit Hilfe der Koppel-, Haupt- und Streuinduktivität ausgedrückt:

$$L'_d = L_\sigma + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \quad (4.32)$$

$$L''_d = L_\sigma + \frac{L_{ad}L_{fd}L_{1d}}{L_{ad}L_{fd} + L_{ad}L_{1d} + L_{fd}L_{1d}} \quad (4.33)$$

Für den in d-Richtung wirksamen Widerstand R_{fd} des Feldkreises kann T_1 aus 4.27 auf L_{fd} umgeformt und in T_4 eingesetzt werden. Mit Hilfe von 4.9 erhält man:

$$R_{fd} = \frac{1}{T'_{d0}} \frac{(L_d - L_\sigma)^2}{(L_d - L'_d)} \quad (4.34)$$

Für die Berechnung von L_{1d} reicht es, 4.33 auf L_{fd} umzuformen und unter Verwendung von 4.9 in 4.32 einzusetzen:

$$L_{1d} = \frac{(L'_d - L_\sigma)(L''_d - L_\sigma)}{(L'_d - L''_d)} \quad (4.35)$$

Die Induktivität L_{fd} des Feldkreises kann direkt über Umformen der Gleichung 4.32 berechnet werden:

$$L_{fd} = \frac{(L_d - L_\sigma)(L'_d - L_\sigma)}{(L_d - L'_d)} \quad (4.36)$$

Als letzte Größe der d-Achse fehlt noch der Widerstand R_{1d} . Hierfür bietet sich die Gleichung für T_3 aus 4.27 an, unter Zuhilfenahme der bereits umgeformten Gleichungen für L_{1d} und L_{fd} :

$$R_{1d} = \frac{1}{T''_{d0}} \frac{(L'_d - L_\sigma)^2}{(L'_d - L''_d)} \quad (4.37)$$

Für die Berechnungen der in q-Richtung wirksamen Größen wird ähnlich vorgegangen. Aus 4.8 lässt sich auf gleiche Weise wie für $L_d(s)$ durch Koeffizientenvergleich eine Gleichung für $L_q(s)$ im Laplace Bildbereich angeben:

$$L_q(s) = L_q \frac{(1 + sT'_q)(1 + sT''_q)}{(1 + sT'_{q0})(1 + sT''_{q0})} \quad (4.38)$$

Folglich sind nur die Ergebnisse der umgeformten Gleichungen zusammengefasst:

$$\begin{aligned}
L'_q &= L_q \left(\frac{T'_q}{T'_{q0}} \right) & L''_q &= L_q \left(\frac{T'_q T''_q}{T'_{q0} T''_{q0}} \right) \\
L'_q &= L_\sigma + \frac{L_{aq} L_{1q}}{L_{aq} + L_{1q}} & L''_q &= L_\sigma + \frac{L_{aq} L_{1q} L_{2q}}{L_{aq} L_{1q} + L_{aq} L_{2q} + L_{1q} L_{2q}} \\
L_{1q} &= \frac{(L_q - L_\sigma)(L'_q - L_\sigma)}{(L_q - L'_q)} & L_{2q} &= \frac{(L'_q - L_\sigma)(L''_q - L_\sigma)}{(L'_q - L''_q)} \\
R_{1q} &= \frac{1}{T'_q} \frac{(L_q - L_\sigma)^2}{(L_q - L'_q)} & R_{2q} &= \frac{1}{T''_{q0}} \frac{(L'_q - L_\sigma)^2}{(L'_q - L''_q)}
\end{aligned} \tag{4.39}$$

Modellierung des dynamischen Verhaltens

Einleitend in 2.2 wurde bereits die Modellierung elektrischer Systeme allgemein beschrieben. In diesem Abschnitt soll nun das vorbereitete Berechnungsmodell eines Synchrongenerators in ein dynamisches Modell eingearbeitet werden.

Ausgehend von Gleichung 2.1 müssen die einzelnen Komponenten definiert werden. Der mit x bezeichnete Vektor repräsentiert die Zustandsgrößen des Systems. In dem entwickelten Modell handelt es sich um die magnetischen Flüsse im Rotorkreis aus den Gleichungen 2.24, 2.25, 2.26, 2.27. Durch Umformen und Einsetzen der Rotorspannungsgleichungen 2.20, 2.21, 2.22, 2.23 in die Rotorflussgleichungen können vier unabhängige Gleichungen erstellt werden die folgender Form entsprechen:

$$\begin{pmatrix} \dot{\psi}_{fd} \\ \dot{\psi}_{1d} \\ \dot{\psi}_{1q} \\ \dot{\psi}_{2q} \end{pmatrix} = A^{(4 \times 4)} \begin{pmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \\ \psi_{2q} \end{pmatrix} + B_1^{(4 \times 2)} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + B_2^{(4 \times 1)} \cdot u_{fd} \tag{4.40}$$

Mit den Matrizen A , B_1 und B_2 und deren Elementen:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \tag{4.41}$$

$$\begin{aligned}
a_{11} &= -\frac{R_{fd}(L_{ad} + L_{1d})}{L_{ad}L_{1d} + L_{ad}L_{fd} + L_{1d}L_{fd}} & a_{12} &= \frac{R_{fd}(L_{ad} + L_{1d})}{L_{ad}L_{1d} + L_{ad}L_{fd} + L_{1d}L_{fd}} \\
a_{21} &= \frac{R_{1d}L_{ad}}{L_{ad}L_{1d} + L_{ad}L_{fd} + L_{1d}L_{fd}} & a_{22} &= -\frac{R_{1d}(L_{ad} + L_{fd})}{L_{ad}L_{1d} + L_{ad}L_{fd} + L_{1d}L_{fd}} \\
a_{33} &= -\frac{R_{1q}(L_{2q} + L_{aq})}{L_{1q}L_{2q} + L_{1q}L_{aq} + L_{2q}L_{aq}} & a_{34} &= \frac{R_{1q}L_{aq}}{L_{1q}L_{2q} + L_{1q}L_{aq} + L_{2q}L_{aq}} \\
a_{43} &= \frac{R_{2q}L_{aq}}{L_{1q}L_{2q} + L_{1q}L_{aq} + L_{2q}L_{aq}} & a_{44} &= -\frac{R_{2q}*(L_{1q} + L_{aq})}{L_{1q}L_{2q} + L_{1q}L_{aq} + L_{2q}L_{aq}}
\end{aligned}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & 0 \\ 0 & b_{32} \\ 0 & b_{42} \end{pmatrix} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned}
b_{11} &= -\frac{R_{fd}L_{1d}L_{ad}}{L_{ad}L_{1d} + L_{ad}L_{fd} + L_{1d}L_{fd}} & b_{21} &= -\frac{R_{1d}L_{ad}L_{fd}}{L_{ad}L_{1d} + L_{ad}L_{fd} + L_{1d}L_{fd}} \\
b_{32} &= -\frac{R_{1q}L_{2q}L_{aq}}{L_{1q}L_{2q} + L_{1q}L_{aq} + L_{2q}L_{aq}} & b_{42} &= -\frac{R_{2q}L_{1q}L_{aq}}{L_{1q}L_{2q} + L_{1q}L_{aq} + L_{2q}L_{aq}}
\end{aligned}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} \frac{R_{fd}}{L_{ad}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

Für die zeitdiskrete Anwendung müssen die drei Matrizen anschließend über Beziehung 2.5 umgerechnet werden.

Der nächste Schritt folgt aus der Aufstellung der Zusammenhänge für die Ausgangsgleichung. Über 2.1 müssen wiederum die Matrizen C_1 und D_1 gesucht werden. Hierfür wird der Ausgangsvektor y als der magnetische Fluss des Stators in d- und in q-Richtung definiert. Basierend auf den Gleichungen 2.17 und 2.18 kann auf gleiche Art und Weise folgendes Gleichungssystem angegeben werden:

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{23} & c_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \\ \psi_{2q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{11} & 0 \\ 0 & d_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

Die berechneten Elemente der Matrizen ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{L_{1d} L_{ad}}{L_{ad} L_{1d} + L_{ad} L_{fd} + L_{1d} L_{fd}} & c_{12} &= \frac{L_{fd} L_{ad}}{L_{ad} L_{1d} + L_{ad} L_{fd} + L_{1d} L_{fd}} \\ c_{23} &= \frac{L_{2q} L_{aq}}{L_{1q} L_{2q} + L_{1q} L_{aq} + L_{2q} L_{aq}} & c_{24} &= \frac{L_{1q} L_{aq}}{L_{1q} L_{2q} + L_{1q} L_{aq} + L_{2q} L_{aq}} \\ d_{11} &= \frac{L_{ad}^2 (L_{1d} + L_{fd})}{L_{ad} L_{1d} + L_{ad} L_{fd} + L_{1d} L_{fd}} - L_{\sigma} - L_{ad} \\ d_{22} &= \frac{L_{aq}^2 (L_{1q} + L_{2q})}{L_{1q} L_{2q} + L_{1q} L_{aq} + L_{2q} L_{aq}} - L_{\sigma} - L_{aq} \end{aligned}$$

Mit Hilfe der Beziehung aus den Gleichungen 2.14 und 2.15 kann nun die resultierende Statorspannung berechnet werden. Vernachlässigt man die transiente Komponente und nimmt aus vereinfachenden Gründen zu jedem Zeitpunkt eine konstante Drehzahl $\omega_r = 1$ an, folgt:

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

Wie in den Gleichungen bis jetzt gezeigt, sind die aktuellen Werte für den Statorstrom für die Berechnung der Statorspannung relevant. Das Modell schließt sich somit zu einer kohärenten Schleife.

Für den Statorstrom sind zwei Betriebsfälle relevant. Bei geschlossenem Leistungsschalter ist der Generator mit dem Netz verbunden, wodurch erst ein Stromfluss ermöglicht wird. Ist der Leistungsschalter geöffnet, befindet sich der Generator im Leerlauf und der Statorstrom ist zu jedem Zeitpunkt null.

Im Netzbetrieb ist also ebenfalls die Belastungseigenschaft des Verbundnetztes zu berücksichtigen. Für einfache Modelle kann das Verhalten über vier zusätzliche Parameter nachgebildet werden. Bedingt durch die ohmsch-induktive Charakteristik fließen bei geschlossenem Leistungsschalter die Werte R_N und L_N für die Berücksichtigung der Übertragungsleitungen in die Berechnung mit ein. Mit dem Einführen der Netzspannung U_N und dem zugehörigen Phasenwinkel φ_N gegenüber

der Generatorspannung können Schwankungen in Betrag und Winkel simuliert werden.

Als zweiter Einfluss auf den Statorstrom muss die Masseträgheit des Rotors mitberücksichtigt werden. Veränderungen des absoluten Werts, von dem auf die Welle ausgeübten Moments, bedingt sowohl durch Änderungen des Turbinenmoments als auch des Belastungsmoments durch das Verbundnetz, resultieren in einer Veränderung des Polradwinkels ϑ . In der Realität wirken hier Turbinen- und Spannungsregler zusammen. Es besteht zwar die Möglichkeit einer Vorgabe des Turbinenmoments an das Generatormodell, jedoch ist die aktive Regelung nicht Teil dieser Arbeit. In den folgenden Versuchen, die durchgeführt wurden, erfolgte die Momentenvorgabe ausschließlich zum Erreichen des benötigten Arbeitspunktes und ist im weiteren Verlauf der Versuche keine Regelgröße.

Für die Modellierung ist es nötig, einen Zusammenhang zwischen Unterschieden im Drehmoment und der daraus resultierenden Änderung des Polradwinkels herzustellen. Hierfür gilt folgende Beziehung

$$\begin{aligned}\vartheta &= \omega_r t - \omega_e t + \vartheta_0 \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \omega_r - \omega_e\end{aligned}\quad (4.46)$$

wobei ω_r für die mechanische (Rotor) und ω_e für die elektrische (Stator) Winkelgeschwindigkeit steht.

Nach Zeitdiskretisierung und Einsetzen der Gleichung 2.31 folgt schließlich der Ausdruck für den Polradwinkel

$$\vartheta_{k+1} = \vartheta_k + \left(\frac{m_m - m_e}{2H} T_S + \omega_k \right) \omega_{e,B} T_S \quad (4.47)$$

Nun gilt es, die Wirkung der Netzspannung auf die Bildung des Statorstroms in Abhängigkeit dieses Polradwinkels zu untersuchen.

