Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

ESEA Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

DIPLOMARBEIT

Modellierung von spannungsbildenden Umrichtern bei unsymmetrischen Netzfehlern und Prüfung der Auswirkung auf Netzschutzfunktionen

(Modelling of inverters in voltage control mode under unsymmetrical fault conditions and testing the impact on grid protection functions)

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang GAWLIK
und
Dipl.-Ing. Benjamin COX

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Maximilian ORTNER, BSc
e1326323

Wien, im März 2019

Kurzfassung

Mit der derzeit immer weiterwachsenden Anzahl an Windkraftanlagen wird auch der Abtransport und die Übertragung der erzeugenden Energie immer mehr zum Thema. Eine spezielle Herausforderung stellt hierbei die Anbindung von Offshore-Windparks an das bestehende Verbundnetz dar. Eine effiziente und verlustarme Möglichkeit zu so einer Anbindung über eine relativ große Entfernung stellen Hochspannungs- Gleichstromübertragungen (HGÜ) dar.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden zwei Modelle für spannungseinprägende Wechselrichter zur Verwendung in HGÜ- Kopfstationen mit Hilfe von MATLAB-SIMULINK modelliert. Ein Modell stellt die windparkseitige Kopfstation mit Bildung eines Drehstrominselnetzes dar. Das zweite Modell stellt die landseitige Kopfstation dar, die mit dem Verbundnetz gekoppelt ist. Beide Modelle wurden als geregelte ideale Spannungsquellen mit Innenwiderstand modelliert. Ziel war es die Modelle so einfach wie möglich zu halten und damit nur wenige Einflussparameter in Form von Regelparametern zu bekommen. Die Modelle wurden auf ihr Verhalten in verschiedenen Netzsituation und bei verschiedenen Fehlerfällen hin untersucht. Zuletzt wurden noch die Auswirkungen auf Netzschutzfunktionen bei Einspeisung der modellierten Wechselrichter untersucht.

Abstract

With the growing number of wind turbines, the transmission of generated energy is becoming more and more an issue. A special challenge here is the connection of offshore wind farms to the existing grid. An efficient and low-loss option for such a connection over a relatively long distance is high-voltage direct current (HVDC) transmission. In the course of this diploma thesis, two models of voltage sourced inverters for use in HVDC headends were modeled using MATLAB-SIMULINK. One model represents the wind farm-side head station with the formation of a three-phase island network. The second model represents the shore-side head station, which is coupled to the interconnected grid. Both models were modeled as regulated ideal voltage sources with internal resistance. The aim was to keep the models as simple as possible and thus to get only a few influencing parameters in the form of control parameters. The models were examined for their behavior in different network situations and in different error cases. Finally, the effects on grid protection functions when feeding the modeled inverters were investigated.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Stromeinprägende Wechselrichter 1

1.3 Spannungseinprägende Wechselrichter 1

1.4 Hochspannungs Gleichstromübertragung (HGÜ) 2

2 Modellbeschreibung **3**

2.1 Wechselrichtermodell im Inselbetrieb 3

2.1.1 Gesamtsystem 3

2.1.2 Spannungsregler 6

2.1.3 Strombegrenzung 8

2.2 Wechselrichtermodell im netzgekuppelten Betrieb 9

2.2.1 Gesamtmodell 9

2.2.2 Stromregler 11

2.2.3 Wirkleistungsregler 13

2.2.4 Spannungs- und Blindleistungsregler 15

3 Modellvalidierung **17**

3.1 Inselbetrieb 17

3.1.1 Verhalten bei Wirkleistungsvorgaben 17

3.1.2 Verhalten bei unsymmetrischer Last 18

3.2 Netzgekuppelter Betrieb 20

3.2.1 Verhalten bei Wirkleistungsvorgaben 20

3.2.2 Verhalten bei Blindleistungsvorgaben 25

3.2.3 Verhalten bei Frequenzvorgaben 26

3.2.4 Verhalten bei Frequenzabweichungen des Netzes 28

3.2.5 Verhalten bei unsymmetrischem Netz 30

4 Auswirkungen der Regelparameter auf das Verhalten der Modelle 35

4.1 Inselbetrieb 35

4.1.1 Einfluss der Parameter des Spannungsreglers 35

4.1.2 Einfluss der Konstanten I_{beg} auf das Verhalten im Fehlerfall 37

4.2 Netzgekuppelter Betrieb 40

4.2.1 Einfluss der Parameter der Leistungsregler 40

4.2.2 Einfluss der Parameter des Stromreglers 43

5 Verhalten der Modelle im Fehlerfall 45

5.1 Inselbetrieb 45

5.1.1 1 poliger Fehler 45

5.1.2 2 poliger Fehler mit Erdberührung 46

5.1.3 2 poliger Fehler ohne Erdberührung 48

5.1.4 3 poliger Fehler 50

5.2 Netzgekuppelter Betrieb 50

5.2.1 1 poliger Fehler 50

5.2.2 2 poliger Fehler mit Erdberührung 51

5.2.3 2 poliger Fehler ohne Erdberührung 52

5.2.4 3 poliger Fehler 53

6 Auswirkungen der Wechselrichtermodelle auf Netzschutzfunktionen 56

7 Zusammenfassung und Ausblick 59

1 Grundlagen

1.1 Motivation

Die immer größer werdende Einspeisung durch erneuerbare Energien in das Stromnetz bietet neue Herausforderungen. Den größten Anteil stellt hierbei die Erzeugung von Strom durch Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen. Diese Technologien verfügen zumeist über keine rotierenden elektrischen Maschinen sondern über Leistungselektronische Wechselrichter[7].
Zurzeit dominieren in den Netzen noch Einspeisungen durch Synchronmaschinen. Die Wechselrichter der dezentralen Erzeugungsanlagen müssen daher keinen Beitrag zur Netzbildung leisten. Sie müssen sich nur auf ein vorhandenes Netz synchronisieren und können dann Leistung abgeben, indem sie einen Strom einprägen. Diese Art von Wechselrichter verhalten sich also wie Stromquellen. Dominieren in einem Netz Leistungselektronische Einspeisungen, beziehungsweise sind nur noch solche vorhanden, müssen diese die Netzspannung bilden, sowie Momentanleistungsreserve bereitstellen. Diese Wechselrichter wirken demnach als Spannungsquellen. Diese Aufgaben entsprechen denen, die in heutigen Netzsituationen rotierende Maschinen übernehmen [1, 3].

1.2 Stromeinprägende Wechselrichter

Bei stromeinprägenden Wechselrichtern handelt es sich um Brückenschaltungen mit nicht abschaltbaren Ventilen (Thyristoren). Thyristoren bleiben nach einem Zündimpuls solange Leitfähig bis in der Netzspannung ein Nulldurchgang auftritt. Aus diesem Grund muss die Ausgangsspannung des Umrichters nach dem Zünden des Thyristors der Netzspannung folgen. Diese Schaltungen benötigen somit immer ein vorhandenes Netz um Leistung abgeben bzw. aufnehmen zu können und sind somit für die Bildung von Inselnetzen (z.B. Windparknetze) ungeeignet [5].

1.3 Spannungseinprägende Wechselrichter

Bei spannungseinprägenden Wechselrichtern handelt es sich um Brückenschaltungen mit abschaltbaren Ventilen. Bei diesen Ventilen handelt es sich derzeit hauptsächlich um IBGT's (Insulated Gate Bipolar Transistor) und GTO's (Gate Turn off Thyristor) [9]. Durch das schnelle Schalten dieser Ventile und durch die spätere Glättung des Ausgangssignals wird aus einer Gleichspannung ein sinusförmiges Signal erzeugt. Um die notwendige Spannung zur Anbindung solcher

Wechselrichter zur Anbindung an das Höchstspannungsnetz zu erreichen werden, mehrere IGBT Module in Serie geschaltet. Um eine hohe Stromtragfähigkeit zur Übertragung größer Leistungen zu erreichen, werden mehrere dieser IGBT Module parallelgeschaltet. Somit entsteht eine Art Matrix von einzelnen IGBT Module die einen Strang des Wechselrichters bilden. Der Vorteil der Abschaltbaren Ventile liegt darin, dass ein aus ihnen gebildeter Wechselrichter kein Netz benötigt um ein 3 phasiges Drehstromnetz zu erzeugen. Die Höhe der Ausgangsspannung, sowie die Frequenz kann durch die Regelung frei bestimmt werden. Damit können diese Art von Wechselrichtern Inselnetze, zum Beispiel zur Anbindung von Offshore- Windparks über eine Gleichstromverbindung, bilden [9, 6].

1.4 Hochspannungs Gleichstromübertragung (HGÜ)

Eine Hochspannungsgleichstrom Übertragung (HGÜ) stellt die Verbindung zweier Punkte in einem oder 2 verschiedener Drehstromnetze mit Hilfe von Gleichstrom her. Die Vorteile einer Gleichstromverbindung liegen in den geringeren Verlusten der Übertragung da nur die resistiven Anteile der Leitungsimpedanz zur Wirkung kommen. Zudem ist für eine Gleichstromübertragung keine Blindleistung notwendig. Es wird somit nur Wirkleistung übertragen. Um eine HGÜ an das Drehstromnetz anzubinden werden zwei sogenannte Kopfstationen benötigt. Diese Kopfstationen bestehen aus Wechsel- bzw. Gleichrichter, die das vorhandene Drehstromsystem gleichrichten und nach der Übertragung wieder zu einem Drehstromsystem wechselrichten. Die Modellierung dieser Wechselrichter zur Verwendung in HGÜ- Kopfstationen ist Gegenstand dieser Arbeit.

2 Modellbeschreibung

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde sowohl ein Wechselrichtermodell für den Inselbetrieb, sowie ein netzgekuppeltes Wechselrichtermodell erstellt. Diese beiden Modelle sollen jeweils eine der beiden Kopfstationen einer Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), die einen Offshore- Windpark mit dem Festland verbindet, simulieren. Das netzgekuppelte Wechselrichtermodell stellt dabei die landseitige mit dem Drehstromübertragungsnetz gekuppelte Station einer HGÜ Übertragung dar. Das Wechselrichtermodell im Inselbetrieb stellt die seeseitige Verbindung der HGÜ mit einem Windpark dar. Um diesen Windpark in Betrieb nehmen zu können muss dieser Wechselrichter imstande sein ein Drehstrom- Inselnetz aufzubauen. Auf dieses Netz synchronisieren sich die Umrichter, der meist Vollumrichter betriebenen Windkraftanlagen (WEA).

2.1 Wechselrichtermodell im Inselbetrieb

2.1.1 Gesamtsystem

In der folgenden Abbildung ist das elektrische Gesamtsystem des entwickelten Simulink- Modells dargestellt. Auf der rechten Seite befindet sich der Spannungsregler. Diesem können Sollfrequenz und Sollspannung, beziehungsweise gewünschte Frequenz- und Spannungsverläufe vorgegeben werden. Zudem werden dem Spannungsregler die Ist- Spannung, sowie das Signal der Strombegrenzung zugeführt. Das Ausgangssignal des Spannungsreglers wird dem elektrischen Teil des VSC (Abbildung 2.1) zugeführt. Am Ausgang des VSC sind zwei Leitungsstücke, die mittels PI- Ersatzschaltung nachgebildet werden, geschaltet. Zwischen diesen beiden Leitungsstücken befindet sich der Fehlerblock. Mit Hilfe dieser Anordnung ist es möglich, den Fehlerort auf der Leitung zwischen 0% und 100% auf der Leitungslänge zu variieren. Die Parameter dieser Leitung sind in Tabelle 2.1 zu sehen. Als Last dienen in dieser Anordnung ohmsch-induktive Drehstromlasten, die mit Hilfe von Schaltern geschaltet werden können. Damit ist es möglich, verschiedene Lastfälle, sowie Laständerungen zu simulieren. Die beiden Blöcke B1 und B2 dienen zur Erfassung des Strom- und Spannungsverlaufes an der jeweiligen Stelle der Leitung.

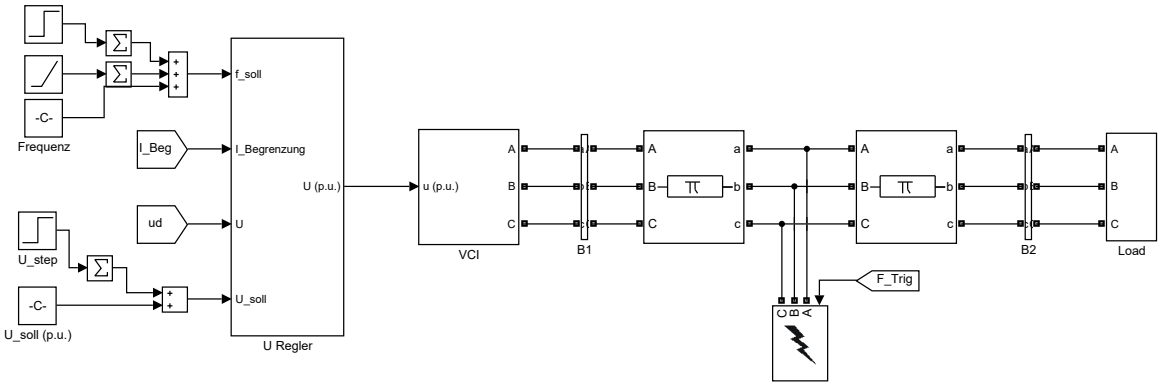


Abbildung 2.1: elektrisches Gesamtsystem mit Spannungsregler

Das elektrische System des VSC ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Dieses besteht aus einer Anpassung des Signalpegels und drei idealen einphasigen Spannungsquellen, die ein Drehstromsystem gemäß ihrer Anspeisung aus dem Spannungsregler erzeugen. Des Weiteren befindet sich die Koppelinduktivität in diesem Block. Diese Koppelinduktivität dient als Innenwiderstand des der Spannungsquelle.