Vernachlässigt man wieder den transienten Term der beiden Gleichungen 2.14 und 2.15 und setzt für ψ_d und ψ_q Ausdrücke ein, die ausschließlich von i_d und i_q abhängig sind, erhält man eine Gleichung der Form

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = Z_G^{-1(2 \times 2)} \begin{pmatrix} u_d - u_{N,d} \\ u_q - u_{N,q} \end{pmatrix} \quad (4.48)$$

Die d- und q- Komponente der Netzspannung u_N kann mit Hilfe von 4.47 durch Koordinatentransformation berechnet werden,

$$\begin{pmatrix} u_{N,d} \\ u_{N,q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_N \cos(\varphi_N) \sin(\vartheta_{k+1}) + U_N \sin(\varphi_N) \cos(\vartheta_{k+1}) \\ U_N \cos(\varphi_N) \cos(\vartheta_{k+1}) - U_N \sin(\varphi_N) \sin(\vartheta_{k+1}) \end{pmatrix} \quad (4.49)$$

Für die Impedanzmatrix Z_G ergeben sich folgende Elemente:

$$\begin{aligned} z_{11} &= R_N + R_S & z_{12} &= L_N + L_\sigma + L_{aq} - \frac{L_{aq}^2 (L_{1q} + L_{2q})}{L_{1q} L_{2q} + L_{1q} L_{aq} + L_{2q} L_{aq}} \\ z_{21} &= L_N + L_\sigma + L_{ad} - \frac{L_{ad}^2 (L_{1d} + L_{fd})}{(L_{1d} L_{ad} + L_{1d} L_{fd} + L_{ad} L_{fd})} & z_{22} &= R_N + R_S \end{aligned}$$

Die Inverse der Matrix wurde numerisch durch Einsetzen der Werte gelöst.

Als abschließender Teil des erstellten Generatormodells soll auf gleiche Weise noch der Feldstrom i_f berechnet werden. Mit Hilfe desselben Ansatzes wie in 4.44 ergibt sich der Zusammenhang

$$i_f = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \\ \psi_{2q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{11} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

mit den Elementen der Matrix C_2 und D_2

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{L_{1d} + L_{ad}}{L_{1d} L_{ad} + L_{1d} L_{fd} + L_{ad} L_{fd}} & c_{12} &= -\frac{L_{ad}}{L_{1d} L_{ad} + L_{1d} L_{fd} + L_{ad} L_{fd}} \\ d_{11} &= \frac{L_{1d} L_{ad}}{L_{1d} L_{ad} + L_{1d} L_{fd} + L_{ad} L_{fd}} \end{aligned}$$

Die Berechnung des Generatormodells ist damit vollständig. Im Zuge der Ausarbeitung wurde das Verhalten mit der Software SIMULINK® nachgestellt. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau dieser Modellierung.

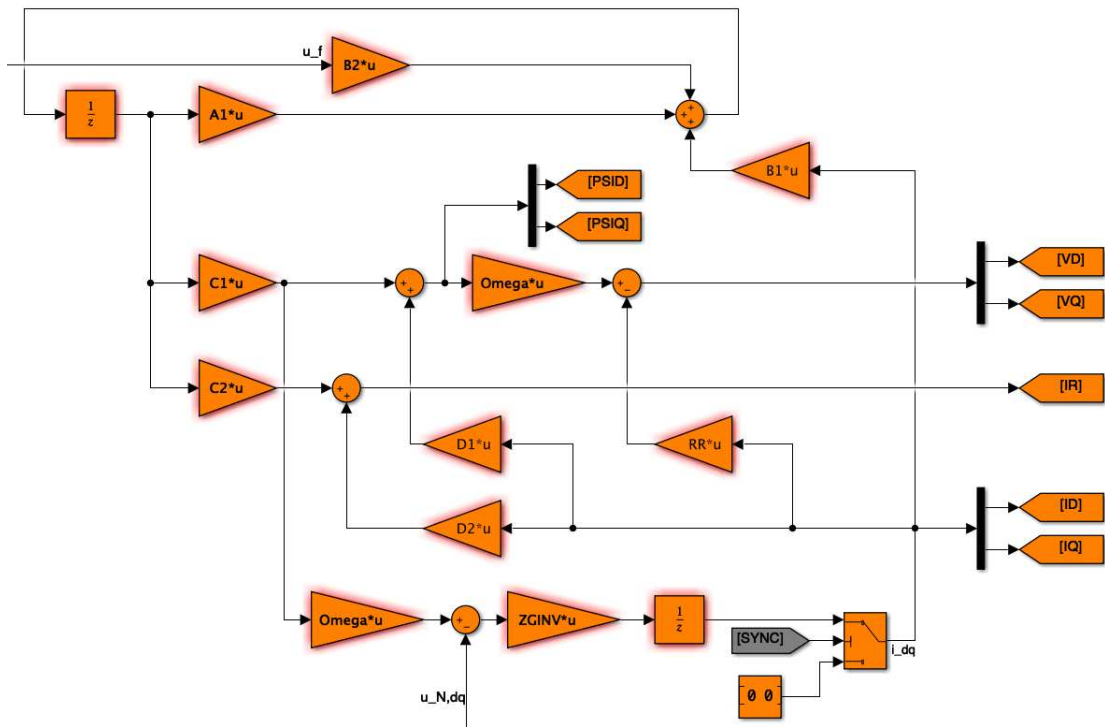


Abbildung 4.11: Erzeugte Simulation in SIMULINK®

Kapitel 5

Testfälle und Validierung

Jedes Ergebnis einer Untersuchung muss unter den Anforderungen genügender Genauigkeit analysiert werden um die Korrektheit der Durchführung und insbesondere die Richtigkeit der Funktion bestätigen zu können. Mit der Diplomarbeit von DI Stefan Knieling[4] steht eine ausgearbeitete und wissenschaftlich anerkannte Arbeit zur Verfügung. Anhand dieser Tatsache soll hier die Bestätigung der Richtigkeit der in dieser Arbeit beschriebenen Durchführung von Testfällen, durch einen Ergebnisvergleich erbracht werden. Die folgenden Abschnitte widmen sich dieser Validierung.

5.1 Definition und Realisierung der Testfälle

Primär muss geklärt werden, wie ein Testfall im Allgemeinen definiert sein muss um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Als bestes Beispiel gilt hier der reguläre Betrieb einer Synchronmaschine im Kraftwerk. Die in Tabelle 3.2 angeführten Testfälle gehen alle im Grunde aus einer Vielzahl an Inbetriebnahmeprotokollen hervor und stellen Grenzfälle dar, die ein Spannungsregler im Betrieb beherrschen muss. Die Definition eines Testfalls setzt sich folglich zusammen aus:

- der Menge aller zu erfüllenden Vorbedingungen
- der Menge aller Befehle zum Erreichen des Startpunktes
- der Menge aller Befehle zur Durchführung des Testfalls
- der Aufzeichnung und Auswertung aller relevanten Größen und Werte
- der Menge aller zu erfüllenden Nachbedingungen

Die Vorbedingungen sind für alle Abläufe gleich. Im Abschnitt 4.1.2 wurde bereits die Mindestanforderung an Befehlen erwähnt, die benötigt werden, damit der Spannungsregler in den Betriebszustand „Bereit“ wechselt. Erst danach können weitere Schritte gesetzt werden um den Startpunkt zu erreichen.

Alle nötigen Befehle werden mittels eines vorbereiteten Python Scripts abgearbeitet. Da die Betriebspunkte zwischen den Testfällen variieren, enthält das Script für jeden Fall eine eigene Sequenz. Vor jeder Ergebnisdarstellung und Interpretation werden kurz die nötigen Schritte angegeben, welche die Vorbedingungen erfüllen.

5.1.1 Auferregung des Synchrongenerators auf Nennspannung

Die Auferregung des Generators auf Nennspannung ist in der Sequenz der Inbetriebnahme der erste Schritt beim Aktivieren eines Spannungsreglers. Die Maschine befindet sich bereits auf Nenndrehzahl, was einen regulären Betrieb des Turbinenreglers voraussetzt. Der Befehl „Erregung EIN“ führt zu einer Abarbeitung einzelner Schritte und muss mit Hilfe der laufenden Testumgebung exakt nachgestellt werden. Die Abhandlung dieses Ablaufes ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Für alle weiteren Testfälle stellt die Auferregung auf Nennspannung eine der Vorbedingungen dar.

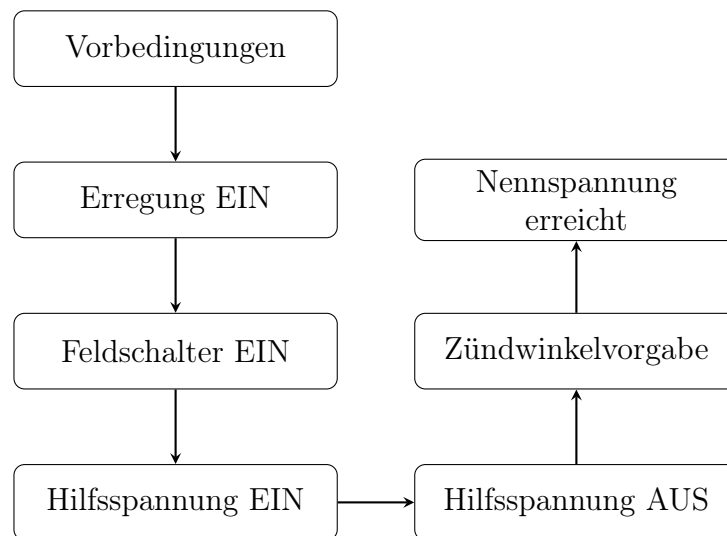


Abbildung 5.1: Ablaufdiagramm für Auferregungsvorgang

Als Ergebnis wird eine Steigerung der Generatorspannung laut vorgegebener Rampe in bester Näherung erwartet.

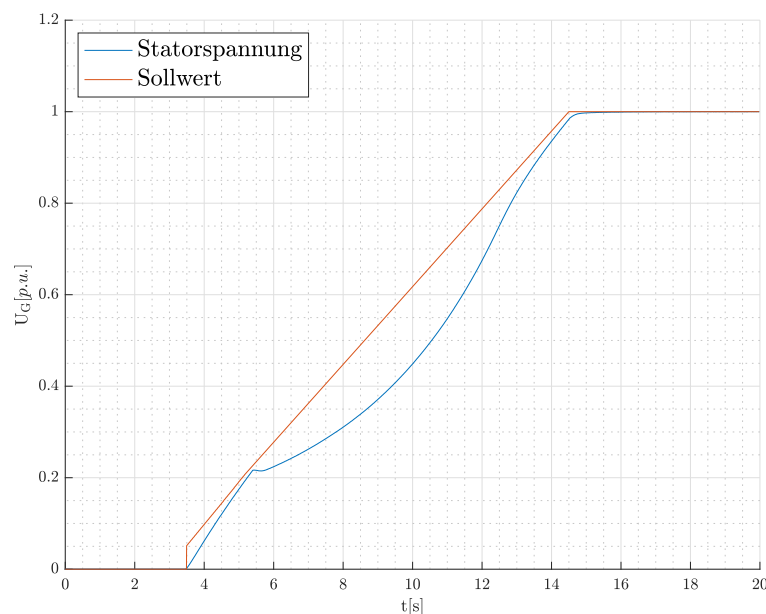


Abbildung 5.2: Klemmenspannung mit Sollwertvorgabe

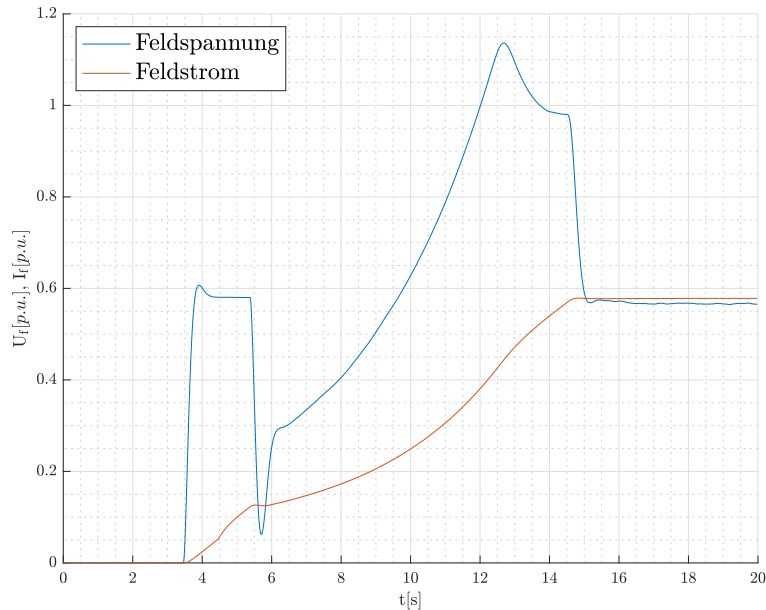


Abbildung 5.3: Feldspannung und Feldstrom

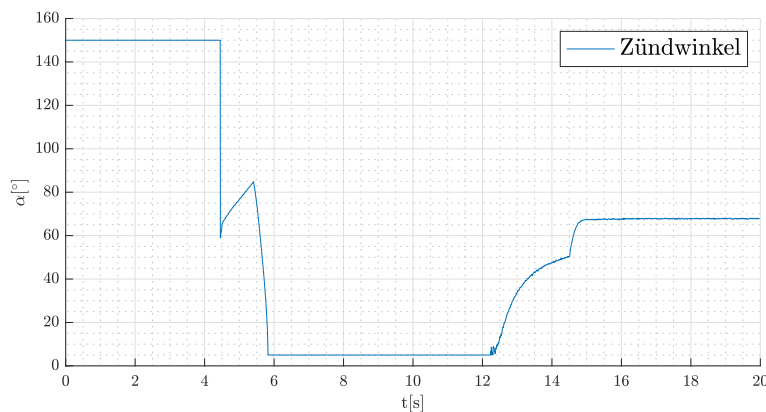


Abbildung 5.4: Zündwinkel der Thyristorbrücke

Abbildung 5.2 zeigt den typischen Verlauf der Statorspannung bei Auferregung im Nebenschluss. Zu Beginn des Vorgangs wird die Batterispannung zum schnelleren Aufbau des Rotorflusses zugeschaltet. Diesen Vorgang erkennt man an der linearen Steigung der Spannung zu Beginn. Nach etwa fünf Sekunden wird die Hilfsspannung weggeschaltet und der Spannungsregler beginnt den Generator über die Thyristorbrücke hochzuziehen. Nachdem der Sollwert vom Istwert abweicht, wird der maximale Öffnungszündwinkel vorgegeben (Abb. 5.4). Je näher die Statorspannung an die Nennspannung herankommt, desto größer wird der Zündwinkel, bis ein stabiler Arbeitspunkt bei knapp 65° erreicht wird.