$R'^{(1)}$	0,115 Ω/km	$R'^{(0)}$	0,413 Ω/km
$L'^{(1)}$	0,105 mH/km	$L'^{(0)}$	3,32 mH/km
$C'^{(1)}$	11,33 nF/km	$C'^{(0)}$	5,01 nF/km

Tabelle 2.1: Parameter der Leitung

$$L_k = 10mH \tag{2.1}$$

$$Z_k = \omega * L_k = 3,14\Omega \tag{2.2}$$

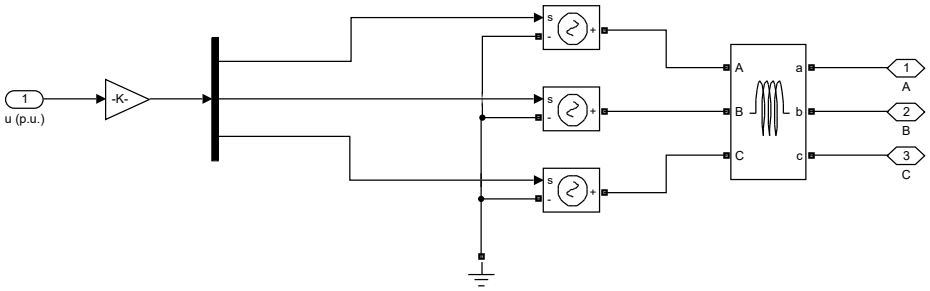


Abbildung 2.2: gesteuerte Spannungsquelle

In Abbildung 2.3 ist der Berechnungsblock dargestellt. Dieser Block führt die Normierung aller verwendeten Größen in das per unit System durch. Des Weiteren wir die aktuelle Frequenz im Netz wird mit Hilfe einer PLL bestimmt. Aus den Strömen und Spannungen an den Klemmen des Wechselrichters (Bus B1) werden verschiedene Größen zur Regelung berechnet:

- die vom Wechselrichter abgegebene Wirk- sowie Blindleistung
- durch die d-q Transformation wird u_d, u_q sowie der Betrag der Summe (u_{meas}) der beiden Spannungen gebildet
- durch die d-q Transformation wird i_d, i_q sowie der Betrag der Summe (i_{meas}) der beiden Ströme gebildet

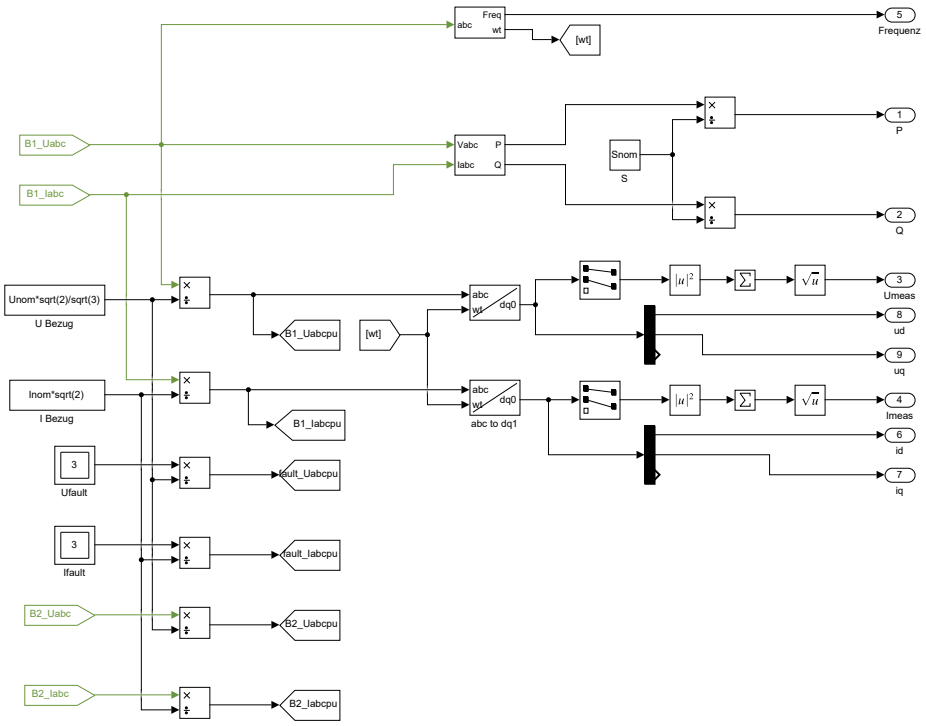


Abbildung 2.3: Berechnungen und Normierungen

2.1.2 Spannungsregler

In der folgenden Abbildung 2.4 ist der Aufbau des Spannungsreglers ersichtlich. Dem Spannungsregler-Block werden folgende Größen zugeführt:

- Sollspannung in p.u.
- d-Komponente der gemessenen Spannung
- Sollfrequenz der Ausgangsspannung
- Signal der Strombegrenzung (3-phasig)

Die Regelabweichung wird durch die Subtraktion der gemessenen Spannung von der Sollspannung ermittelt. Das Signal der Strombegrenzung ist dreiphasig. Ist die Strombegrenzung nicht aktiv, so haben alle drei Signale den Wert 1. Wird die Strombegrenzung aktiv, so sinkt der Signalwert in der jeweiligen Phase auf einen Wert zwischen 0 und 1. Während die Strombegrenzung in einer oder auch mehreren Phasen aktiv ist, muss die Spannungsregelung blockiert werden [7]. Dies

geschieht dadurch, dass das Minimum aus allen 3 Strombegrenzungssignalen gebildet wird. Ist das Minimum größer als 0.99, so ist die Strombegrenzung nicht aktiv und die berechnete Regelabweichung wird an den PI Regler weiter geleitet. Ist dies nicht der Fall, so ist die Strombegrenzung aktiv und das Eingangssignal des PI-Reglers wird auf 0 gesetzt. Auf den PI- Regler folgt ein PT1-Glied, um das Regelverhalten, bei zum Beispiel hohem Proportionalanteil, zusätzlich zu verzögern und dadurch einen weiteren Parameter bei der Einstellung des dynamischen Verhaltens der Spannungsregelung zu gewinnen. Die Standardwerte der Regelparameter des Spannungsreglers sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Da sich der Wechselrichter in dieser Modellkonfiguration im Inselbetrieb befindet und somit die einzige elektrische Quelle im System darstellt, ist der Nullphasenwinkel der Spannung frei wählbar. Aus diesem Grund genügt es, die Stellgröße für den Wechselrichter als reine d- Spannung anzunehmen. Die Spannung in q- Richtung, sowie die Nullspannung werden zu 0 gesetzt.
Diese 3 Signale (dq0- Spannung) werden zu einem dreidimensionalen zusammengefasst und dem Transformationsblock zugeführt, der die Spannung im d-q System zu einer 3 phasigen harmonischen Spannung transformiert. Zur Transformation ist das Zeitsignal ωt notwendig. Dieses wird aus der Sollfrequenzvorgabe durch Multiplikation mit 2π und anschließendes aufintegrieren gebildet. Auf diese Weise können auch zeitveränderliche Frequenzen berücksichtigt werden. Dabei befindet sich der Integrator im sogenannten „Wrap“ Modus, in welchem sich das Ausgangssignales auf den Bereich zwischen $-\pi$ und π beschränkt. Um eine Strombegrenzung zu erreichen, wird jede der 3 Phasen einzeln mit dem jeweiligen Signal der Strombegrenzung multipliziert. Dadurch wird bei aktiver Strombegrenzung die Spannung und damit auch der Strom in der überlasteten Phase verkleinert. Der Block „Loop Breaker“ dient dazu algebraische Schleifen in der Simulation aufzulösen. Bei dem Block handelt es sich um ein PT1 Glied mit einer sehr kurzen Zeitkonstante nahe der Abtastzeit.

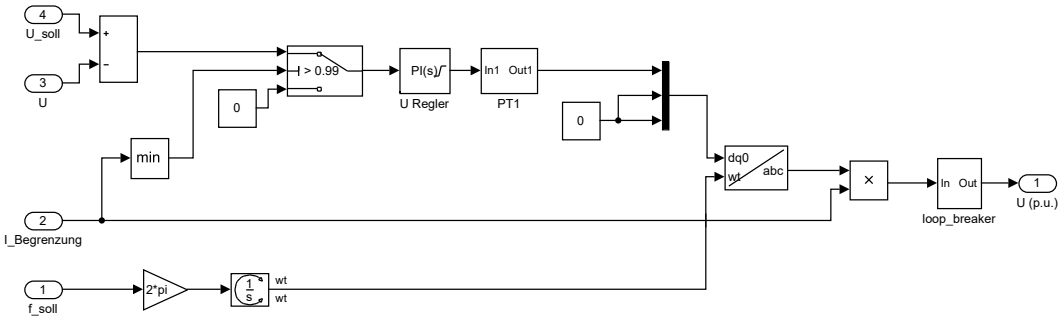


Abbildung 2.4: Spannungsregler Inselbetrieb

	P	I	PT1
U- Regler	1	40	50

Tabelle 2.2: Reglerparameter Spannungsregler Inselbetrieb

2.1.3 Strombegrenzung

In der folgenden Abbildung 2.5 ist der Strombegrenzungsblock dargestellt. Dieser bildet aus den 3 Phasenströmen (I_{abc}), jeweils für jede Phase einzeln, den gleitenden Maximalwert des Stromes (Subsystem IPeakMovMax). Die 3 Maximalwerte der Ströme werden von dem eingestellten Strommaximum I_{max} subtrahiert. Das Ergebnis dieser Berechnung wird mit der Konstanten I_{beg} multipliziert (Verstärkerblock) und anschließend durch einen Sättigungsblock zwischen 0 und 1 begrenzt. Der Einfluss dieser Konstanten auf das Verhalten im Fehlerfall wird in Kapitel 4.1.2 näher betrachtet. Die drei daraus entstehenden Signale werden mit der jeweiligen Phasenspannung multipliziert. Ist das Ausgangssignal der Strombegrenzung 1 so hat diese keine Wirkung auf die Ausgangsspannung. Ist das Ausgangssignal kleiner als 1 so wird die Spannung in der jeweiligen Phase um diesen Faktor verringert. Der Schalter im Strombegrenzungsblock dient dazu, die Strombegrenzung via MATLAB Variable softwaremäßig ein und aus zu schalten.

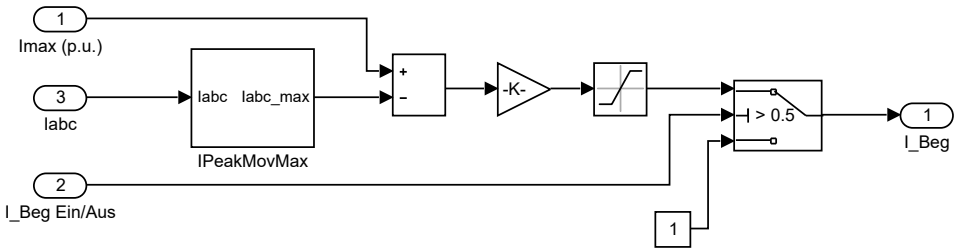


Abbildung 2.5: Strombegrenzung

Die Berechnung des Maximalwertes des Stromes geschieht über eine gleitende Maximal- beziehungsweise Minimalwertbildung für jeden Phasenstrom einzeln. Die Blöcke „Moving Maximum“, beziehungswiese „Moving Minimum“ bilden innerhalb eines Fensters den maximalen/minimalen Wert des Eingangssignales. Diese Fensterlänge ist im Allgemeinen frei wählbar, sollte allerdings im Bereich der Periodendauer des harmonischen Stromes liegen. Da der absolute Spitzenwert des Stromes gesucht ist, ist es unerheblich ob dieser in die positive oder negative Richtung auftritt. Die negativen Ausgangswerte der Moving Minimum Blöcke

werden mit -1 multipliziert und damit positiv gemacht. Anschließend werden diese Werte mit den Ausgangswerten der Moving Maximum Blöcke verglichen und der größere der beiden Werte weitergeleitet.

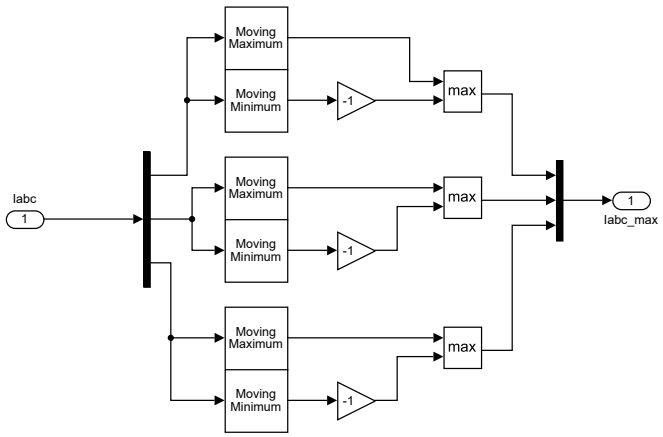


Abbildung 2.6: gleitende Maximalwertbildung des Stromes

2.2 Wechselrichtermodell im netzgekuppelten Betrieb

2.2.1 Gesamtmodell

In Abbildung 2.7 ist das elektrische Gesamtsystem im netzgekuppelten Betrieb dargestellt. Das elektrische System des Wechselrichters ist identisch zum elektrischen System des Wechselrichters im Inselbetrieb. Auf der rechten Seite ist das Modell des übergeordneten Netzes zu sehen mit dem der Wechselrichter gekuppelt ist. Der Wechselrichter und das übergeordnete Netz sind über eine 100km lange Kabelverbindung gekuppelt. Dieses Kabel ist, gleich wie beim Inselnetz, in 2 Abschnitte aufgeteilt, um den Fehlerort frei variieren zu können. Aus diesem Grund befindet sich die schaltbare Fehlerstelle zwischen den beiden Abschnitten der Verbindungsleitung. Das Kabel selbst ist im π- Ersatzschaltbild modelliert und besitzt die in Tabelle 2.1 angegebenen Parameter.
Das übergeordnete Netz kann in Frequenz und Amplitude frei verändert werden. Dazu dienen die Sprung- und Rampenfunktionen, die an den Anschlüssen „Magnitude“ und „Freq“ des Netzes angeschlossen sind. Die Amplitude des Netzes kann insgesamt in seiner Größe und in jeder Phase einzeln erhöht und erniedrigt werden. Die Änderung der Amplitude kann sprunghaft oder in Form einer Rampenfunktion mit definiertem Gradienten erfolgen. Durch dies bietet sich die Möglichkeit verschiedene symmetrische, wie auch unsymmetrische Zustände im

übergeordneten Netz zu simulieren und die Reaktion des Wechselrichters darauf zu überprüfen. Die Frequenz kann ebenso wie die Amplitude sprunghaft sowie mit einer Rampenfunktion mit definiertem Gradienten verändert werden. Daraus kann die Reaktion des Wechselrichters auf verschiedene Lastzustände im Netz simuliert werden.

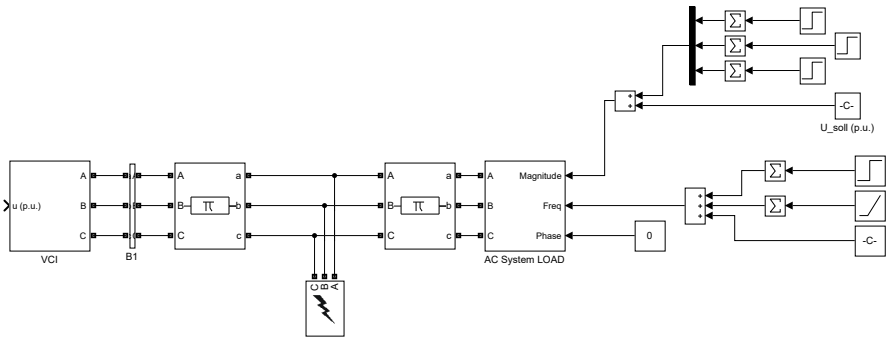


Abbildung 2.7: elektrisches Gesamtsystem netzgekuppelt

Alle im Modell verwendeten Regler Blöcke, sowie deren Zusammenschaltung sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Der Wirkleistungsregler (P Regler), sowie der Blindleistungs- und Spannungsregler (Q/U Regler) sind dem Stromregler (I Regler) übergeordnet. Der Wirkleistungsregler erhält von als Eingangsgrößen die aktuell vom Wechselrichter angegebene Wirkleistung (P) , die Sollwirkleistung, und das Signal der Strombegrenzung (I_{BEG}). Als Ausgangsgröße berechnet der Wirkleistungsregler den Sollstrom in d- Richtung der dem unterlagertem Stromregler übergeben wird. Die Sollwertvorgabe für die Wirkleistung kann durch eine Sprungfunktion sprungförmig verändert werden. Dadurch können beliebige Wirkleistungssprünge des Wechselrichters simuliert werden.
Da die Spannung und die Blindleistung nicht unabhängig voneinander geregelt werden können, wird für diese beiden Größen nur ein Regler verwendet. Der Spannungs- und Blindleistungsregler kann zwischen Blindleistungregelung und Spannungsregelung umgeschaltet werden. Zur Umschaltung zwischen den beiden Reglern existiert ein eigenes Eingangssignal (U>0/Q<0), das via Matlab Variable angesteuert werden kann. Die weiteren Eingangsvariablen des Blockes sind die an den Klemmen des Wechselrichters gemessene Spannung (U_{meas}), die Sollwertvorgabe für die Klemmenspannung, die gemessene Blindleistung (Q) an den Klemmen, die Sollwertvorgabe für die Blindleistung und das Signal der Strombegrenzung. Als Ausgangsgröße berechnet dieser Block den Sollstrom in q- Richtung der wiederum dem Stromregler übergeben wird. Die Sollwerte für Spannung und Blindleistung können sprungförmig in ihrer Größe verändert werden. Dadurch können sowohl Spannungssprünge und auch Blindleistungssprünge

des Wechselrichters simuliert werden.
Der Strombegrenzungsblock (I Begrenzung) dient zur Begrenzung des Ausgangsstromes des Wechselrichters auf den eingestellten Wert I_{max}. Die Eingangsgrößen sind der Betrag des Stromraumzeigers im dq-Koordinatensystem (I_{meas}), der Strom in allen 3 Phasen (I_{abc}), sowie ein Eingang durch den die gesamte Strombegrenzung via Matlab Variable aus- und eingeschaltet werden kann. Das Ausgangsignal des Strombegrenzungsblockes wird den anderen Regler Blöcken zugeführt um den Strom begrenzen zu können.
Der Stromregler Block verwendet die Sollwertvorgaben für den Strom, aus den beiden übergeordneten Reglern, den momentanen Stromraumzeiger (i_d & i_q), den momentanen Spannungsraumzeiger (u_d &u_q), die Kreisfrequenz und Zeit (ωt), sowie das Signal der Strombegrenzung um daraus die Spannung an den Spannungsquellen des Wechselrichters zu berechnen. Diese Spannung wird so geregelt, dass an den Klemmen des Wechselrichters genau die durch die Sollwertvorgaben eingestellte Wirkleistung und Blindleistung oder Spannung auftritt.

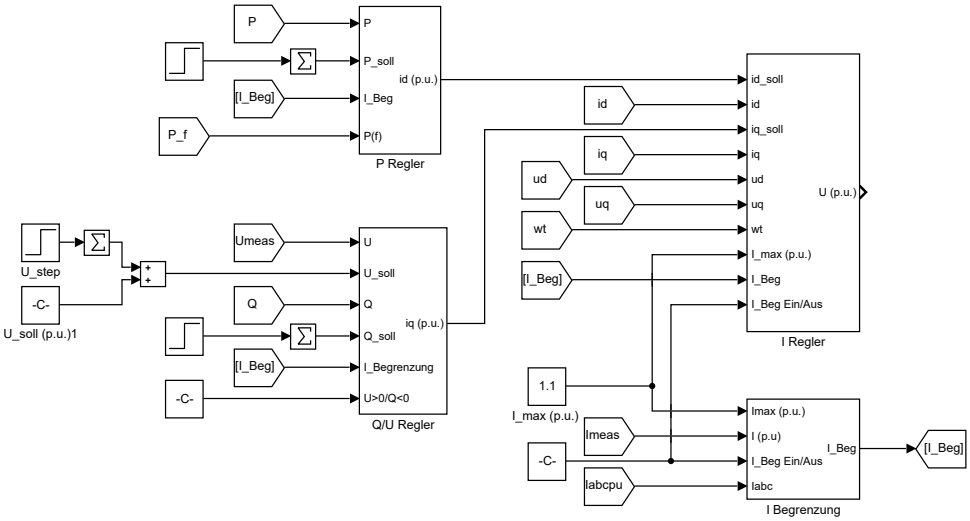


Abbildung 2.8: Regler netzgekuppelt

2.2.2 Stromregler

In Abbildung 2.9 ist der Stromregler des netzgekuppelten Wechselrichters dargestellt. Die Grundstruktur dieses Reglers ergibt sich aus Gleichung 2.3 und Gleichung 2.4. Diese beiden Gleichungen leiten sich aus der Systemgleichung für ein symmetrisches Drehstromsystem an der Kommutierungsinduktivität des Wechselrichters ab [10, 4].

$$u_{cd} = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_{d,soll} - i_d) - \omega L i_q + u_d \tag{2.3}$$

$$u_{cq} = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_{q,soll} - i_q) - \omega L i_d + u_q \tag{2.4}$$

Der Regler wurde anhand der beiden Systemgleichungen in Simulink modelliert. Aus den zuvor durch die Leistungsregler bestimmten Sollwerten für die d- und q- Komponente des Ausgangsstromes, sowie aus den aktuellen Werten des Ausgangsstromes (i_d & i_q) und der Klemmenspannung (u_d & u_q), wird die in die Spannungsquellen einzuprägende Spannung im dq- Koordinatensystem berechnet. Die 0- Komponente wird per Definition auf Null gesetzt. Mit Hilfe des Rücktransformationsblockes wird aus der Spannung im dq- Koordinatensystem und der Winkelinformation ωt das 3 phasige harmonische Spannungssignal erzeugt, dass die idealen Spannungsquellen anspeist. Der PT1- Block dient zur Auflösung von algebraischen Schleifen während der Simulation. Die Zeitkonstante dieses Blockes ist so klein eingestellt, dass dieser keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.
Die Begrenzung des Stromes geschieht durch zwei Begrenzungsblöcke im Pfad der Stromsollwerte deren Grenze durch den eingestellten Maximalstrom und das Signal der Strombegrenzung bestimmt ist. Tritt ein zu großer Strom an den Klemmen des Wechselrichters auf, wird die Strombegrenzung aktiv. Dadurch sinkt der eingestellte Grenzwert der Sollströme. Der Regler versucht darauf den Strom an den nun geringeren Sollwert anzupassen, indem er die Klemmenspannung senkt. Durch die kleinere Klemmenspannung wird der Strom in seiner Größe beschränkt.

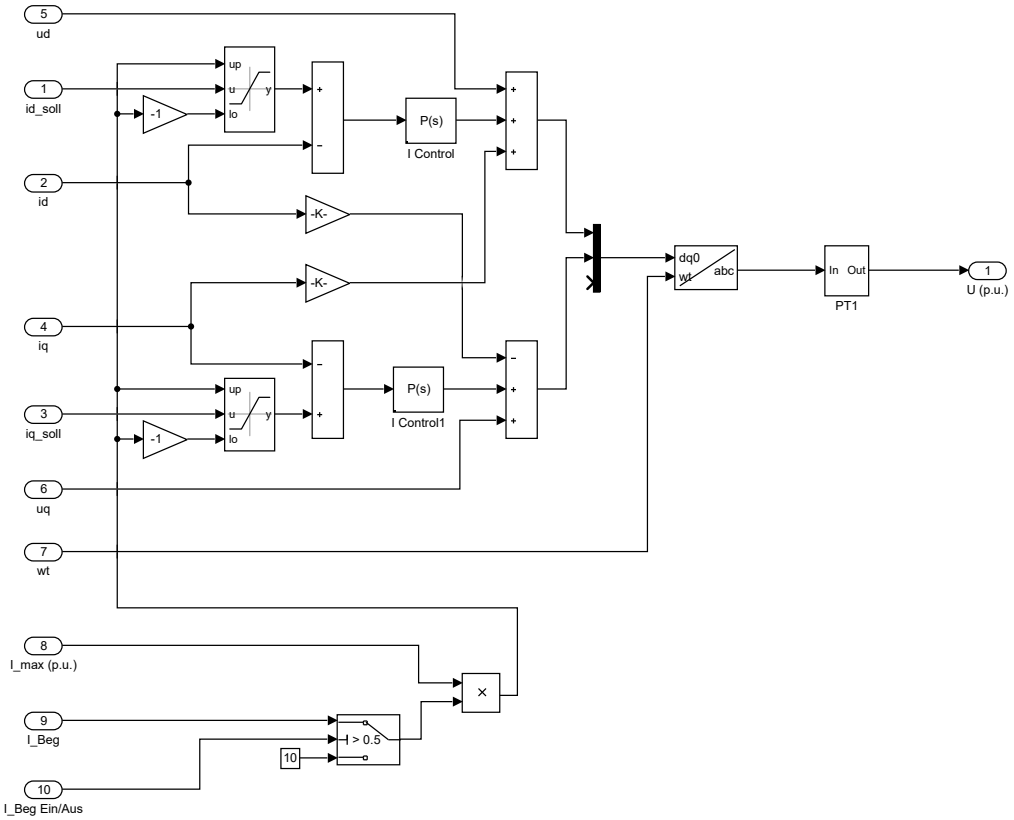


Abbildung 2.9: Stromregler netzgekuppelt

2.2.3 Wirkleistungsregler

Der Wirkleistungsregler ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Aus der aktuellen Wirkleistung (P) und der Sollwertvorgabe für die Wirkleistung (Psoll) wird durch Subtraktion die Regelabweichung gebildet. Die Sollwertvorgabe für die abgegebene bzw. aufgenommen Wirkleistung stammt bei den Simulationen von einem Matlab Skript. Würde man beide Wechselrichtermodelle zu einem Modell einer gesamten HGÜ verbinden, so würde diese Sollwertvorgabe durch die Leistungsaufnahme bzw. Leistungsabgabe des Wechselrichters im Inselbetrieb bestimmt werden. Aus der Regelabweichung wird zusätzlich im Block „Berechnung U_{DC}“ die Spannung im Gleichspannungszwischenkreis berechnet. Diese Berechnung ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Die Größe der Kapazität im Zwischenkreis kann frei über die Matlab Variable C_{ZK} bestimmt werden. Aus der Energieerhaltung (Formel 2.5) ergibt sich die Formel für die Zwischenkreisspannung (Formel 2.6).