Beim Verlauf der Feldspannung ist ebenfalls die Wirkung der Hilfsspannungsquelle zu Beginn zu beobachten.

5.1.2 Sollwertsprung der Generatorspannung

Der Versuch des Sollwertsprungs der Generatorspannung dient zur Untersuchung der Dynamik sowie der Güte der Abstimmung des Reglers auf die zu regelnde Maschine. Primär liegt der Grund für diesen Versuch in der Möglichkeit einer sprungartigen Änderung der Netzspannung auf die der Spannungsregler in kürzester Zeit reagieren muss. Da technisch jedoch keine Möglichkeit besteht die Spannung im Verbundnetz auf einen beliebigen Wert springen zu lassen, versucht man andersrum durch Springen der Generatorspannung die Stabilität der Regelung zu beweisen. Im Regelfall liegt die Sprunghöhe im Bereich von 1% bis 5% der Generatornennspannung. Hier wurde ein Versuch mit 5% durchgeführt.

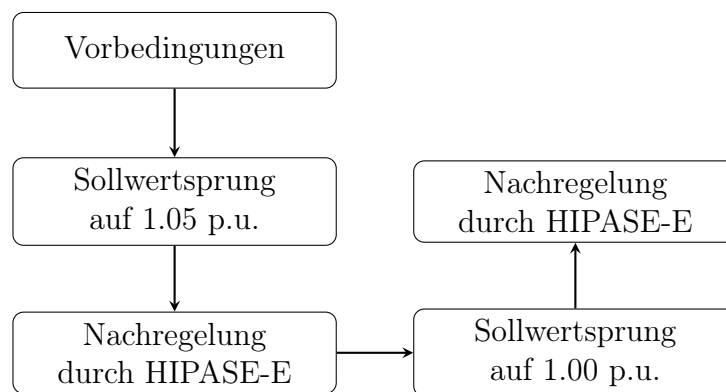


Abbildung 5.5: Ablaufdiagramm für Sollwertsprung

Die Bewertung solcher Testfälle erfolgen in der Praxis durch die Auswertung charakteristischer Größen wie der Anstiegszeit t_r , der Einschwingzeit t_s und der relativen Überschwingweite \ddot{u} .

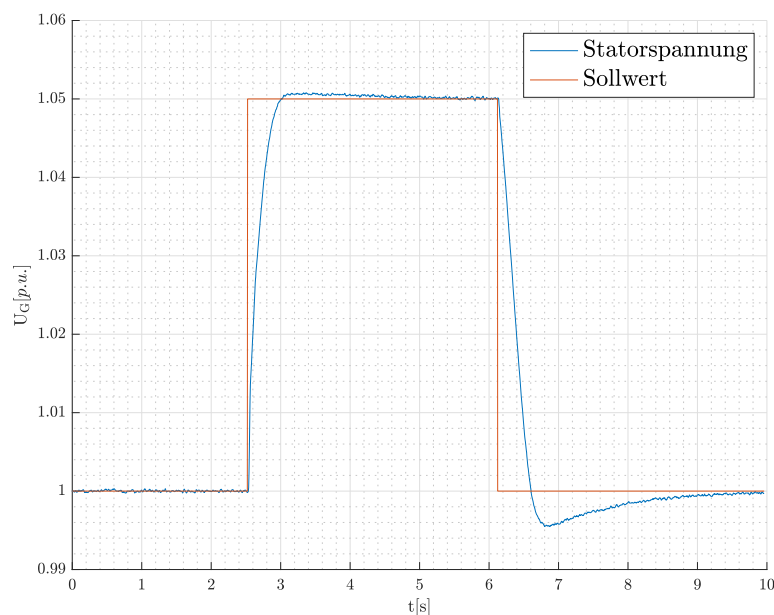


Abbildung 5.6: Klemmenspannung mit Sollwertvorgabe

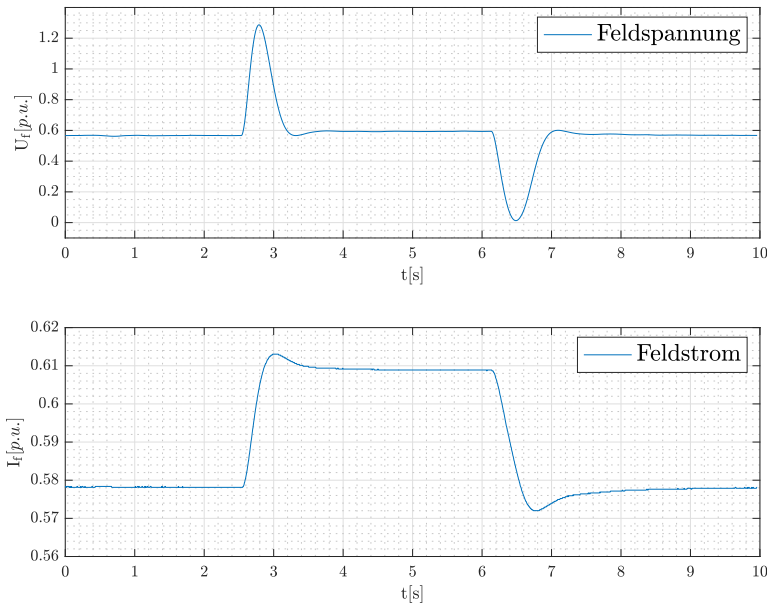


Abbildung 5.7: Feldspannung und Feldstrom

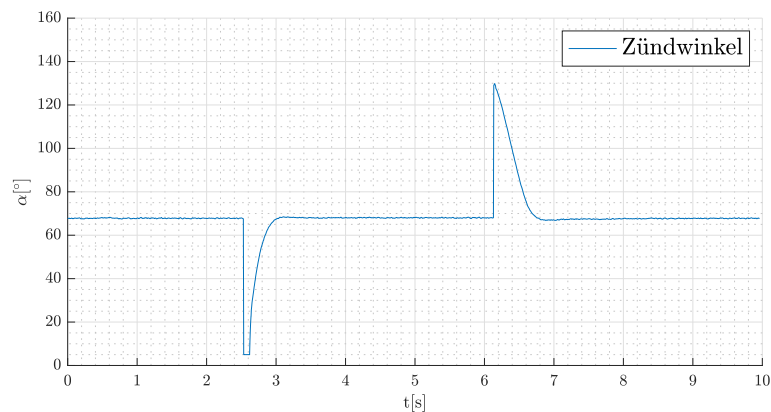


Abbildung 5.8: Zündwinkel der Thyristorbrücke

Wie Abbildung 5.6 zeigt, versucht der Regler die Generatorspannung einem idealen Sprung als Sollwert so gut wie möglich nachzuführen. Im ersten Moment stellt sich der minimale Zündwinkel (Abbildung 5.8) und damit die maximal verfügbare Feldspannung ein. Da es sich beim untersuchten Spannungsregler um ein System höherer Ordnung handelt kommt es zu einem erwarteten Überschwingen der Regelgröße. Das HIPASE-E Gerät muss nachregeln.

Ein leicht anderes Verhalten zeigt sich beim Sprung zurück auf Nennspannung. Bei richtiger Funktion des Reglers sollten die Zeit- und Überschwingfaktoren bei beiden Sprüngen identisch sein. Durch die Vorgabe des Zündwinkels sollte sich theoretisch eine negative Spannung an der Feldwicklung einstellen. Nachdem aber bereits erwähnt wurde (4.1.4), dass dies aufgrund des realisierten Aufbaus nicht möglich ist, zeigt sich eine resultierende Abfallzeit, die abhängig von der Rotorzeitkonstante der Maschine ist. Dadurch verliert die Regelung an Dynamik, was sich ebenfalls durch das stärker ausgeprägte Überschwingen zeigt.

5.1.3 Eingriff des verzögerten Übererregungsbegrenzers

Ein vollständiges Erregersystem hat neben seiner Hauptfunktion der Spannungsregelung auch die Aufgabe, einzelne physikalische Größen der Maschine zu überwachen und gegebenenfalls zu begrenzen. Im Idealfall liegt der Wert der Begrenzung vor dem Auslösewert des Schutzsystems. Dies hat den einfachen Grund, dass den kritischen oder gar unzulässigen Betriebspunkten durch eventuell mögliche Regleraktivität entgegengewirkt werden kann ohne zwingend zu einer vollkommenen Abschaltung zu führen.

Der verzögerte Übererregungsbegrenzer stellt eine dieser Regelgrenzen dar. Damit soll eine Sättigung der Eisenwege der Maschine unterbunden werden, die zu einem Anstieg des Stroms und in weiterer Folge zur thermischen Überlastung der Maschine führen würde.

Um einen Eingriff des Begrenzers zu erzwingen, muss ein Betriebspunkt über Nenn-erregung erreicht werden. Dafür wurde der Leistungsschalter geschlossen und ein Arbeitspunkt durch Vorgabe eines Turbinenmoments mit signifikanten Statorstrom vorgegeben. Die Statorspannung wird so lange erhöht, bis der Übererregungsbegrenzer eingreift.

Für diesen Testfall wurden alle anderen Begrenzer deaktiviert, um ein Eingreifen des Reglers an unerwünschten Stellen zu vermeiden.

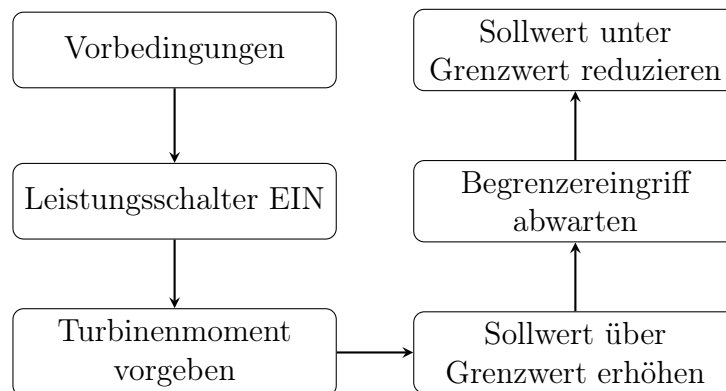


Abbildung 5.9: Ablaufdiagramm für Übererregungsbegrenzer

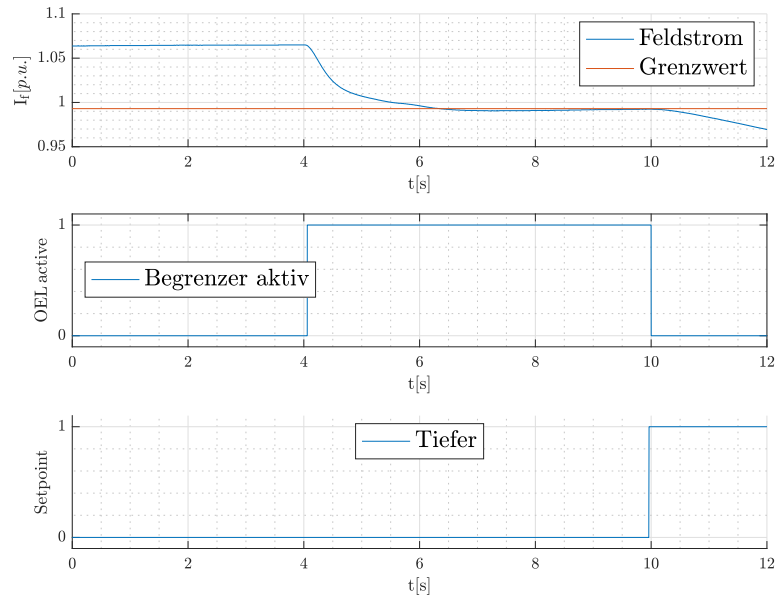


Abbildung 5.10: Feldstrom mit Begrenzungsschwelle und Aktivitätsanzeige des Begrenzers

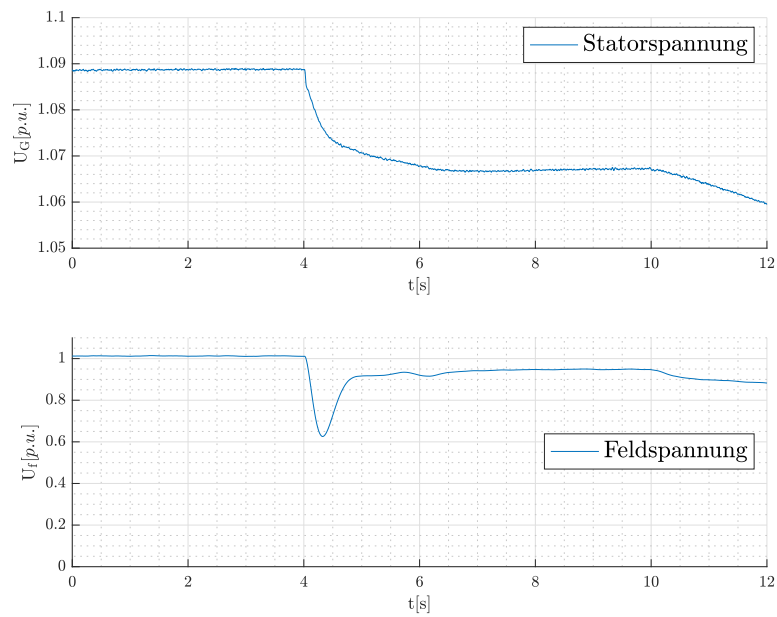


Abbildung 5.11: Stator- und Feldspannung

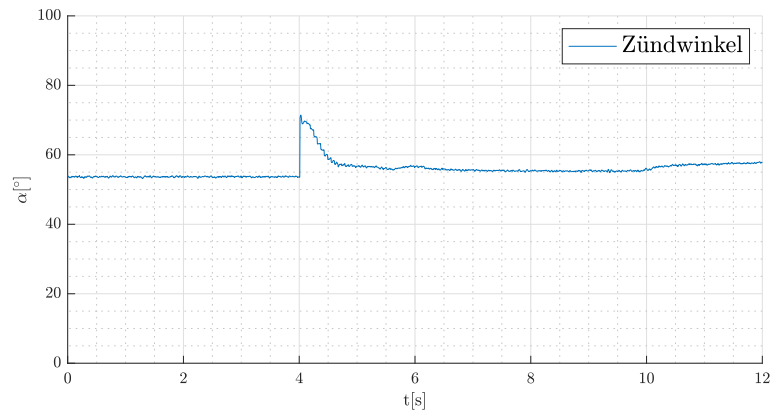


Abbildung 5.12: Zündwinkel der Thyristorbrücke

Hierbei handelt es sich um einen Begrenzer nach AMZ-Charakteristik (Abhängiger Maximalstrom-Zeitschutz). Die Auslösezeit ist demnach abhängig von der Höhe des Stroms. Für nähere Details des Verhaltens wird hier auf entsprechende Literatur verwiesen, da die exakte Funktionsweise nicht weiter relevant ist.

Die zeitverzögerte Begrenzung ist in Abbildung 5.10 eindeutig zu erkennen. Durch Aktivierung des Begrenzers, dargestellt durch den internen Datenpunkt „OEL active“ (Over-Excitation Limiter), wird der Öffnungswinkel der Thyristoren sprunghaft verringert und der Feldstrom wieder unter den Maximalwert geführt. Die Verläufe zeigen nur den Ausschnitt zum Zeitpunkt des Eingriffs des Begrenzers. Die Darstellung des gesamten Ablaufs (Abbildung 5.9) ist zu unübersichtlich und hat für den Beweis der Funktion keine Relevanz. Dies gilt analog ebenfalls für alle weiteren Versuche.

5.1.4 Eingriff des unverzögerten Maximalfeldstrombegrenzers

Für den Fall eines sehr steilen Anstiegs des Feldstroms auf einen Wert außerhalb des zulässigen Bereichs verfügt das HIPASE-E Gerät zusätzlich über einen unverzögerten Maximalfeldstrombegrenzer. Anders als beim unverzögerten Übererregungsbegrenzers greift der Regler hier bei Überschreitung des Grenzwerts ohne Verzögerung ein und reduziert den Feldstrom so lange, bis sich sein Wert wieder im erlaubten Bereich befindet.

Gleich wie beim Testfall zuvor wurden alle anderen Begrenzer deaktiviert.

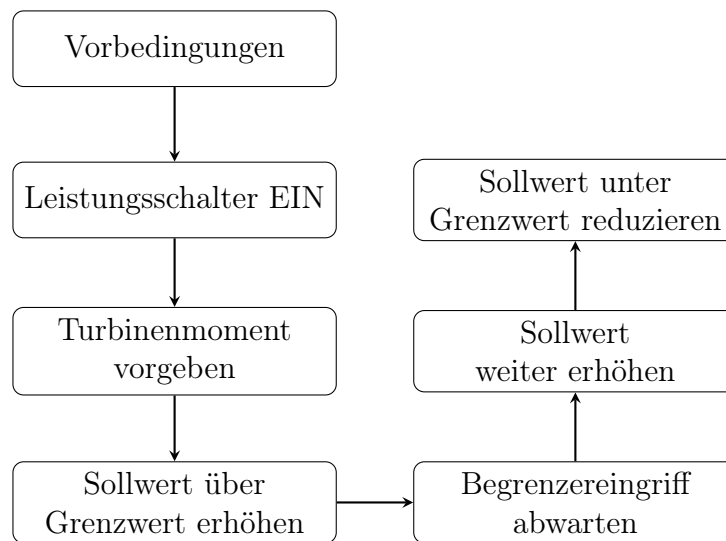


Abbildung 5.13: Ablaufdiagramm für Maximalfeldstrombegrenzer

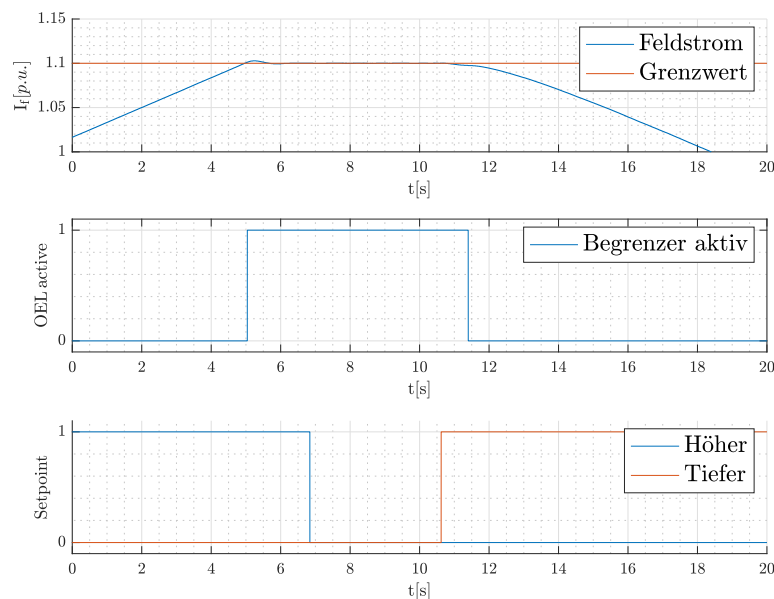


Abbildung 5.14: Feldstrom mit unverzögerter Begrenzungsschwelle und Aktivitätsanzeige des Begrenzers

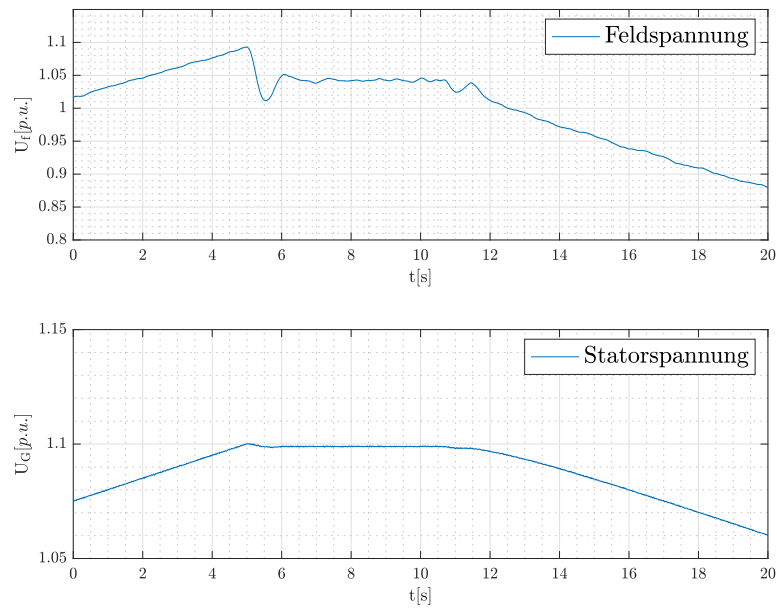


Abbildung 5.15: Stator- und Feldspannung

Es ist zu erkennen, dass auch bei weiterer Vorgabe von „höher“ Befehlen der Feldstrom nicht weiter ansteigt. Der Begrenzer ist somit die oberste Instanz und verhindert ein Überschreiten des Maximalwerts zu jedem Zeitpunkt.

5.1.5 Eingriff des Untererregungsbegrenzers

Ähnlich wie beim Übererregungsbegrenzer existiert auch ein unteres Limit für die Erregung. Abhängig von den Maschinenparametern benötigt jeder Synchrongenerator ein Mindestmaß an Erregerenergie um ein vorhandenes Lastmoment treiben zu können. Als kritische Größe ist hier der Polradwinkel zu beobachten. Überschreitet dieser Wert einen zulässigen Maximalwinkel ohne dass durch Eingreifen des Untererregungsbegrenzers die Erregerenergie dementsprechend reguliert wird, besteht die Gefahr eines Polabrisses und infolge dessen, ein schlupfen des Rotorfeldes gegeben über dem Statorfeld. Dieser Betriebspunkt ist im Allgemeinen instabil und auf jeden Fall zu vermeiden.

Auch hier ist es nötig, alle restlichen Begrenzer zu deaktivieren um ein unerwünschtes Eingreifen des HIPASE-E Geräts zu vermeiden.

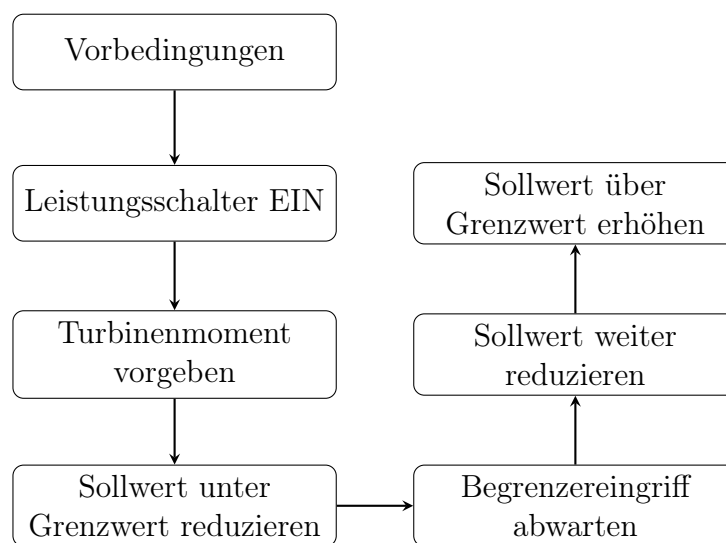


Abbildung 5.16: Ablaufdiagramm für Untererregungsbegrenzer

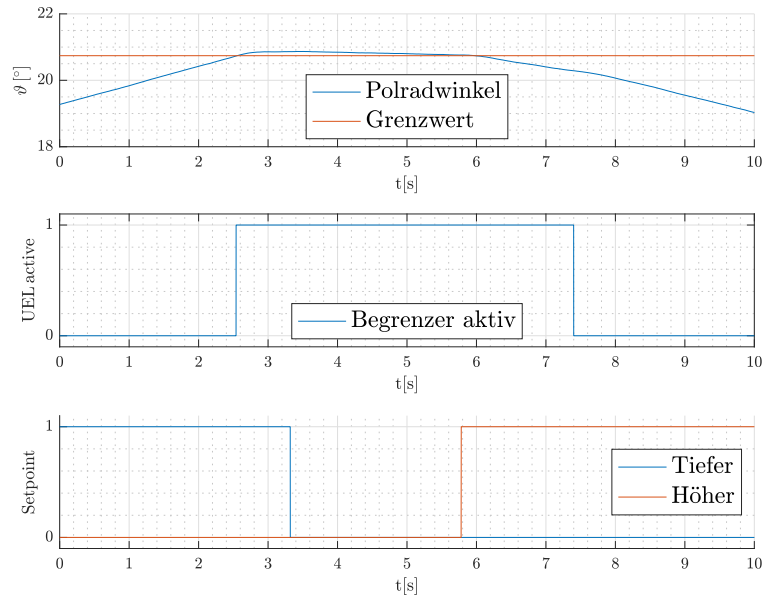


Abbildung 5.17: Polradwinkel mit Begrenzungsschwelle und Sollwertsteigerungs- und Verminderungsbefehlen