$$\frac{C_{ZK}U_{DCsoll}^{2}}{2} + \int \Delta P(t)dt = \frac{C_{ZK}U_{DC}^{2}}{2} \tag{2.5}$$

$$U_{DC} = \sqrt{1 + \frac{2\int \Delta P(t)dt}{C_{ZK}}} \tag{2.6}$$

Die berechnete Zwischenkreisspannung wird nicht weiterverwendet, sondern dient derzeit nur zur Anschauung. In weiterer Folge könnte durch Verbindung der beiden Modelle eine HGÜ gebildet werden. Mit Hilfe der DC- Spannung und einem eigenem Regler könnte die Bilanz zwischen aufgenommener und abgegebener Wirkleistung ausgeglichen werden.

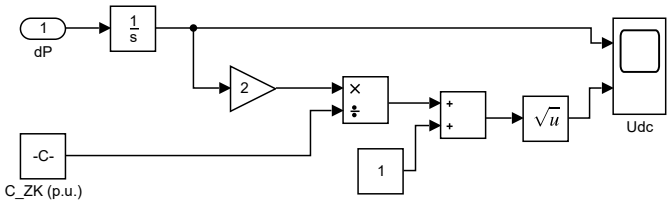


Abbildung 2.10: Berechnung Zwischenkreisspannung

Die Regelabweichung der Wirkleistung wird zu einem Schalter weitergeführt. Dieser schaltet die Regelabweichung zum eigentlichen PI-Regler durch sofern die Strombegrenzung nicht aktiv ist. Ist die Strombegrenzung aktiv, schaltet dieser Schalter den Wert 0 an den Eingang des PI- Reglers. Dies dient als Anti- Windup Maßnahme des Wirkleistungsreglers. Die Standardwerte der Parameter des PI- Reglers sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. Das PT1- Glied nach dem PI- Regler dient zur Lösung von Algebraischen Schleifen in der Simulation. Die Verzögerung dieses Blockes kann aber auch als zusätzlicher Regelparameter verwendet werden. Das Ausgangssignal des gesamten Wirkleistungsregler Blockes stellt den Sollwert der d- Komponente des Ausgangsstromes des Wechselrichters dar.

	P	I	PT1
P- Regler	1	40	100

Tabelle 2.3: Reglerparameter Wirkleistungsregler

Die Blockierung des Wirkleistungsregelblockes bei Strombegrenzung funktioniert mit Hilfe einer Wahrheitstabelle. Diese ist in Tabelle 2.4 dargestellt. Die Anti-

Wind- up Maßnahme ist nur aktiv wenn die Strombegrenzung aktiv ist und zusätzlich die Wirkleistung und die Regelabweichung das gleiche Vorzeichen besitzen. Die Erweiterung der Wahrheitstabelle um das Vorzeichen der Wirkleistung und Regelabweichung dient dazu, den PI- Regler wieder zu aktivieren, sobald eine Sollleistung gefordert wird die kleiner als die Maximalleistung ist.

I_{Beg}=1	P>0	dP>0	Anti-wind up aktiv
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Tabelle 2.4: Wahrheitstabelle Anti- Wind- up

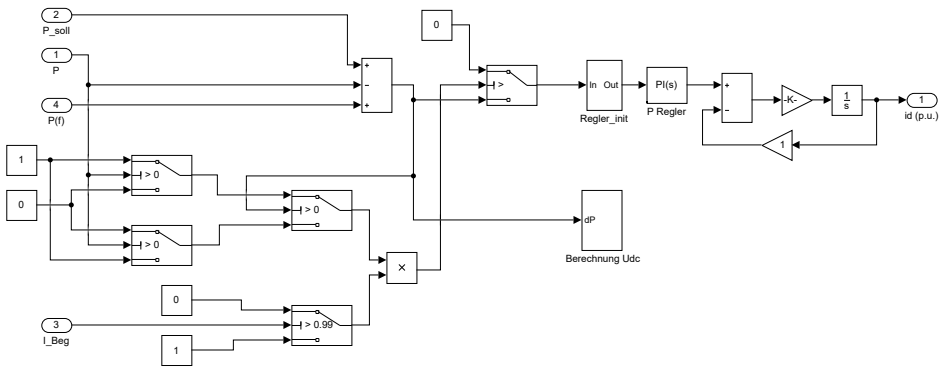


Abbildung 2.11: Wirkleistungregler

2.2.4 Spannungs- und Blindleistungsregler

Der Spannungs- und Blindleistungsregelblock ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Zuerst wird aus der aktuellen Spannung an den Klemmen des Wechselrichters und der Spannungssollwertvorgabe, sowie aus der aktuellen Blindleistung und der Blindleistungsvorgabe jeweils die Regelabweichung gebildet. Je nachdem ob die Spannung oder die Blindleistung geregelt werden soll, wird eine der beiden Regelabweichungen über einen Schalter weitergeleitet. Ein weiterer Schalter schaltet die Regelabweichung bis zum eigentlichen Regler durch, sofern die Strombegrenzung nicht aktiv ist. Ist die Strombegrenzung aktiv, so wird als Anti- Wind- up

Maßnahme der Wert 0 weitergeleitet. Beim eigentlichen Reglerblock handelt es sich um einen PI- Regler. Die Standardwerte der Regelparameter sind in Tabelle 2.5 angegeben. Zwischen den beiden Parametersätzen für Spannungs- bzw. Blindleistungsregelung wird automatisch umgeschaltet. Das PT1- Glied am Ausgang des Blockes dient zur Auflösung von algebraischen Schleifen kann aber auch als zusätzlicher Regelparameter verwendet werden.

	P	I	PT1
Q- Regler	1	40	50
U- Regler	1	100	50

Tabelle 2.5: Reglerparameter Spannungs- und Blindleistungsregler

Die Blockierung des Blockes bei Strombegrenzung geschieht gleich wie beim Wirkleistungsregler (Kapitel 2.2.3) Das Ausgangssignal des gesamten Blockes stellt den Sollwert der q- Komponente des Ausgangsstromes des Wechselrichters dar.

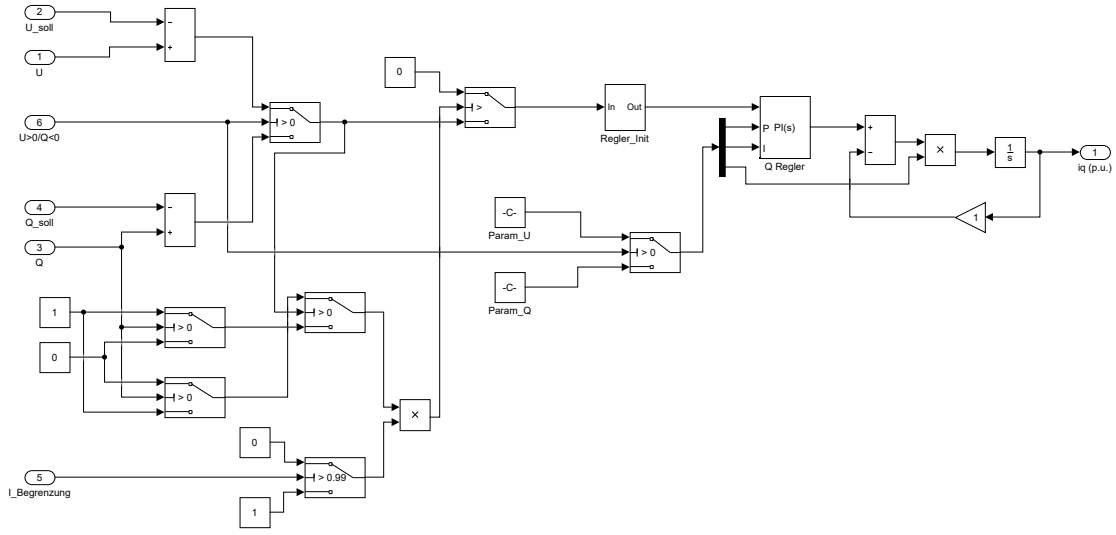


Abbildung 2.12: Spannungs- und Blindleistungsregler

3 Modellvalidierung

3.1 Inselbetrieb

3.1.1 Verhalten bei Wirkleistungsvorgaben

Zur Validierung des Wechselrichter- Modells wurden verschiedene Lastsprünge aufgeschaltet. In Abbildung 3.1 ist die Reaktion des Modells auf einen Lastsprung auf 50% Nennleistung und anschließend auf 100% Nennleistung zu sehen. Da es sich um einen spannungs- geregelten Wechselrichter handelt, stellt sich der Strom auf den für die Last benötigten Wert ein und die Spannung bleibt auf ihrem konstanten Wert von 100% Un. Alle in diesem Kapitel gezeigten Srom- und Spannungsverläufe wurden am Bus B1 (Abbildung 2.1) an den Klemmen de Wechselrichters aufgenommen.

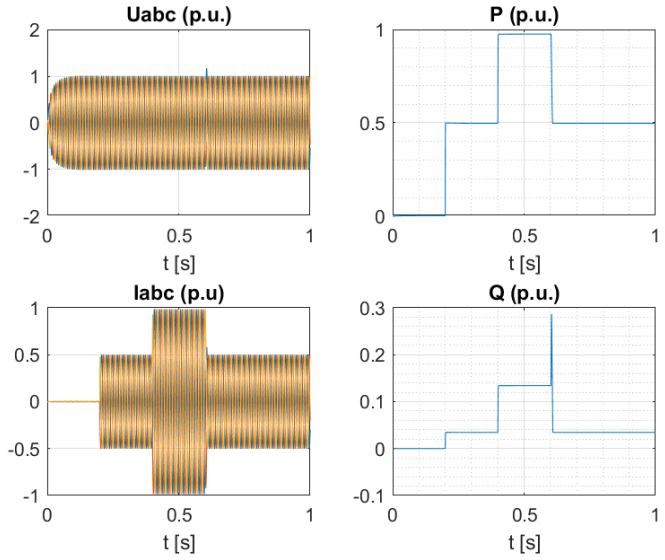


Abbildung 3.1: Lastsprünge ohne Strombegrenzung Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1)

In Abbildung 3.2 ist der gleiche Lastverlauf, nur jetzt mit einem Lastsprung auf ±150% Nennleistung, zu sehen. Die Simulation wurde einmal mit ausgeschalteter und einmal mit eingeschalteter Strombegrenzung durchgeführt. Sobald der Strom über den Wert des Maximalstromes ansteigt, der hier genau in Höhe des Nennstromes angenommen wird, wird die Strombegrenzung aktiv und regelt die

Klemmenspannung des VSC soweit zurück, dass nur der eingestellte Maximalstrom fließen kann.