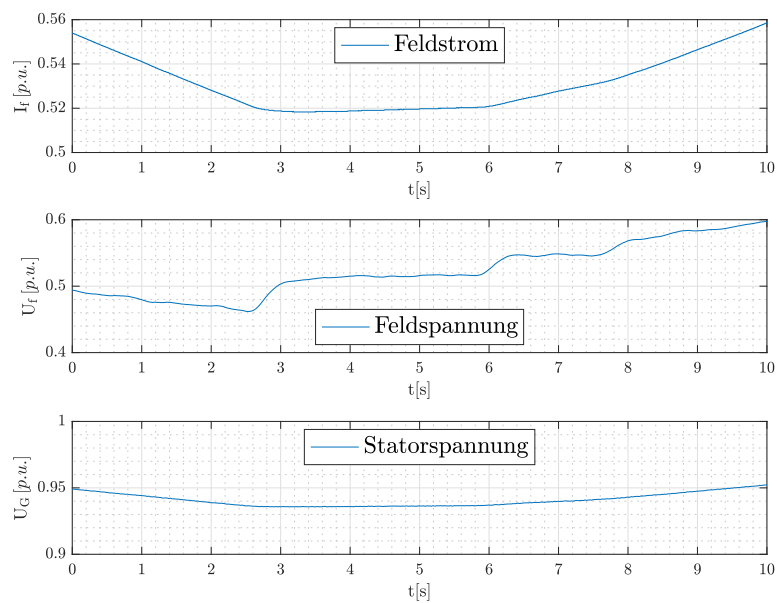


Abbildung 5.18: Feldstrom, Feldspannung und Statorspannung

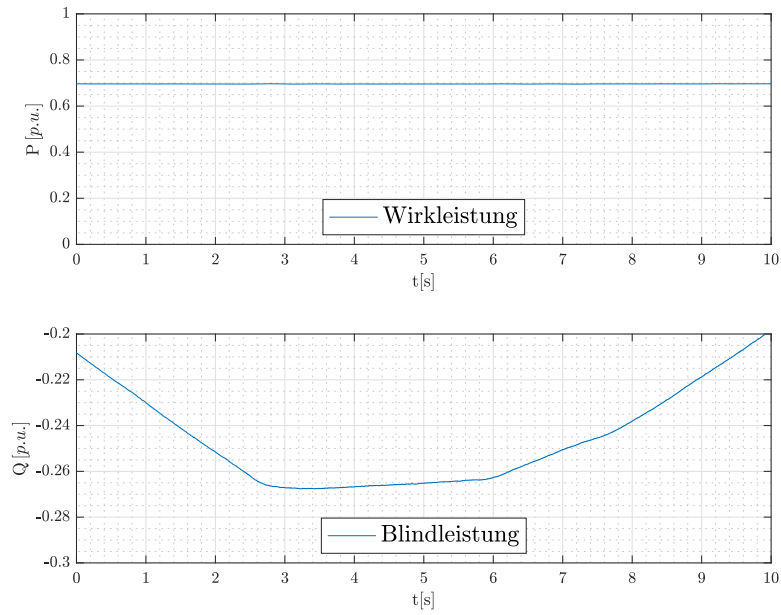


Abbildung 5.19: Wirk- und Blindleistung während der Regelung

5.1.6 Eingriff des Minimalfeldstrombegrenzers

Neben dem Untererregungsbegrenzer verfügt das HIPASE-E Gerät über einen Minimalfeldstrombegrenzer, der unverzüglich eingreift sobald der Feldstrom die eingestellte minimale Grenze unterschreitet. Speziell bei Turbogeneratoren tritt der Effekt auf, dass sich bei zu geringem Feldstrom Wirbelströme an den Oberflächen der Pole ausbilden und dadurch das Material zusätzlich beansprucht oder sogar beschädigt wird. Der Minimalfeldstrombegrenzer kann diesem Verhalten über den Einstellwert entgegenwirken. Alle anderen Begrenzer wurden deaktiviert.

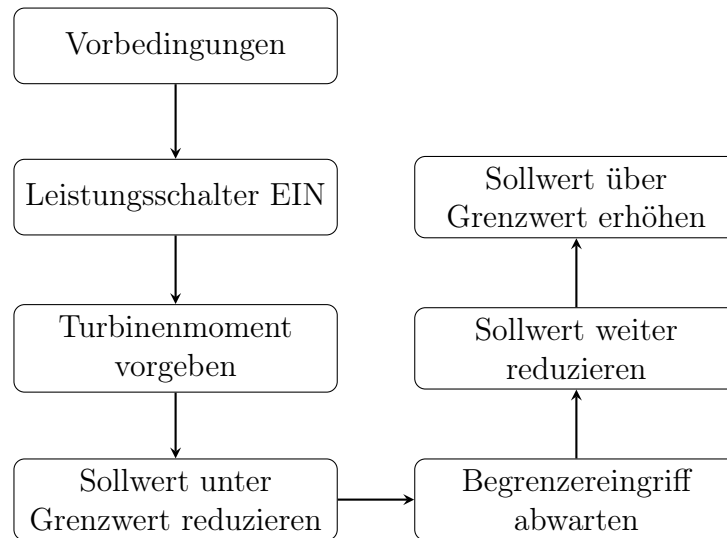


Abbildung 5.20: Ablaufdiagramm für Minimalfeldstrombegrenzer

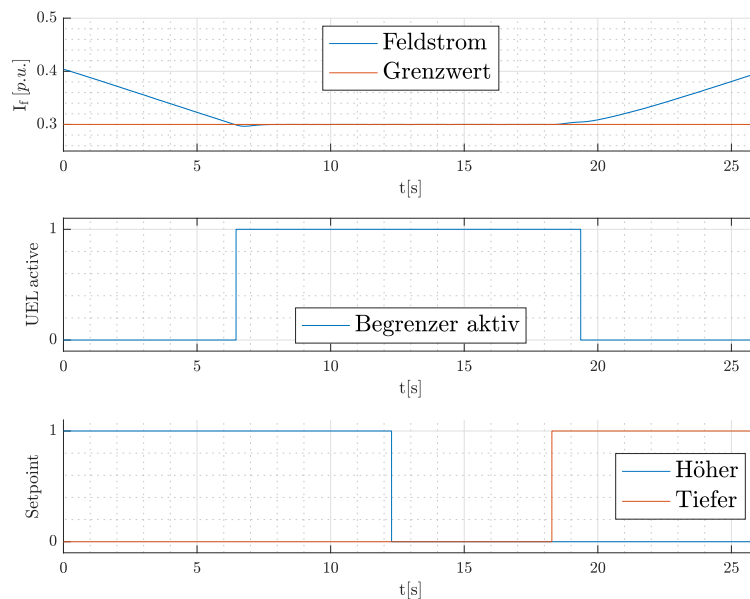


Abbildung 5.21: Feldstrom mit Begrenzungsschwelle und Sollwertsteigerungs- und Verminderungsbefehlen

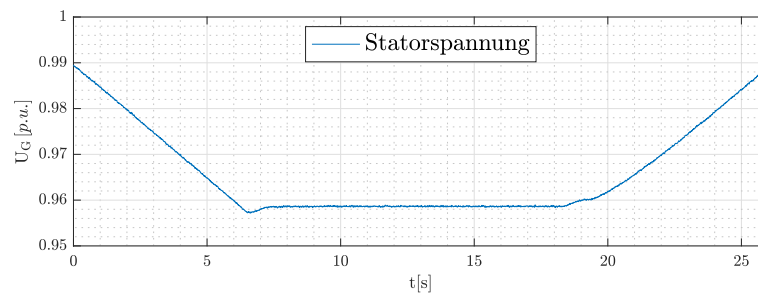
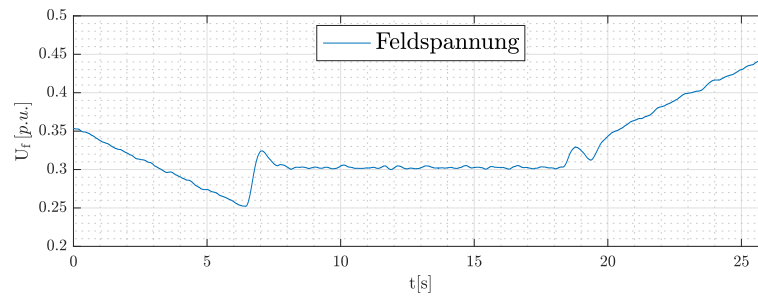


Abbildung 5.22: Feld- und Statorspannung

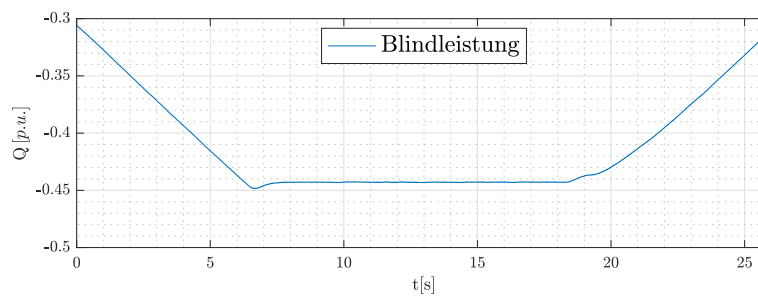
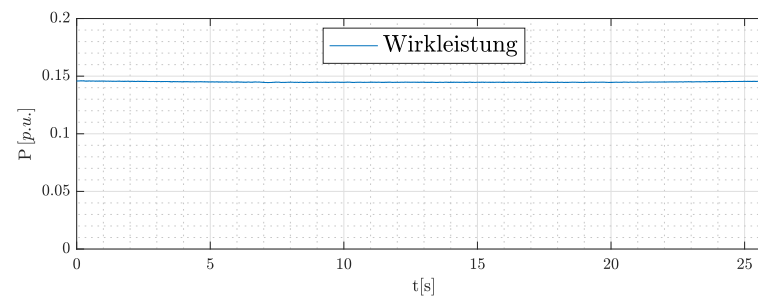


Abbildung 5.23: Wirk- und Blindleistung während der Regelung

5.1.7 Eingriff des Statorstrombegrenzers

Der Statorstrombegrenzer dient in erster Linie als thermischer Überlastschutz der Maschine. Die Abschaltung bei stoßartigen Anstiegen, wie etwa beim Kurzschluss, ist Aufgabe des Schutzes und kann nicht vom Spannungsregler übernommen werden.

Für den Versuch wurde der Leistungsschalter geschlossen und danach der Nennpunkt angefahren. Eine anschließende stetige Erhöhung der Blindleistung bedeutet ein Überstreiten der Statorstrombegrenze, die mit 105% eingestellt ist.

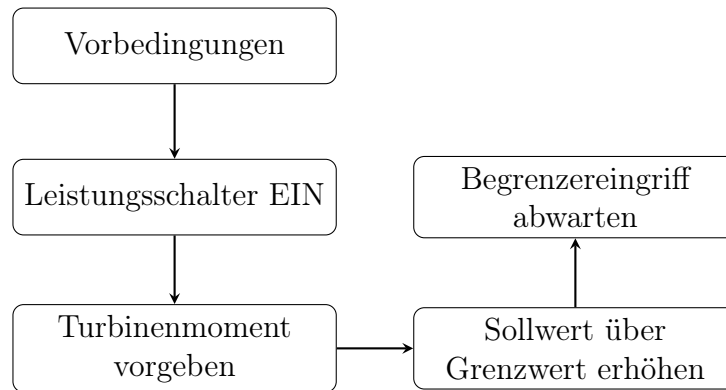


Abbildung 5.24: Ablaufdiagramm für Statorstrombegrenzer

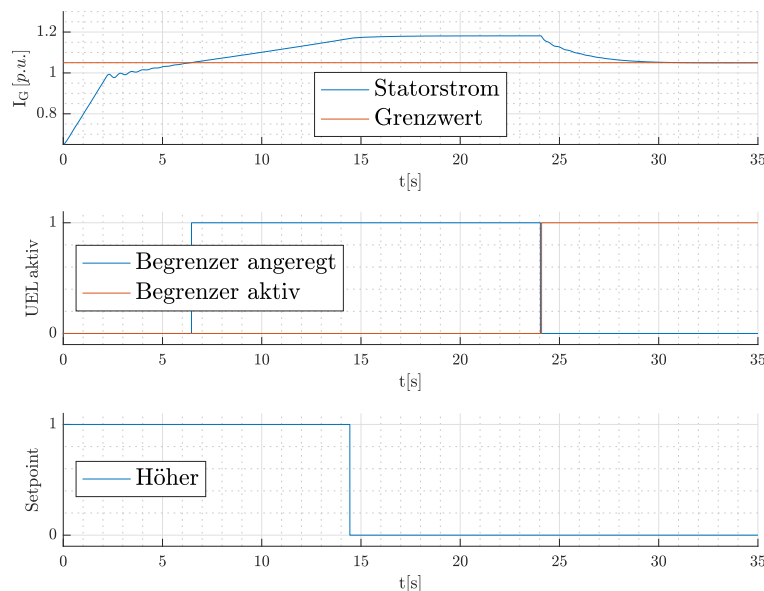


Abbildung 5.25: Statorstrom mit Begrenzungsschwelle, Begrenzeraktivität und Sollwertsteigerungsbefehl

Auch hier ist wieder die AMZ-Charakteristik zu erkennen. Der Grenzwert ist so einzustellen, dass der Eingriff noch vor Auslösung des Schutzgeräts erfolgt um eine vollständige Stillsetzung der Maschine zu verhindern.