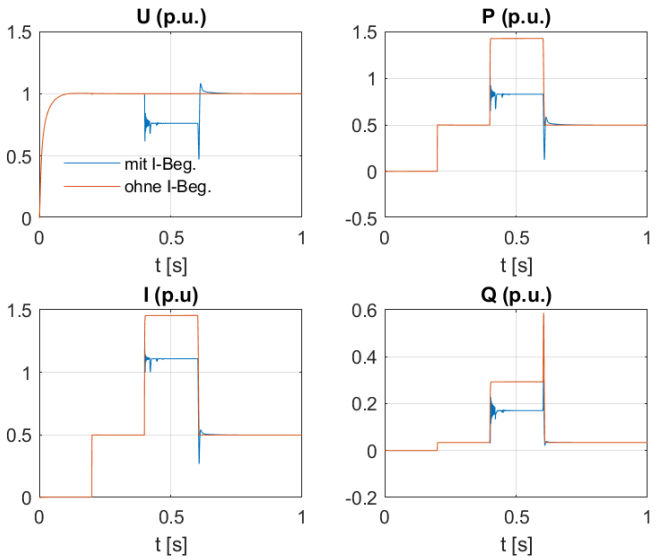


Abbildung 3.2: Lastsprünge mit Strombegrenzung Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1)

3.1.2 Verhalten bei unsymmetrischer Last

In Abbildung 3.3 ist das Verhalten des Wechselrichtermodells bei unsymmetrischer Belastung in einer Phase dargestellt. Zu Beginn der Simulation befindet sich das System im eingeschwungenen Zustand mit einer abgegebenen Wirkleistung von 50% der Nennleistung. Zum Zeitpunkt 0,5s wird in der Phase L1 eine zusätzliche ohmsche Belastung gegen Erde hinzugeschaltet. Durch diese zusätzliche Last steigt der Strom in der betreffenden Phase an. Der Strom in den beiden übrigen Phasen sinkt leicht ab. Die Spannung in der nun höher belasteten Phase sinkt ab, da mehr Strom fließt. Die Spannung in den beiden übrigen Phasen bleibt konstant auf Nennspannung. Da die einzelnen Phasenspannungen nur gemeinsam geregelt werden, reagiert der Spannungsregler nicht und die Spannung in der höher belasteten Phase bleibt kleiner.

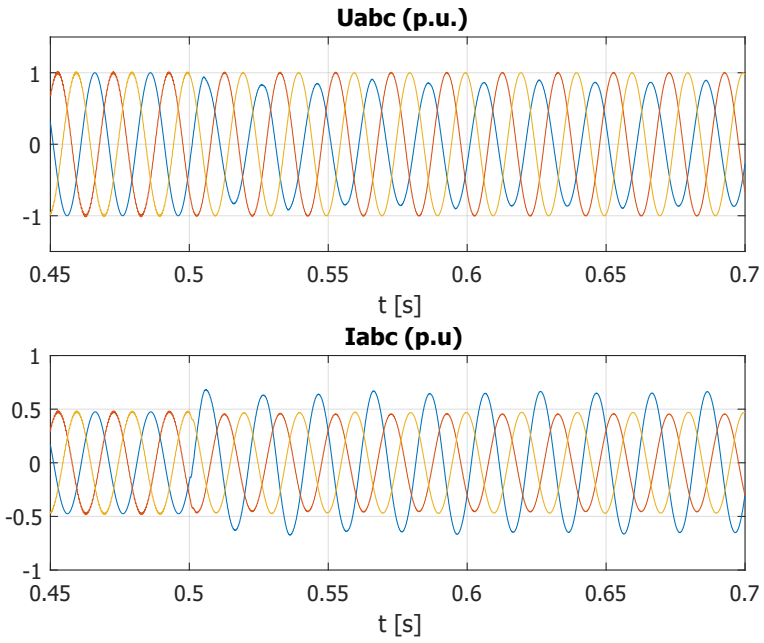


Abbildung 3.3: Unsymmetrische Last 1 phasig Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1)

In Abbildung 3.4 ist das Verhalten des Wechselrichtermodells bei zuschalten von einer unsymmetrischen Belastung in 2 Phasen dargestellt. Der Strom in den beiden höher belasteten Phasen steigt an, allerdings nicht um den gleichen Wert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil des Stromes in einer Phase der unsymmetrischen Last durch den gemeinsamen Sternpunkt in der anderen Phase zurückfließt. Der Strom in der dritten Phase sinkt leicht ab. Die Spannungen Verhalten sich umgekehrt proportional zu den Strömen. In der Phase mit dem größten Strom tritt die kleinste Spannung auf. Die Spannung in der nicht zusätzlich belasteten Phase bleibt konstant auf Nennspannung.

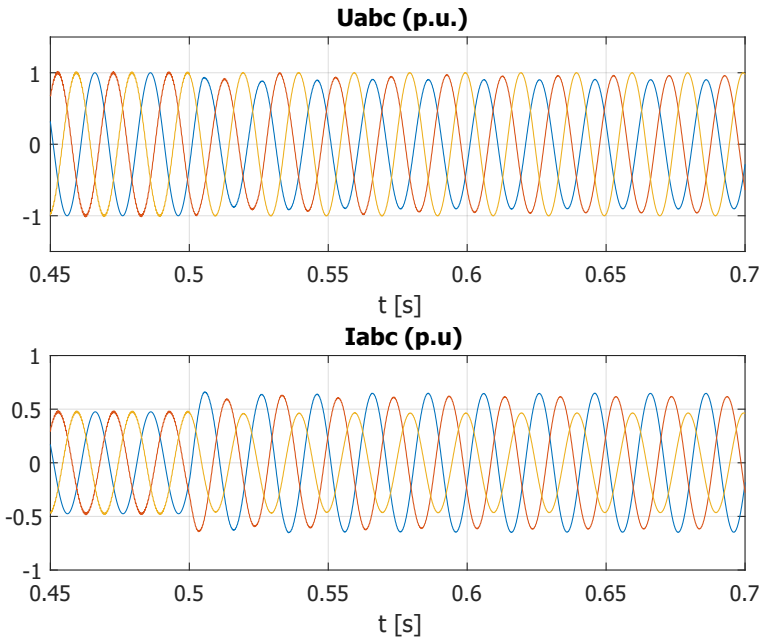


Abbildung 3.4: Unsymmetrische Last 2 phasig Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1)

3.2 Netzgekuppelter Betrieb

Zur Validierung des Modells werden verschiedene Sollwertvorgaben und die stetige, sowie sprunghafte Veränderung dieser simuliert. Des Weiteren wird die Reaktion des Modells auf verschiedene Zustände im gekuppelten starren Netz überprüft. In diesem werden sowohl Veränderungen der Frequenz als auch symmetrische, sowie unsymmetrische Veränderungen der Spannung simuliert.

3.2.1 Verhalten bei Wirkleistungsvorgaben

In Abbildung 3.5 ist der Verlauf von Strom und Spannung in bezogenen Größen im dq- Koordinatensystem, der Verlauf der Frequenz des Wechselrichters, sowie der Verlauf der berechneten Spannung im Gleichspannungskreis des Wechselrichters dargestellt. Zu den in Tabelle 3.1 angegebenen Zeitpunkten wird ein Sprung auf den angegebenen Wert des Wirkleistungsollwertes aufgeschaltet.
Da auf eine konstante Spannung von 100% U_N geregelt wird, bleibt die Spannung trotz veränderter Leistungsabgabe konstant. Nur zu den Zeitpunkten an denen eine Veränderung der Wirkleistungsvorgabe auftritt, weicht die Spannung kurz

t [s]	0,5	1	1,5	2	2,5
P_{soll} [p.u]	0,5	0,7	0.3	0.7	0.2

Tabelle 3.1: Wirkleistungssollwerte

von ihrem Sollwert ab. Dann greift der Spannungsregler ein und bringt den Wert der Spannung zurück auf den eingestellten Sollwert. Der Strom folgt mit der durch die Regelparameter bestimmten Dynamik der Sollwertvorgabe der Leistung. Die Veränderung des Verhaltens bei Änderung der Regelparameter wird in Kapitel 4 näher beschrieben.

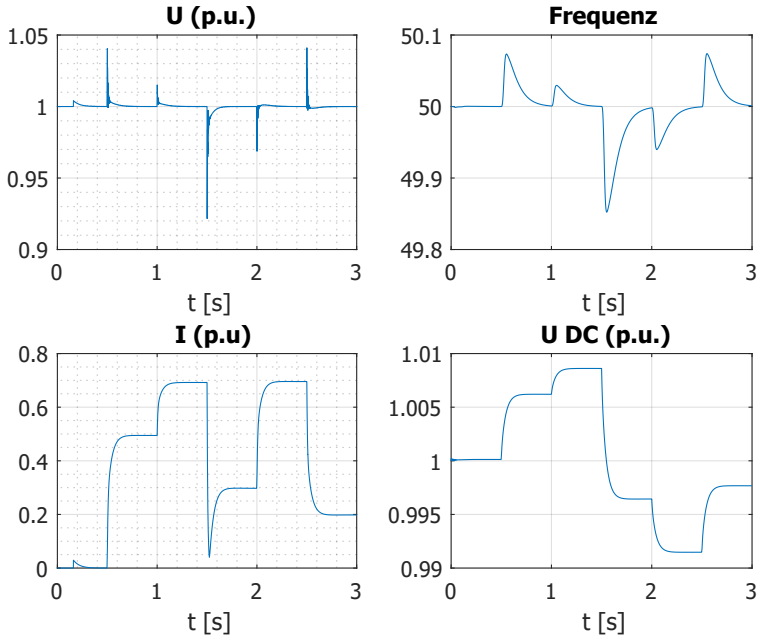


Abbildung 3.5: Wirkleistungs- Sollwertsprünge netzgekuppelter Betrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

Die Frequenz des Wechselrichters weicht während der Veränderung der abgegebenen Leistung von der eingestellten Sollfrequenz ab. Sobald die durch die Sollwertvorgabe geforderte Leistung am Ausgang auftritt, kehrt die Frequenz auf ihren Sollwert zurück.
Die Ursache für die Abweichung der Frequenz liegt darin, dass für die Erhöhung der übertragenen Wirkleistung der Winkel zwischen der Spannung des Wechselrichters und der Spannung des Netzes verändert werden muss [2]. Diese Winkeländerung geschieht durch Verkleinerung bzw. Vergrößerung der Frequenz des

Wechselrichters. Durch die Abweichung der Netzfrequenz von der Frequenz des Wechselrichters läuft eine Spannung der anderen winkelmäßig davon. Ist der für die geforderte Wirkleistung notwendige Winkel zwischen den beiden Spannungen erreicht, regelt der Regler die Frequenz zurück auf die Netzfrequenz. Dadurch bleibt die bestehende Winkeldifferenz und damit die Wirkleistung konstant.
Der Verlauf der DC- Spannung ist durch die Abweichung zwischen Wirkleistungssollwert und momentaner Wirkleistung bestimmt. Ist die abgegebene Wirkleistung kleiner als der Wirkleistungssollwert muss die überschüssige Energie in den Kapazitäten des Gleichstromkreises gespeichert werden. Aufgrund der endlichen Kapazität im Zwischenkreis, steigt bei zu kleiner abgegebenen Wirkleistung die Gleichspannung an, und sinkt bei zu großer abgegebener Wirkleistung.
In Abbildung 3.6 ist der Verlauf von Strom und Spannung in 3 phasigen Größen beim ersten Sollwertsprung, sowie der Verlauf von Wirk- und Blindleistung dargestellt. Die Wirkleistung steigt nach dem Sprung des Sollwertes auf eben diesen an. Die Blindleistung stellt sich auf den zur Übertragung der geforderten Wirkleistung notwendigen Wert ein. Da in dieser Simulation sowohl die Netzspannung als auch die Spannung des Netzes auf Nennspannung geregelt werden, ist liegt der Wert der Blindleistung nur bei etwa 1% der Nennleistung.

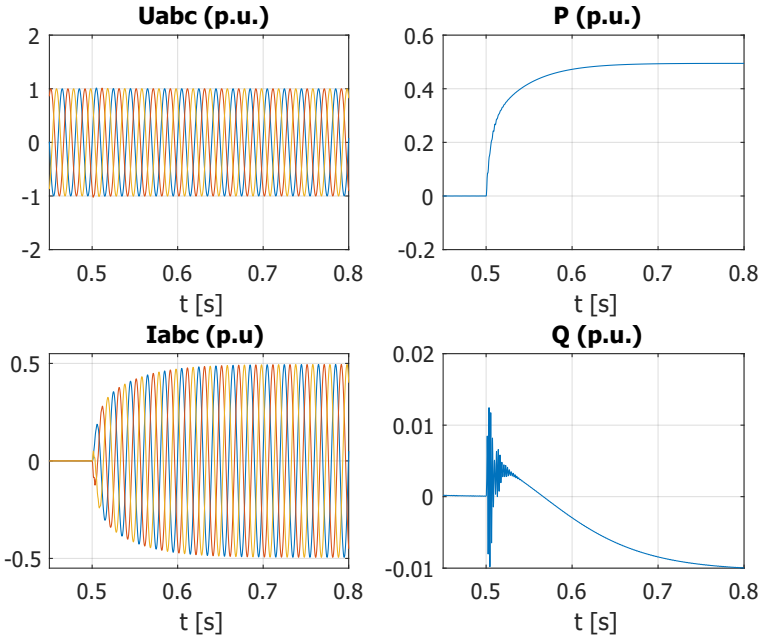


Abbildung 3.6: Wirkleistungs- Sollwertsprung 3phasig netzgekuppelter Betrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

In Abbildung 3.7 ist das Verhalten des netzgekuppelten Wechselrichters bei Wirkleistungssollwerten größer als die Nennleistung dargestellt. In Abbildung 3.8 ist der Strom und die Spannung, sowie die abgegebenen Leistungen für einen Sollwertsprung vergrößert dargestellt. Zum Vergleich und zur besseren Anschauung des Verhaltens der Strombegrenzung wurde die Simulation mit aktivierter, sowie mit deaktivierter Strombegrenzung durchgeführt und die Ergebnisse im selben Diagramm dargestellt. Man erkennt, dass die Spannung an den Klemmen des Wechselrichters nur schwach beeinflusst wird. Durch das Einschwingverhalten des Systems nach dem Aktiv werden der Strombegrenzung ergibt sich ein längeres Einschwingverhalten der Spannung als ohne Strombegrenzung. Der Strom wird bei dem eingestellten Maximalstrom, der in diesem Fall gleich dem Nennstrom ist, begrenzt. Da der Strom nicht über den Nennstrom steigen kann, kann auch die Wirkleistung nicht über die Nennleistung steigen und wird somit begrenzt. Die Frequenzabweichung ist bei aktivierter Strombegrenzung kleiner, da der Winkel zwischen den beiden Spannungen aufgrund der geringeren Wirkleistung nicht so groß werden muss. Die Spannung im Gleichstromkreis steigt um 10%, und somit um ein vielfaches als im Fall ohne Begrenzung an, sobald die Strombegrenzung aktiv wird. Dies ist darauf zurück zuführen, dass der Wechselrichter nicht die Leistung abgeben kann, die auf der Gleichrichterseite in den Gleichstromkreis fließt. Die überschüssige Energie muss gespeichert werden. Durch den Energieüberschuss erhöht sich die Spannung. In einem System aus Gleich- und Wechselrichter (z.B. HGÜ) muss daher die DC- Spannung geregelt werden um damit die Energiebilanz zwischen Gleich- und Wechselrichter herzustellen.

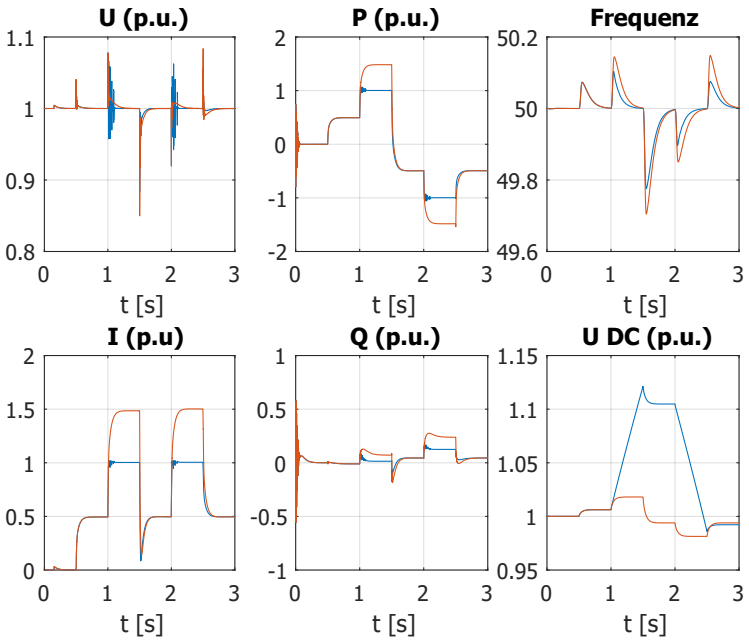


Abbildung 3.7: Wirkleistungs- Sollwertsprünge mit Strombegrenzung netzgekuppelter Betrieb (rot: Verlauf mit deaktivierter Strombegrenzung, blau: Verlauf mit aktivierter Strombegrenzung, Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

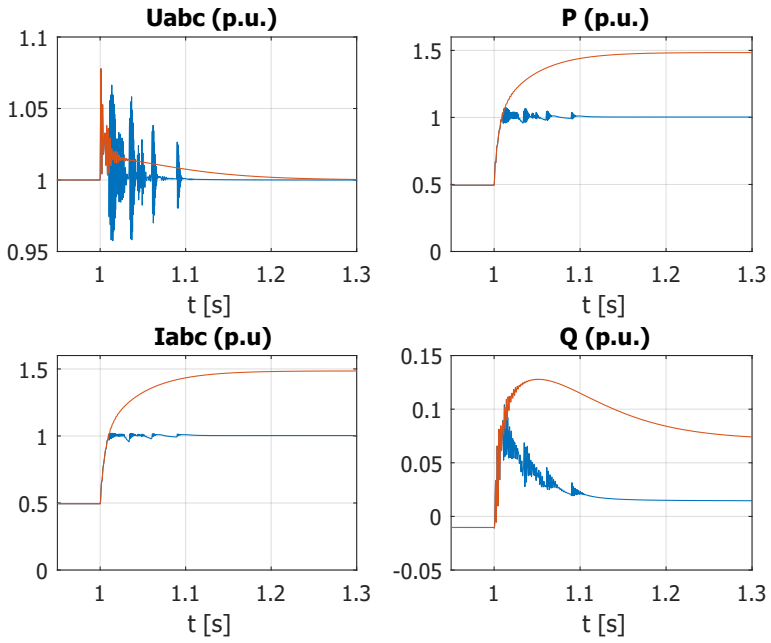


Abbildung 3.8: Wirkleistungs- Sollwertsprünge mit Strombegrenzung Detail netzgekuppelter Betrieb (rot: Verlauf mit deaktivierter Strombegrenzung, blau: Verlauf mit aktivierter Strombegrenzung, Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

3.2.2 Verhalten bei Blindleistungsvorgaben

Zu den in Tabelle 3.2 angegebenen Zeitpunkten wird ein Sprung des Blindleistungssollwertes auf das Modell aufgeschaltet. In der Tabelle ist zudem der Blindleistungssollwert nach dem Sprung angegeben. Der Wirkleistungssollwert beträgt während der gesamten Simulationsdauer 0.

t [s]	0,5	1	1,5	2	2,5
Q_{soll} [p.u]	0,5	0,9	-0,5	-0,9	-0,5

Tabelle 3.2: Blindleistungssollwerte

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Wirkleistung bleibt während der gesamten Simulationsdauer annähernd 0. Nur während der Sprünge des Blindleistungssollwerte ergeben sich kurze Wirkleistungspitzen die im Bereich von rund 1% der Nennleistung liegen. Da sich die Wirkleistung nicht verändert bleibt auch die Spannung im Gleichstromkreis annähernd konstant auf

ihrem Nennwert. Die Blindleistung folgt mit der durch die Regelparameter bestimmten Dynamik den Sollwertsprüngen. Die Spannung und die Blindleistung sind direkt voneinander abhängig. Aus diesem Grund steigt die Spannung bei positiver Blindleistung (kapazitives Verhalten des Wechselrichters) an und sinkt bei negativer Blindleistung (induktives Verhalten). Bei Abgabe von Blindleistung in der Höhe von 90% der Nennleistung, steigt die Klemmenspannung auf 112% der Nennspannung an. Im umgekehrten Fall, bei der Aufnahme von Blindleistung, sinkt die Spannung auf 86% der Nennspannung ab. Der Betrag des Stromes ist in den beiden Fällen von Blindleistungsaufnahme und Abgabe unterschiedlich groß. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Aufnahme von Blindleistung die Spannung kleiner ist. Die Leistung wird auf einen konstanten Wert geregelt und damit muss der Strom in diesem Betriebspunkt größer sein, als im Fall von abgegebener Blindleistung.

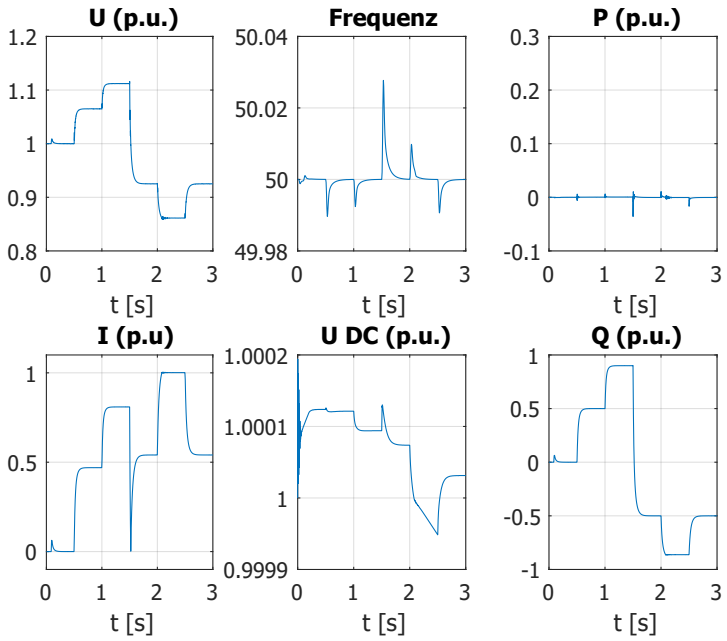


Abbildung 3.9: Blindleistung- Sollwertsprünge netzgekuppelter Betrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

3.2.3 Verhalten bei Frequenzvorgaben

In diesem Abschnitt ist das Verhalten des Simulationsmodells bei Abweichung des Sollfrequenzwertes von der Nennfrequenz beschrieben. In Abbildung 3.10 ist

die Reaktion des Wechselrichters auf einen rampenförmigen Anstieg des Frequenzsollwertes mit einer Steigung von 0,2 Hz/s dargestellt. Zum Zeitpunkt 0,5 s springt der Wirkleistungssollwert auf 50% der Nennleistung. Zum Zeitpunkt 1 s beginnt der Frequenzsollwert des Wechselrichters zu steigen. Zum Zeitpunkt 2 s endet der Anstieg der Frequenz und diese bleibt konstant auf 50,2 Hz. Die Frequenz des Netzes bleibt während der gesamten Simulationsdauer konstant auf der Nennfrequenz von 50 Hz. In Abbildung 3.10 erkennt man, dass sobald die Frequenz zu steigen beginnt, auch die Wirkleistungsabgabe und somit auch der Strom ansteigt. Dieser Anstieg ist damit zu begründen, dass mit den unterschiedlichen Frequenzen von Wechselrichter und Netz der Winkel zwischen der Netzspannung und der Spannung des Wechselrichters und damit die übertragene Wirkleistung ansteigt. Auch nach dem Ende des Frequenzanstieges steigt die Wirkleistung weiter an, da durch den bestehen bleibenden Frequenzunterschied der Winkel zwischen den beiden Spannungen immer weiter ansteigt. Die Klemmenspannung des Wechselrichters sinkt bei der Erhöhung der Frequenz ab. Sobald die Frequenz nicht mehr ansteigt, greift der Spannungsregler ein und regelt die Spannung wieder auf ihren Sollwert. Die Blindleistung verhält sich proportional zur Spannung.

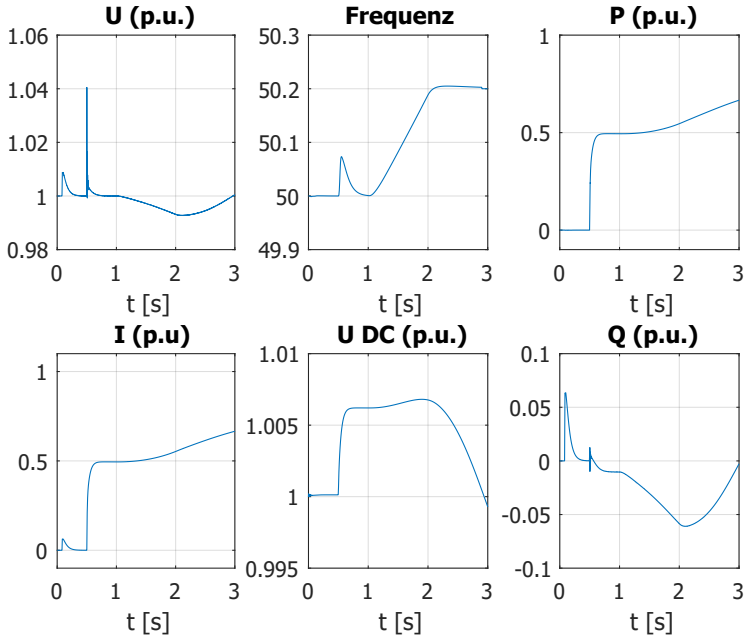


Abbildung 3.10: Frequenzrampe Wechselrichter (Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

In Abbildung 3.11 ist die Reaktion des Wechselrichters auf eine sprunghafte Ver-

änderung des Frequenzsollwertes dargestellt. Zum Zeitpunkt 0,5 s springt der Wirkleistungssollwert auf 50% der Nennleistung. Zum Zeitpunkt 1 s springt der Frequenzsollwert auf 50,2 Hz und zum Zeitpunkt 2-s zurück auf 50 Hz. Die Frequenz des Netzes bleibt während der gesamten Simulationsdauer konstant auf der Nennfrequenz von 50 Hz. Nach dem Frequenzsprung beginnt durch die Frequenzabweichung zwischen Netz und Wechselrichter, die Wirkleistung zu steigen. Dies ist durch die steigende Winkelabweichung zwischen der Klemmenspannung des Wechselrichters und der Netzspannung zu begründen. Nach Rücksprung der Frequenz auf ihren Sollwert, bleibt die Winkeldifferenz und damit die erhöhte Wirkleistung bestehen. Der Strom verhält sich proportional zur Wirkleistung. Die Spannung sinkt durch den Frequenzsprung leicht ab und steigt nach dem Rücksprung der Frequenz wieder auf ihren Sollwert an. Die Blindleistung verhält sich proportional zur Spannung.