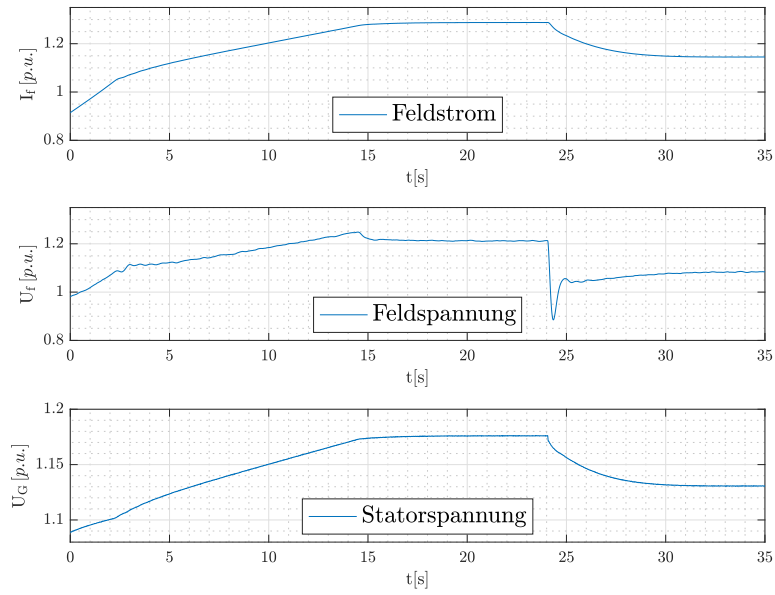


Abbildung 5.26: Feldstrom, Feldspannung und Statorspannung

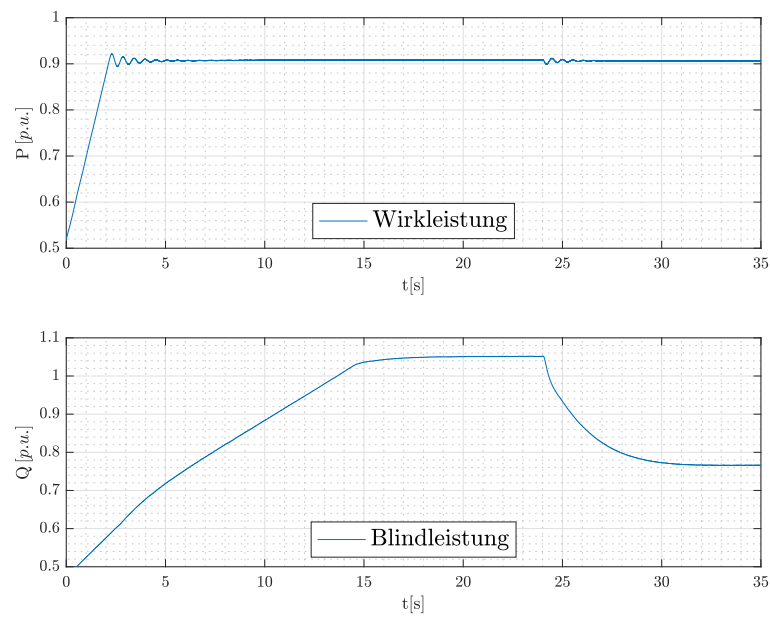


Abbildung 5.27: Wirk- und Blindleistung während der Regelung

5.1.8 Lastabwurf auf Eigenbedarf

Lastabwurfsversuche stellen eine besondere Beanspruchung für den mechanischen Aufbau aller rotierenden Komponenten in einem Kraftwerk dar. Besonders Betriebspunkte mit hohem Anteil an vorhandener Blindleistung äußern sich durch einen steilen Anstieg der Klemmenspannung am Generator aufgrund der Drehzahlerhöhung bei plötzlicher Lastfreischaltung. Bei diesem Versuch soll bewiesen werden, dass der Spannungsregler in der Lage ist, den Anstieg der Klemmenspannung rasch wieder abbauen zu können, um eine Überbeanspruchung der Isolation zu verhindern.

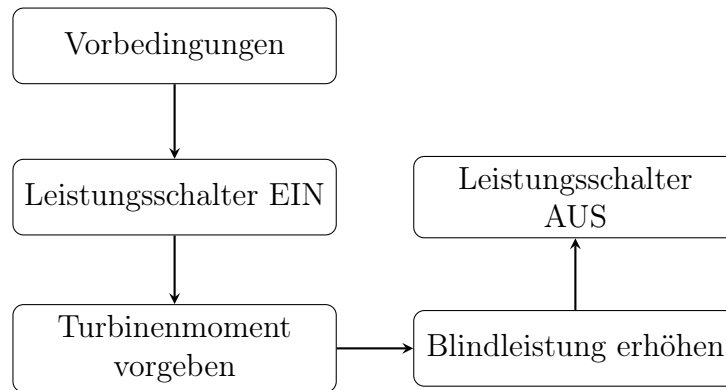


Abbildung 5.28: Ablaufdiagramm für Lastabwurf

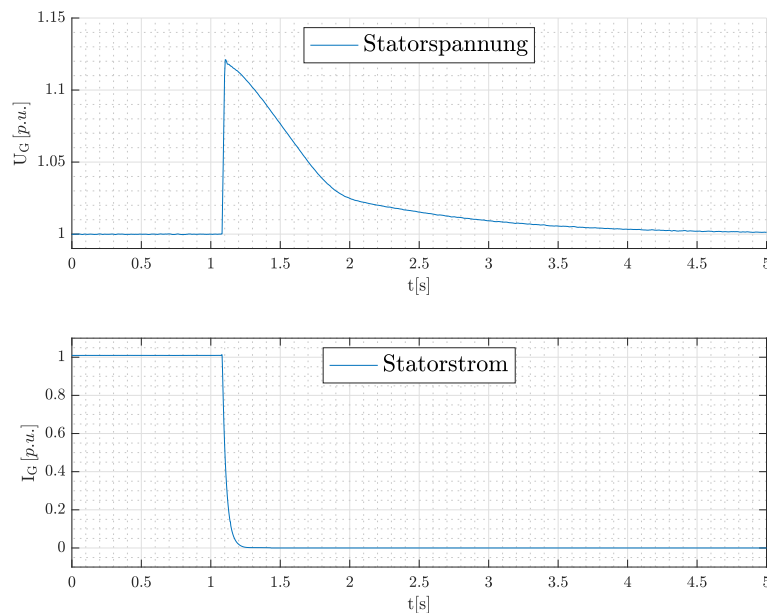


Abbildung 5.29: Generatorspannung und Generatorstrom bei Lastabwurf

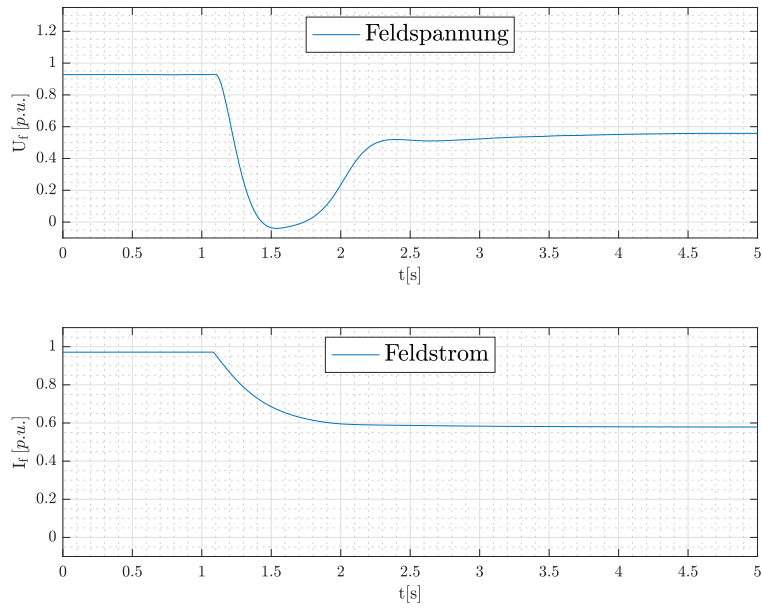


Abbildung 5.30: Feldstrom und Feldspannung

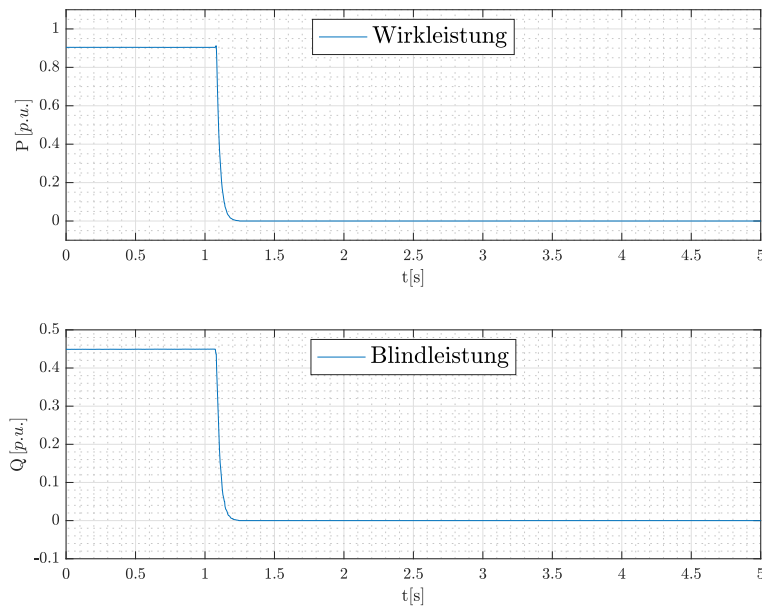


Abbildung 5.31: Wirk- und Blindleistung während der Regelung

5.1.9 Externer Fehler: 3-poliger Kurzschluss

Der externe 3-polige Kurzschluss in Generatornähe stellt vermutlich die größte Stabilitätsbeanspruchung an Generator und Erregersystem. Für solche Arten von Fehlerfällen ist im Netzschutz eine maximale Klärungszeit definiert. Sie variiert zwischen den Netzbetreibern, befindet sich aber in der Größenordnung von ca. 150 ms. Während dieser Zeit soll der Leistungsschalter geschlossen und der Generator somit am Netz bleiben. Wird der Fehler nicht in der definierten Zeit geklärt, löst der elektrische Schutz aus und trennt die Maschine vom Netz. Die Aufgabe der Erregung besteht darin, während dieser Zeit den Statorstrom so weit wie Möglich zu begrenzen und nach Klärung des Fehlers wieder in einen stabilen Arbeitspunkt zurückzukehren. Bei diesem Versuch wurde ein Kurzschluss sehr nahe am Generator nachgebildet. Die Generatorspannung bricht nicht vollständig ein, da der Abfall an der Transformatorimpedanz mitberücksichtigt wurde.

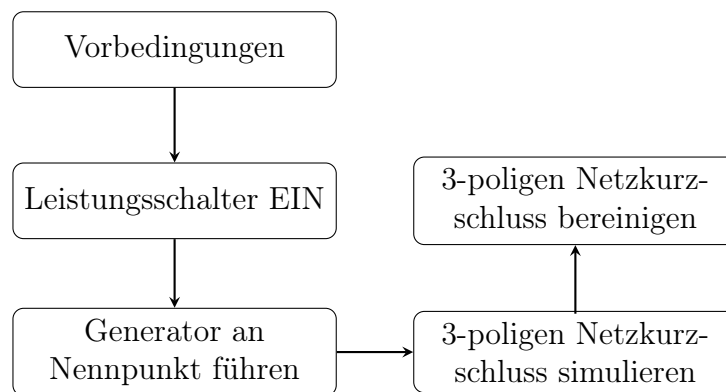


Abbildung 5.32: Ablaufdiagramm für 3-poligen Netzkurzschluss

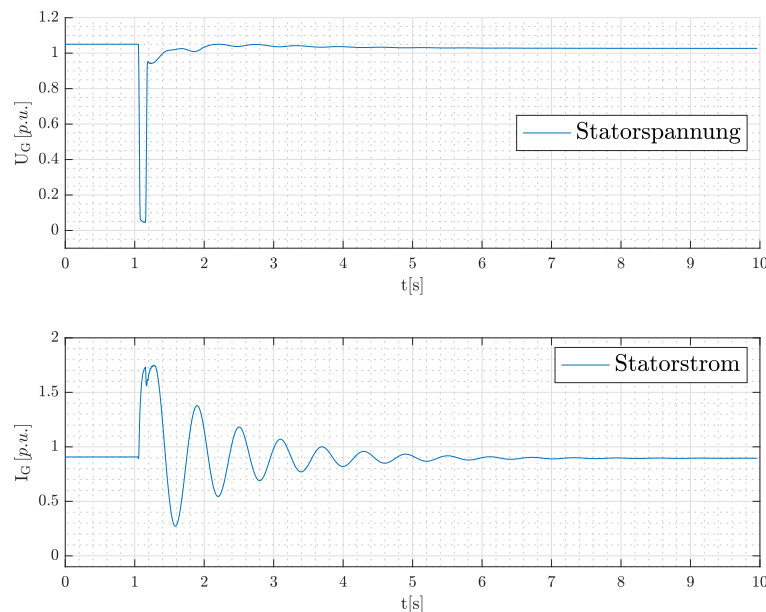


Abbildung 5.33: Generatorspannung und Generatorstrom

Wie in den folgenden Ergebnissen dargestellt, muss der Regler besonders die starken

Pendelungen des Polradwinkels und der Wirkleistung in den Griff bekommen, was mehrere Sekunden dauern kann.

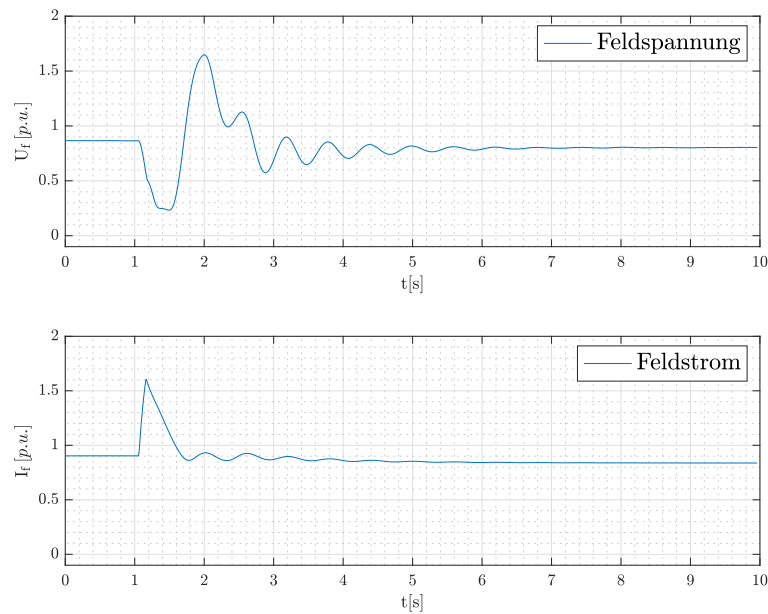


Abbildung 5.34: Feldspannung und Feldstrom

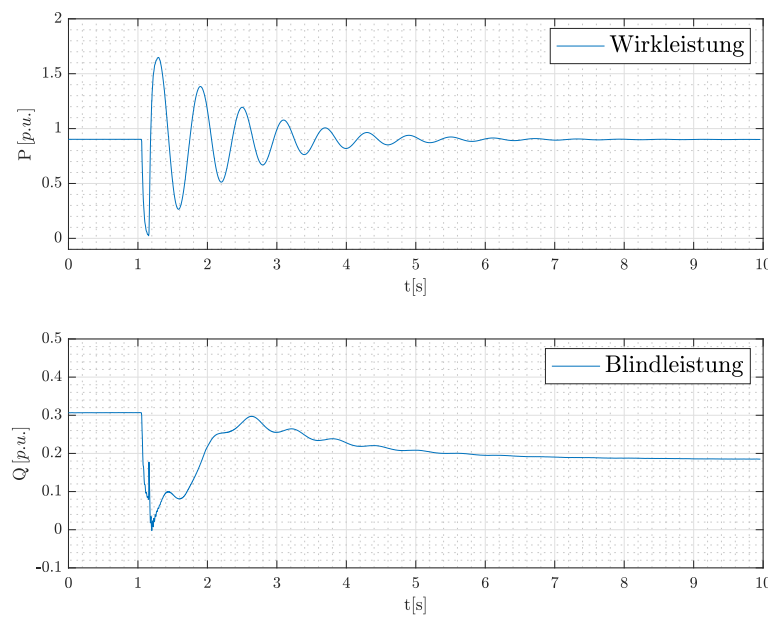


Abbildung 5.35: Wirk- und Blindleistung während der Regelung

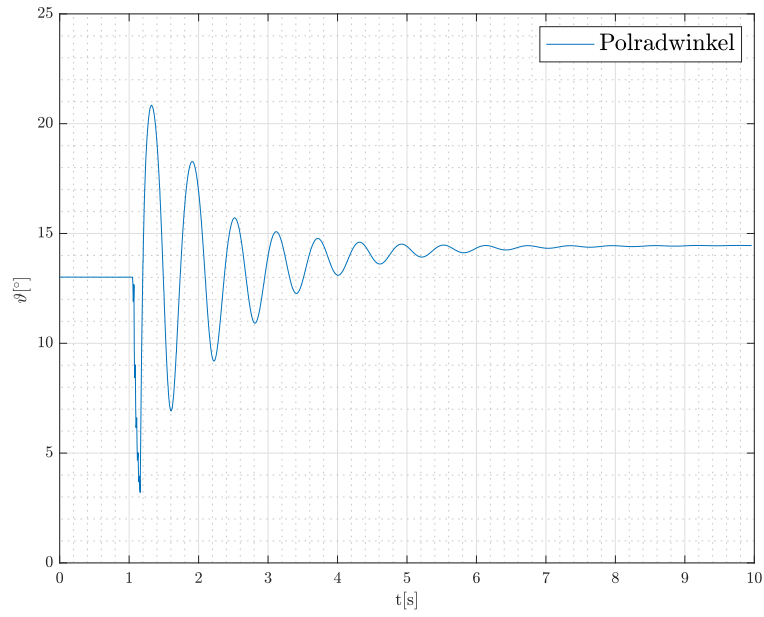


Abbildung 5.36: Polradwinkel

5.2 Validierung der Testfälle

Als abschließender Teil der Untersuchung der realisierten Simulation einer Kraftwerks Umgebung mit dem Schwerpunkt der Nachbildung eines Drehstromsynchrongenerators müssen die präsentierten Ergebnisse der Testfälle validiert und auf Plausibilität überprüft werden. Hierfür soll ein direkter Vergleich zwischen den von DI Stefan Knieling theoretisch ausgearbeiteten und den im Zuge dieser Arbeit praktisch gemessenen Verläufe hergestellt werden. Dabei wird jeder einzelne Testfall verglichen und die Ergebnisse diskutiert. Um den Verweis zwischen den beiden Arbeiten zu vereinfachen, wird in weiterer Folge die Diplomarbeit von DI Stefan Knieling als Arbeit 1 und diese Diplomarbeit als Arbeit 2 bezeichnet.

5.2.1 Analyse der Ergebnisse

Auferregung des Synchrongenerators auf Nennspannung

Im Vergleich der beiden Statorspannungsverläufe ist zu erkennen, dass der Anstieg in Arbeit 2 nicht exakt linear verläuft. Der Unterschied zu Arbeit 1 liegt bei der Wahl der untersuchten Maschinen. Offensichtlich besitzen die beiden modellierten Generatoren unterschiedlichen Erregerbedarf sowie ungleiche Rotorzeitkonstanten. Dies ist besonders gut am Endwert und der Steigerungsrate des Feldstroms zu erkennen. Zusätzlich bedient sich Arbeit 1 einer höheren Hilfsspannung zu Beginn des Erregungsvorgangs, bezogen auf die jeweiligen Nennwerte.

Bei den Feldspannungen unterscheiden sich offensichtlich die Messpunkte. Während in Arbeit 1 die Spannung direkt am Ausgang der Thyristorbrücke gemessen wurde, stellt der Verlauf in Arbeit 2 die Spannung unmittelbar an den Schleifringen des Feldkreises dar, da hier das Anlegen der Batteriehilfsspannung zu Beginn eindeutig erkennbar ist. Beim Messen an der Thyristorbrücke kann die Hilfsspannung nicht erkannt werden, da die Zuschaltung über Entkoppeldioden erfolgt um einen Leistungsaustausch zwischen Thyristorbrücke und Hilfsspannungsquelle zu vermeiden. Der Verlauf des Zündwinkels ist in beiden Arbeiten kohärent zu den jeweiligen Statorspannungen. Gegeben durch die höhere Abweichung zwischen Soll- und Istwert steuert die Brücke aus 2 den Großteil des Vorganges vollständig auf. Je näher die Spannung an den Vorgabewert herangezogen wird, desto stärker reduziert der Spannungsregler den Öffnungswinkel bis ein stabiler statischer Arbeitspunkt erreicht ist.

Der physikalische Vorgang in Arbeit 2 entspricht exakt dem Erwarteten, weshalb dieser Versuch als reales Verhalten validiert werden kann.

Sollwertsprung der Generatorspannung

In beiden Arbeiten zeigt sich ein ähnlicher Verlauf. Der Regler reagiert auf einen Sollwertsprung mit der Nachführung der Statorspannung. Aufgrund der unterschiedlichen Dynamiken der beiden untersuchten Systeme stellen sich verschiedene Steil-

heiten in den dargestellten Verläufen dar. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass in Arbeit 2 keine negative Feldspannung an den Rotor gelegt werden kann, wie in 4.1.4 genauer beschrieben ist. Bis auf diese Einzelheiten zeigt sich jedoch das gleiche Verhalten des Generators, weshalb dieser Versuch in Arbeit 2 als korrekt hingenommen werden kann.

Eingriff des verzögerten Übererregungsbegrenzers

Der Übererregungsbegrenzer zeigt in beiden Arbeiten exakt dasselbe Verhalten. Bedingt durch die AMZ-Charakteristik ergibt sich die Verzögerung des Eingriffs. Die Begrenzung erfolgt über die sprungartige Erhöhung des Zündwinkels der sich in sofortiger Absenkung des Feldstroms und dadurch ebenfalls der Stator- und Feldspannung ergibt. In Arbeit 2 ist zusätzlich noch deutlich erkennbar, dass der Begrenzer weiterhin aktiv bleibt, bis der Sollwert unter die Grenzwelle fällt. Damit lässt sich die Richtigkeit dieses Versuches bestätigen.

Eingriff des unverzögerten Übererregungsbegrenzers

Bei der Untersuchung des unverzögerten Übererregungsbegrenzers wurden zwei unterschiedliche Varianten durchgeführt. Während Arbeit 1 den Versuch durch eine sprungartige Änderung der Statorspannung über den eingestellten Grenzwert treibt, untersucht Arbeit 2 den Eingriff des Begrenzers durch stetiges Heranführen an den höchstzulässigen Wert. Diese Vorgehensweise wurde absichtlich so gewählt, da sich der Feldstrom in der Praxis nicht sprungartig ändern kann. Bei beiden Arbeiten ist der sofortige Eingriff eindeutig zu erkennen. Auch hier bleibt der Begrenzer so lange aktiv, bis der Sollwert abgesenkt wird.

Dieser Versuch kann somit als erfolgreich validiert gewertet werden.

Eingriff des Untererregungsbegrenzers

Auch bei diesem Vergleich zeigt sich eine alternative Herangehensweise in Arbeit 2. Anstatt des sprungartigen Überschreitens des Grenzwerts wird der Polradwinkel stetig in Richtung Untererregungsbegrenzer geführt. Aus diesem Grund zeigen sich in den Verläufen der Statorspannung und des Feldstroms weniger radikale Änderungen, wie in Arbeit 1. Dennoch vollzieht der Regler denselben Eingriff wie in Arbeit 1. Das Ziel der korrekten Demonstration des Untererregungsbegrenzers ist somit erreicht und der Testfall dadurch valide.

Eingriff des Minimalfeldstrombegrenzers

Die präsentierten Ergebnisse zeigen physikalisch dasselbe Verhalten wie in Arbeit 1. Wieder ist die gewählte Vorgehensweise eine leicht andere, was wie erwartet aber zum selben Resultat führt. Eine Reduktion des Feldstroms ist nur bis zur eingestellten Grenze des Minimalfeldstrombegrenzers möglich. Die Funktionsweise von Regler und Generator können für diesen Betriebsfall daher validiert werden.

Eingriff des Statorstrombegrenzers

Der Statorstrombegrenzer ist im Verhalten ähnlich zum verzögerten Feldstrombegrenzer. Das Auslöseverhalten lässt sich wieder über die AMZ-Charakteristik beschreiben, die besonders durch die unterschiedlichen Zeitpunkte von Anregung und Aktivierung des Begrenzers veranschaulicht wird. Sowohl Arbeit 1 als auch Arbeit 2 zeigen bei diesem Versuch exakt dasselbe Verhalten. Die Validierung der Funktionsweise von Spannungsregler und Generatormodell ist dadurch gegeben.

Lastabwurf auf Eigenbedarf

Aus den präsentierten Ergebnissen in Arbeit 2 ist ersichtlich, dass die Maschinen aus beiden Arbeiten nahezu im selben Betriebspunkt bezüglich der Blindleistung betrieben wurden, bevor die Lastabschaltung durchgeführt wurde. Dieser Umstand ist für die Validierung des Versuchs von besonderer Bedeutung, da ausschließlich die Blindleistung für die Spannungsüberhöhung bei Entlastung der Maschine verantwortlich ist. Anders als bei Arbeit 1 wurde hier versucht, die Statorspannung wieder auf Nennwert zu bringen anstatt, die Maschine direkt abzustellen. In beiden Szenarien ist indessen das Maß der Spannungsüberhöhung von größerer Bedeutung, da dadurch eine Aussage über die Beherrschbarkeit des Generators durch das Erregersystem getroffen werden kann. Sowohl bei Arbeit 1 als auch bei Arbeit 2 ist der Wert der Überspannung nahezu gleich, was wiederum zu der Bestätigung führt, dass sich das modellierte System aus Arbeit 2 exakt gleich zum theoretischen System aus Arbeit 1 verhält und somit gültig ist.