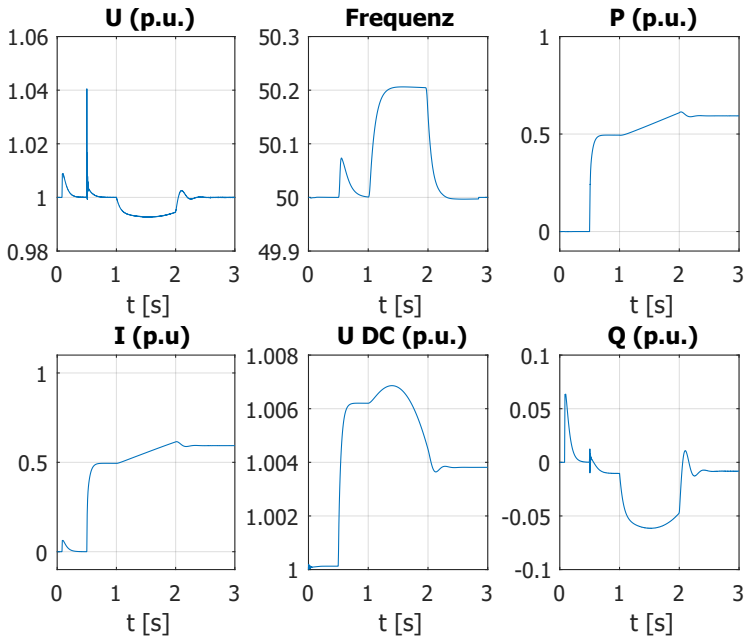


Abbildung 3.11: Frequenzsprung Wechselrichter Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

3.2.4 Verhalten bei Frequenzabweichungen des Netzes

In diesem Abschnitt ist die Reaktion des Wechselrichtermodells auf Frequenzveränderungen des gekuppelten Netzes beschrieben. In Abbildung 3.12 ist die Reaktion des Wechselrichters auf eine Frequenzrampe im Netz dargestellt. Zum Zeitpunkt 0,5 s springt der Wirkleistungssollwert auf 50% der Nennleistung. Zum

Zeitpunkt 1 s beginnt die Netzfrequenz mit 0,2 Hz/s zu steigen. Zum Zeitpunkt 2 s endet der Anstieg der Frequenz und diese bleibt konstant auf 50,2 Hz. Die Sollfrequenz des Wechselrichters bleibt während der gesamten Simulationsdauer konstant auf 50 Hz. Bei steigender Netzfrequenz sinkt die Wirkleistungsabgabe des Wechselrichters. Da bei sich bei steigender Netzfrequenz zu viel Erzeugung im Netz befindet, ist das Verhalten zu beobachtende Verhalten des Wechselrichters der Netzstabilität dienlich. Aufgrund des bleibenden Frequenzunterschieds zwischen Wechselrichter und Netz sinkt die Wirkleistungsabgabe auch nach Ende der Frequenzrampe ab. Die Klemmenspannung des Wechselrichters steigt bei der Erhöhung der Frequenz leicht an. Sobald die Frequenz nicht mehr ansteigt, sinkt die Spannung unter ihren Sollwert ab. Die Blindleistung verhält sich proportional zur Spannung.

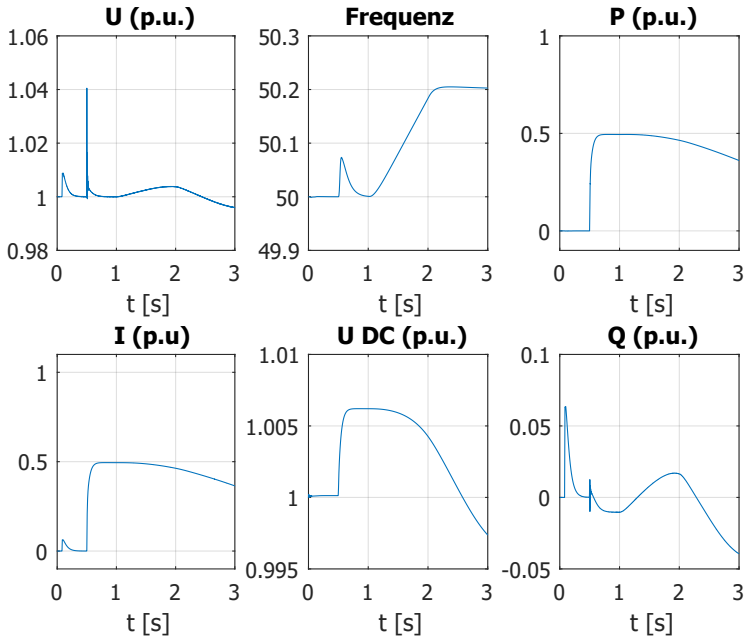


Abbildung 3.12: Frequenzrampe Netz Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

In Abbildung 3.13 ist die Reaktion des Wechselrichtermodells auf eine sprunghafte Änderung der Netzfrequenz zu sehen. Zum Zeitpunkt 0,5 s springt der Wirkleistungssollwert auf 50% der Nennleistung. Zum Zeitpunkt 1-s springt die Netzfrequenz auf 50,2 Hz und zum Zeitpunkt 2 s zurück auf 50 Hz. Der Frequenzsollwert des Wechselrichters bleibt während der gesamten Simulationsdauer konstant auf der Nennfrequenz von 50 Hz. Nach dem Frequenzsprung beginnt durch die Frequenzabweichung zwischen Netz und Wechselrichter die Wirkleistung zu sinken.

Dies ist durch die sinkende Winkelabweichung zwischen der Klemmenspannung des Wechselrichters und der Netzspannung zu begründen. Nach Rücksprung der Frequenz auf ihren Sollwert, bleibt die Winkeldifferenz und damit die erniedrigte Wirkleistung bestehen. Der Strom verhält sich proportional zur Wirkleistung. Die Spannung steigt durch den Frequenzsprung leicht an und sinkt nach dem Rücksprung der Frequenz wieder auf ihren Sollwert ab. Die Blindleistung verhält sich proportional zur Spannung.

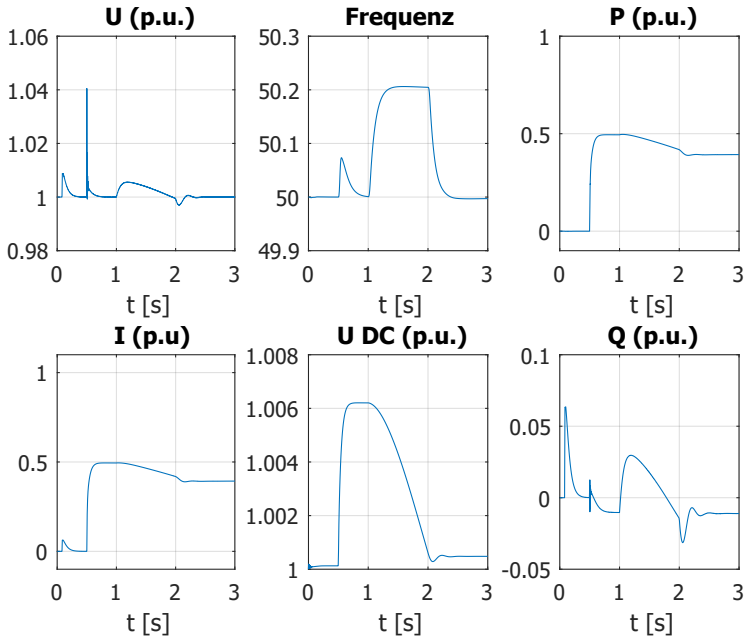


Abbildung 3.13: Frequenzsprung Netz Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

Die Frequenzregelung des Wechselrichters könnte direkt mit der Netzfrequenz gekoppelt werden. Damit würde der Wechselrichter stets der Netzfrequenz folgen. Mit dieser Maßnahme würden sich bei Änderung der Netzfrequenz keine Effekte auf die Ausgangsgrößen ergeben.

3.2.5 Verhalten bei unsymmetrischem Netz

In diesem Abschnitt ist die Reaktion des Wechselrichtermodells auf Spannungsasymmetrien im gekuppelten Netz beschrieben. In Abbildung 3.14 sind Strom und Spannung in bezogenen Größen dargestellt. Im Ausgangszustand (t<1 s) beträgt die Spannung in allen 3 Phasen die Nennspannung und der Strom beträgt 50%

des Nennstromes. Zum Zeitpunkt 1 s sinkt die Spannung U_a sprunghaft auf 80% der Nennspannung ab. Die Spannung in den beiden übrigen Phasen bleibt auf Nennspannung. Durch diese Asymmetrie steigen die Ströme I_a und I_b an, der Strom I_c hingegen sinkt ab. Durch die sprunghafte Änderung der Netzspannung überlagert sich den Ströme ein abklingendes Gleichstromglied. Der Verlauf der Leistungen für diesen Fall ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Durch das unsymmetrische Drehstromsystem kann keine konstante Leistung mehr abgegeben werden. Es ergeben sich Pendelleistungen mit einer Frequenz von 100-Hz. Der Mittelwert der Wirkleistung bleibt konstant auf dem eingestellten Wert von 50% der Nennleistung. Der Mittelwert der Blindleitung stellt sich auf einen Wert von zirka 40% der Nennleistung ein.

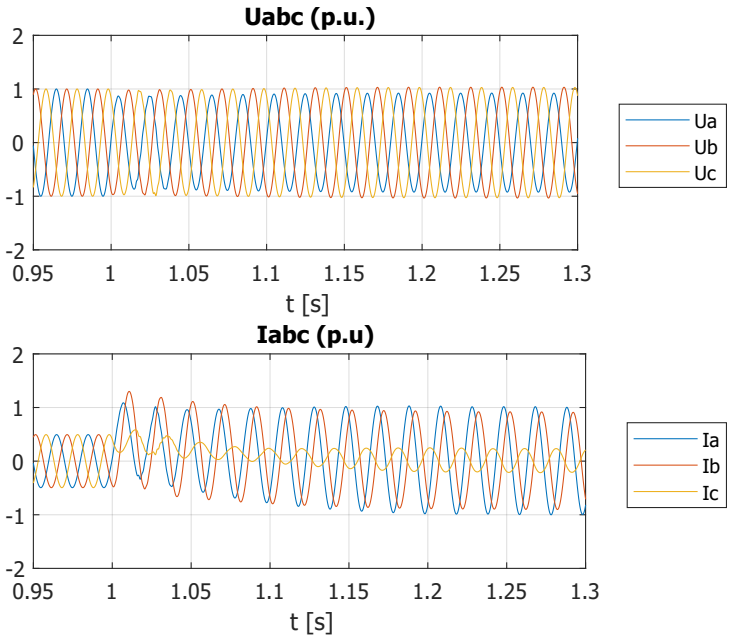


Abbildung 3.14: Unsymmetrisches Netz Ua=80%, Spannung und Strom Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

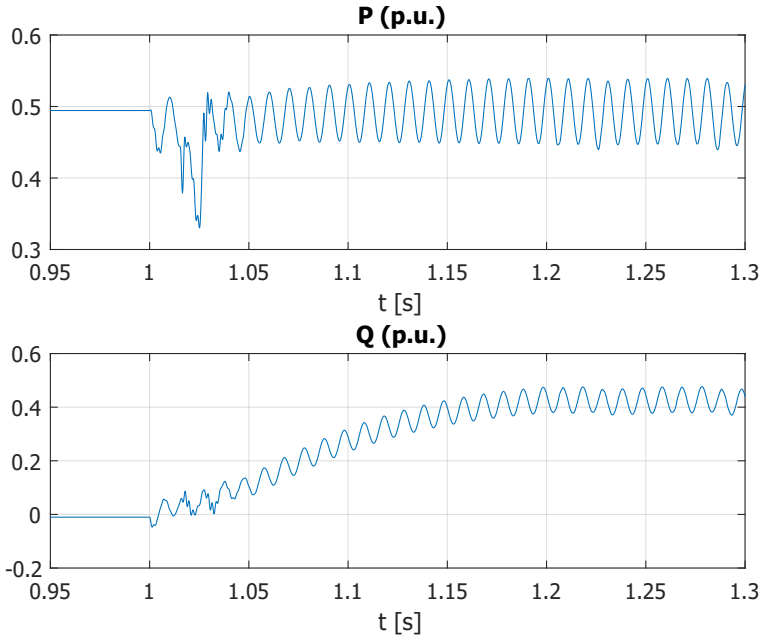


Abbildung 3.15: Unsymmetrisches Netz Ua=80%, Leistung Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

In Abbildung 3.16 ist der Verlauf von Strom und Spannung bei einer 2 phasigen Spannungseinsenkung auf 80% der Nennspannung im Netz dargestellt. Die Spannungen U_a und U_b werden verkleinert. Die Spannung U_c bleibt auf Nennspannung. Der Strom I_b steigt stark an. Die Ströme I_a und $I_c$bleiben in ihrer Amplitude gleich groß. Durch die Sprunghafte Änderung der Netzspannung überlagert sich den Strömen ein abklingendes Gleichstromglied. Der Verlauf der Leistungen für diesen Fall ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Durch das unsymmetrische Drehstromsystem kann keine konstante Leistung mehr abgegeben werden. Es ergeben sich wiedrum Pendelleistungen mit einer Frequenz von 100 Hz. Der Mittelwert der Wirkleistung sinkt auf rund 45% der Nennleistung ab. Der Mittelwert der Blindleistung steigt durch die Unsymmetrie auf rund 20% der Nennleistung.