Externer Fehler: 3-poliger Kurzschluss

Der 3-polige externe Kurzschlussversuch wurde in Arbeit zwei nur für ein Szenario untersucht, während in Arbeit 1 vier verschiedene Szenarien ausgearbeitet wurden. Der Versuch in Arbeit 2 entspricht dem Fall C aus Arbeit 1, jedoch befanden sich die Maschinen in unterschiedlichen Betriebspunkten. Aus den einzelnen Verläufen ist

jedoch physikalisch die gleiche Verhaltensweise ersichtlich. Sowohl der steile Anstieg des Stator- sowie Feldstroms ähneln, genauso wie die Pendelung von Wirkleistung und Polradwinkel, dem Verlauf derselben Größen in Arbeit 1. Nach der Fehlerklärung des Netzfehlers geht der Spannungsregler wieder in einen stabilen Arbeitspunkt über, nachdem die Pendelungen abgeklungen sind. In beiden Fällen dauert dieser Stabilsierungsvorgang etwa 5 Sekunden.

Anhand der vergleichbar ähnlichen Verläufe zwischen Arbeit 1 und Arbeit 2 kann wiederum auf eine valide Funktionsweise und Testdurchführung geschlossen werden.

5.2.2 Bewertung des Gesamtaufbaus

Nach Durchführung aller relevanten Tests und Darstellung der Ergebnisse aus den Versuchen, die zur Validierung notwendig sind, lässt sich abschließend eine Aussage über die Vollständigkeit des umgesetzten Aufbaus tätigen:

Mit dem mathematischen Generatorberechnungsmodell ist es gelungen, das Verhalten eines Synchrongenerators so nachzustellen, dass der Spannungsregler HIPASE-E keinen Unterschied zu einer realen Maschine erkennt. Alle neun Testfälle bestätigen ein Verhalten des Modells nach den in Kapitel 3 geforderten Eigenschaften. Der Gesamtaufbau enthält jede nötige Komponente um eine Kraftwerksumgebung in der minimal nötigen Ausführung simulieren zu können. Die hier beschriebene Umsetzung in Form der erstellten Software und darauf aufbauenden Hardware erfüllt alle zu Beginn geforderten Eigenschaften und stellt somit eine vollständige Testumgebung für die Durchführung von anwendungsspezifischen Testfällen für Kraftwerkssystemtechnik dar.

Kapitel 6

Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, eine Testumgebung zu gestalten, welche eine hinreichend genaue Umgebung erzeugt, in der sich das Erregungssystem HIPASE-E der Firma Andritz Hydro GmbH unter realen Bedingungen testen lässt. Als Mindestanforderung dafür galten die Durchführungen der neun festgelegten Testszenarien aus der Diplomarbeit von DI Stefan Knieling an der Technischen Universität Wien. Durch die beschriebene Zusammenstellung aller Teilsysteme zu einem gesamten Testaufbau erfolgte die erfolgreiche Umsetzung aller geforderten Eigenschaften, welche sich im Kapitel 5 durch die Zusammenstellung der Ergebnisse bestätigen lässt.

Während der Umsetzung zeigten sich bereits einzelne Eigenschaften des Aufbaus, die Potential zur Erweiterung des physikalischen Verhaltens haben, durch welche das gesamte Modell erweitert werden kann. In den folgenden Punkten sind Beispiele genannt, durch welche die Qualität der Testumgebung noch weiter verbessert werden kann:

- Erweiterung des mathematischen Modells um eine reale Nachbildung eines Dämpferkreises und dessen Einwirkungen auf die Stabilität der Maschine besonders im Hinblick auf sogenanntes Schlupfen der Pole
- Erweiterung des mathematischen Modells in Richtung von magnetischen Sättigungseffekten der magnetischen Kreise der Maschine
- Vergrößerung der Zeitkonstante im Ersatzaufbau des Rotorkreises um eine negative Feldspannung am Eingang des Generatormodells simulieren zu können
- Erweitern oder Ersetzen der B6 - Thyristorbrücke durch eine synthetische Brücke durch ein weiteres mathematisches Modell als alternative zur Erhöhung der Rotorzeitkonstante

Abschließend ist festzuhalten, dass der gesamte Testaufbau eine erfolgreiche Realisierung einer Umgebung darstellt, welche es der Firma Andritz Hydro GmbH ermöglicht, Systemtests für den HIPASE-E Spannungsregler durchzuführen. Weiters können zusätzliche Systeme erarbeitet und in den Aufbau eingegliedert werden um eine vollständigere und eventuell auf Spezialanforderungen zugeschnittene Umgebung zu realisieren.

Abbildungsverzeichnis

2.1	System in allgemeiner Darstellung[5, S.1]	3
2.2	Stator und Rotor Ersatzschaltbild	6
2.3	Einsträngige Spannungsinduktion	7
2.4	Schematischer Grundaufbau eines Synchrongenerators im Nebenschluss	14
3.1	Produktfoto des Spannungsreglers HIPASE-E Medium	17
4.1	Kommunikationswege der Systeme mit dem Raspberry Pi	24
4.2	Symbolbild des verwendeten single-board Computers Raspberry Pi	25
4.3	Symbolbild der verwendeten SPS-Steuerung	26
4.4	Spannungseingang zur Messung der Feldspannung	28
4.5	Anschlussschema der gewählten Messmethode	29
4.6	Zusatzbeschaltung für Feldstrommessung	32
4.7	Telegrammtypen der seriellen Schnittstelle	33
4.8	Einzelne Bits mit der Zugehörigkeit zu den jeweiligen Kanälen	35
4.9	Äquivalente Schaltung der d-Achse	37
4.10	Äquivalente Schaltung der q-Achse	37
4.11	Erzeugte Simulation in SIMULINK®	47
5.1	Ablaufdiagramm für Auferregungsvorgang	49
5.2	Klemmenspannung mit Sollwertvorgabe	49
5.3	Feldspannung und Feldstrom	50
5.4	Zündwinkel der Thyristorbrücke	50
5.5	Ablaufdiagramm für Sollwertsprung	51
5.6	Klemmenspannung mit Sollwertvorgabe	51
5.7	Feldspannung und Feldstrom	52
5.8	Zündwinkel der Thyristorbrücke	52
5.9	Ablaufdiagramm für Übererregungsbegrenzer	53
5.10	Feldstrom mit Begrenzungsschwelle und Aktivitätsanzeige des Begrenzers	54
5.11	Stator- und Feldspannung	54
5.12	Zündwinkel der Thyristorbrücke	55
5.13	Ablaufdiagramm für Maximalfeldstrombegrenzer	56
5.14	Feldstrom mit unverzögerter Begrenzungsschwelle und Aktivitätsanzeige des Begrenzers	56
5.15	Stator- und Feldspannung	57
5.16	Ablaufdiagramm für Untererregungsbegrenzer	58
5.17	Polradwinkel mit Begrenzungsschwelle und Sollwertsteigerungs- und Verminderungsbefehlen	59

5.18	Feldstrom, Feldspannung und Statorspannung	59
5.19	Wirk- und Blindleistung während der Regelung	60
5.20	Ablaufdiagramm für Minimalfeldstrombegrenzer	61
5.21	Feldstrom mit Begrenzungsschwelle und Sollwertsteigerungs- und Verminderungsbefehlen	61
5.22	Feld- und Statorspannung	62
5.23	Wirk- und Blindleistung während der Regelung	62
5.24	Ablaufdiagramm für Statorstrombegrenzer	63
5.25	Statorstrom mit Begrenzungsschwelle, Begrenzeraktivität und Sollwertsteigerungsbefehl	63
5.26	Feldstrom, Feldspannung und Statorspannung	64
5.27	Wirk- und Blindleistung während der Regelung	64
5.28	Ablaufdiagramm für Lastabwurf	65
5.29	Generatorspannung und Generatorstrom bei Lastabwurf	65
5.30	Feldstrom und Feldspannung	66
5.31	Wirk- und Blindleistung während der Regelung	66
5.32	Ablaufdiagramm für 3-poligen Netzkurzschluss	67
5.33	Generatorspannung und Generatorstrom	67
5.34	Feldspannung und Feldstrom	68
5.35	Wirk- und Blindleistung während der Regelung	68
5.36	Polradwinkel	69
B.1	Mobiler Aufbau der gesamten Testumgebung	82

Tabellenverzeichnis

3.1	Betriebsarten der Erregung	19
3.2	Testfalldefinitionen	21
4.1	Mindestanforderung der zu bereitstellenden Signale an das HIPASE- Gerät	25
4.2	Typische Maschinenparameter aus Datenblatt	39
A.1	Generatordaten des verwendeten Modells	79

Literaturverzeichnis

- [1] ANDRITZ HYDRO GMBH, : *HIPASE Datenblätter, Beschreibung der Systemkomponenten*. 2019.
- [2] IEEE, POWER ENGINEERING SOCIETY: *Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 2003.
- [3] KLIMA, ROBERT; SELBERHERR, SIEGFRIED: *Programmieren in C*. Springer-WienNewYork, 2010.
- [4] KNIELING, STEFAN: *Definition, Spezifikation und Analyse stressrelevanter Testfälle für Kraftwerkssystemtechnik*. Technische Universität Wien, 2017.
- [5] KUGI, ANDREAS: *Automatisierung Vorlesung und Übung*. Technische Universität Wien, 2017.
- [6] KUNDUR, PRABHA: *POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL*. McGraw-Hill, Inc., 1993.

Anhang A

Verwendetes mathematisches Modell

Für die Versuche wurden die realen Daten einer Schenkelpolsynchronmaschine verwendet. Dabei handelt es sich um den Generator eines Kraftwerks welches von der Firma Andritz Hydro GmbH in Betrieb genommen wurde. Laut Datenblatt sind folgende Werte gegeben:

Tabelle A.1: Generatordaten des verwendeten Modells

Größe	Wert
T'_{d0}	7.800
T''_{d0}	0.100
T'_{q0}	0.000
T''_{q0}	0.148
L_d	0.950
L'_d	0.253
L''_d	0.220
L_q	0.470
L'_q	0.470
L''_q	0.220
L_σ	0.150
R_s	0.003
H	3.090

Diese Werte werden anhand der Gleichungen aus Abschnitt 4.3.2 umgerechnet und dienen danach zur Berechnung der einzelnen Elemente der benötigten Matrizen. Dabei ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned}
L_{ad} &= 0.8 & L_{fd} &= 0.1182 \\
L_{1d} &= 0.2185 & L_{aq} &= 0.32 \\
L_{1q} &= 0 & L_{2q} &= 0.0896 \\
R_{fd} &= 0.1177 & R_{1d} &= 3.2148 \\
R_{1q} &= 0 & R_{2q} &= 2.7676 \\
T'_d &= 2.0773 & T''_d &= 0.087 \\
T'_q &= 0 & T''_q &= 0.0639
\end{aligned} \tag{A.1}$$

Mit Hilfe der Gleichungen aus (4.39) ergeben sich die einzelnen Elemente der Matrizen, die noch auf die zeitdiskrete Form umgerechnet werden müssen:

$$A_z = \begin{pmatrix} -0.4061 & 0.319 & 0 & 0 \\ 8.7125 & -10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -6.7568 \end{pmatrix} \tag{A.2}$$

$$B_{1z} = \begin{pmatrix} -0.0697 & 0 \\ -1.03 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -2.1621 \end{pmatrix} \tag{A.3}$$

$$B_{2z} = \begin{pmatrix} 0.1471 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{A.4}$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} 0.5921 & 0.3203 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7812 \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} 2.7601 & -2.168 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$D_1 = \begin{pmatrix} -0.22 & 0 \\ 0 & -0.22 \end{pmatrix} \quad (\text{A.7})$$

$$D_2 = \begin{pmatrix} 0.4737 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$RR = \begin{pmatrix} 0.003 & 0 \\ 0 & 0.003 \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$ZG^{-1} = \begin{pmatrix} 0.0227 & 2.3807 \\ -2.3807 & 0.0227 \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Es ist sofort zu erkennen, dass sich der Rang der Matrizen von A und B_1 und C auf 3 reduziert, was dadurch erklärbar ist, dass die Schenkelpolmaschine eine Speziallösung des allgemeinen Synchronmaschinenmodells darstellt.

Anhand dieser Werte wurde das Modell im DSP berechnet.

Anhang B

Foto des Aufbaus

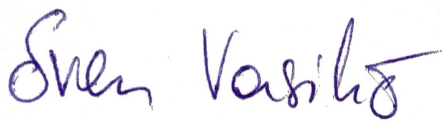


Abbildung B.1: Mobiler Aufbau der gesamten Testumgebung

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct, insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, am 8. März 2020



Sven Vasilic