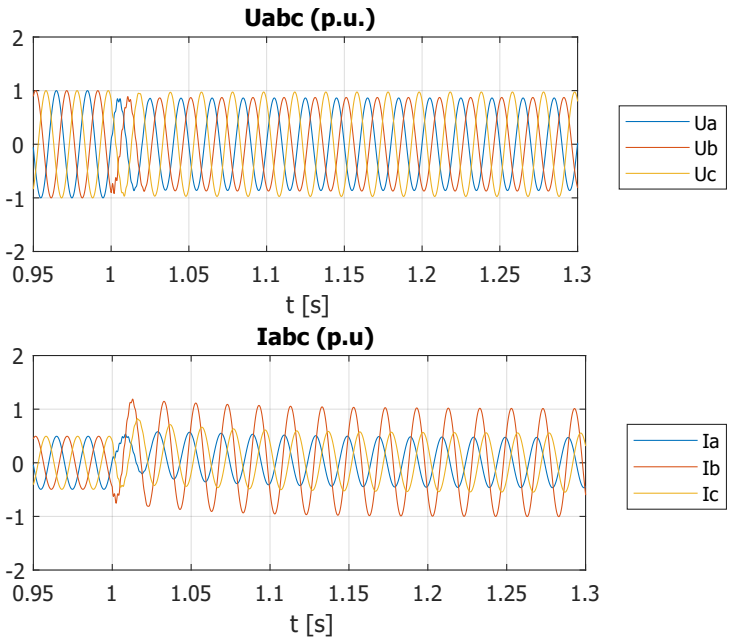


Abbildung 3.16: Unsymmetrisches Netz Ua,Ub=80%, Spannung und Strom Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

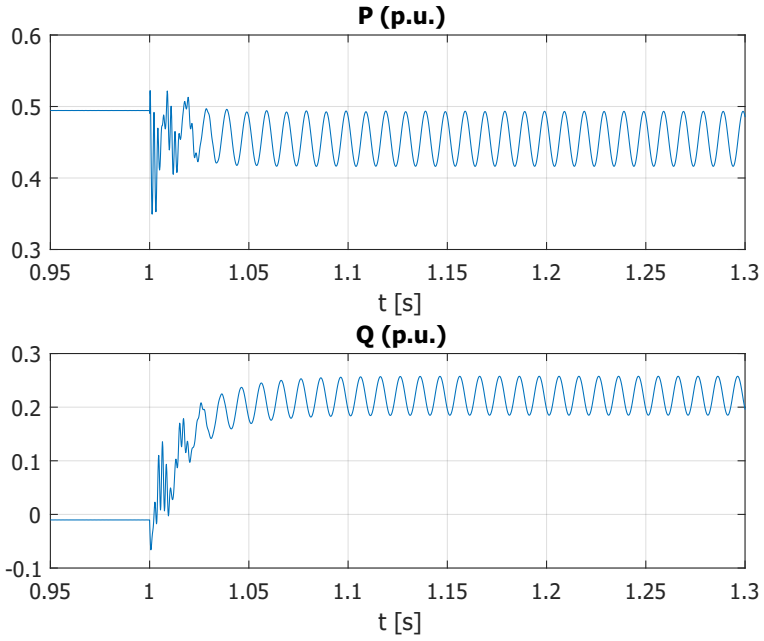


Abbildung 3.17: Unsymmetrisches Netz Ua, Ub=80%, Leistung Verläufe an B1 Abbildung 2.7)

4 Auswirkungen der Regelparameter auf das Verhalten der Modelle

4.1 Inselbetrieb

4.1.1 Einfluss der Parameter des Spannungsreglers

Der Spannungsregler des Simulationsmodells im Inselbetrieb besteht aus einem PI- Regler. Die Übertragungsfunktion dieses Reglers ist in Gleichung 4.1 dargestellt. Der Einfluss der Regelparameter (P und I) dieses Reglers werden im Folgenden näher betrachtet.

$$G(s) = P + I\frac{1}{s} \tag{4.1}$$

Die Integrationskonstante I versteht sich als Steigung des Integrators des PI- Reglers. Die Konstante besitzt somit die Einheit $\frac{1}{s}$. Durch Kehrwertbildung ergibt sich die Zeitkonstante des PI- Reglers. Die verschiedenen Werte der Integrationskonstanten I ergeben damit die in Tabelle 4.1 angegebenen Zeitkonstanten.

I	20	30	40	50	60
T [ms]	50	33,3	25	20	16,6

Tabelle 4.1: Reglerzeitkonstanten

In Abbildung 4.1 ist der Einfluss der Proportionalkonstanten P des Spannungsreglers auf eine Änderung des Spannungssollwertes dargestellt. Die Integrationskonstante I des Spannungsreglers wurde während der Simulationen konstant auf dem Standardwert von 40 gehalten. Wird die Proportionalkonstante zu 0 gesetzt, handelt es sich beim Spannungsregler um einen reinen I- Regler. Mit ansteigendem Proportionalanteil erreicht die Spannung schneller den geforderten Sollwert, da das Ausgangssignal des Reglers bereits näher an den Endwert kommt. Die restliche Regelabweichung wird durch den I- Anteil des Reglers ausgeregelt.

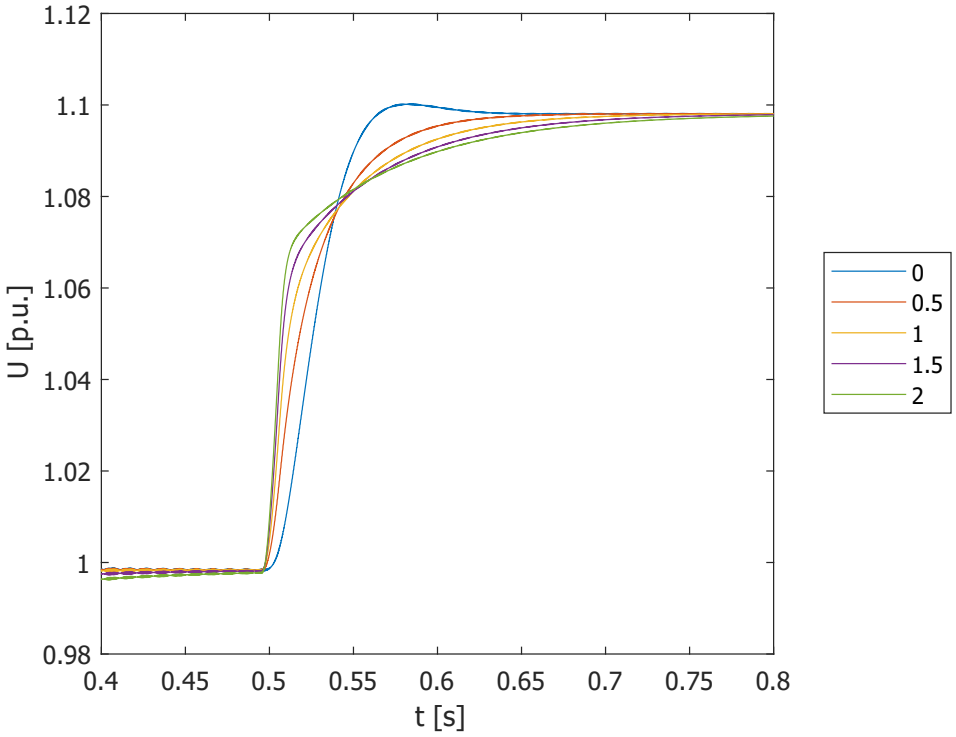


Abbildung 4.1: Variation der Proportionalkonstanten K des Spannungsreglers im Inselbetrieb (Signalverlauf am Ausgang des U- Reglers)

Der Einfluss wie schnell die restliche Regelabweichung ausgeregelt wird, ist durch die Integrationskonstante des Spannungsreglers bestimmt. Der Einfluss dieser Integrationskonstanten auf das Regelverhalten bei Änderung des Spannungssollwertes ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Proportionalkonstante wurde während der Simulationen auf dem Standardwert von 1 gehalten. Es lässt sich erkennen, dass mit steigendem Wert der Integrationskonstanten

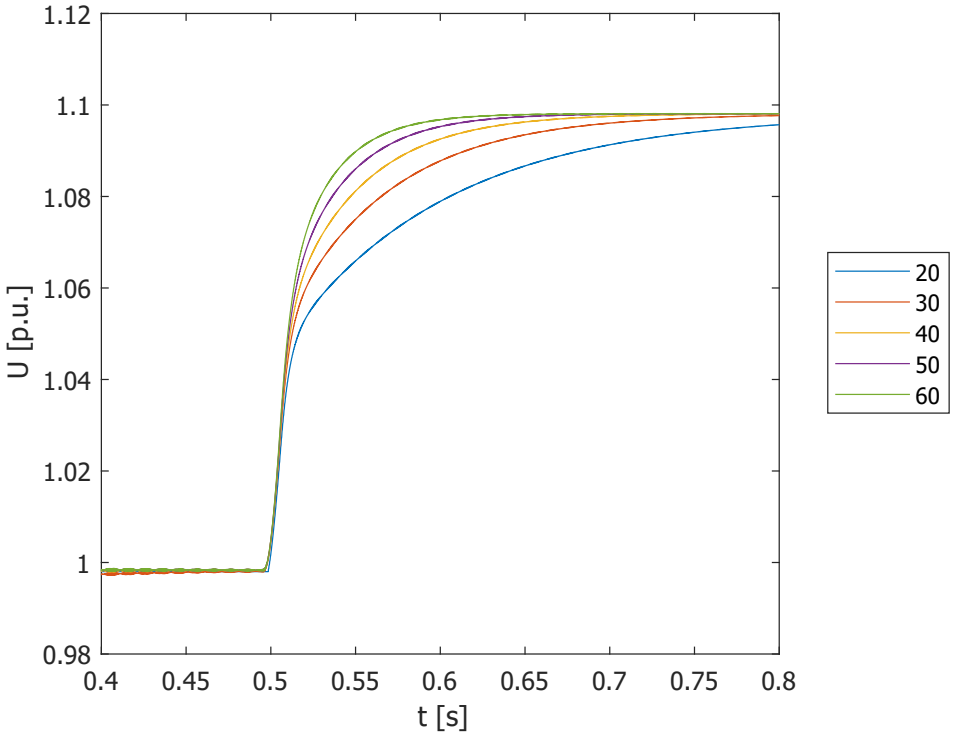


Abbildung 4.2: Variation der Integrationskonstanten I des Spannungsreglers im Inselbetrieb (Signalverlauf am Ausgang des U- Reglers)

4.1.2 Einfluss der Konstanten I_{beg} auf das Verhalten im Fehlerfall

Die Anpassung des Parameters I_{beg} der Strombegrenzung geschieht mit Hilfe des 2 poligen Fehlerfalles.
In Abbildung 4.3 ist der Verlauf des Ausgangssignales des Strombegrenzungsblockes in der fehlerbehafteten Phase L2, bei 5 verschiedenen Werten für die Konstante I_{beg}, dargestellt. Der Fehler tritt zum Zeitpunkt 0.5s ein. Es lässt sich erkennen, dass aufgrund des schnellen Stromanstieges in der Phase, das Ausgangssignal sehr schnell gegen 0 geht. Dadurch sinkt der Strom in der Phase wieder ab und sobald dieser wieder unter die mit I_{max} eingestellte Schwelle kommt, versucht die Strombegrenzung ihr Ausgangssignal und damit die Spannung in der Phase wieder zu erhöhen. Die Konstante I_{beg} die hier variiert wird, gibt an wann die Strombegrenzung anspricht. Umso kleiner der Wert von I_{beg}, desto früher reagiert die Strombegrenzung. Nach zirka 150ms nach Fehlereintritt ist befindet sich das System im eingeschwungenen Zustand.

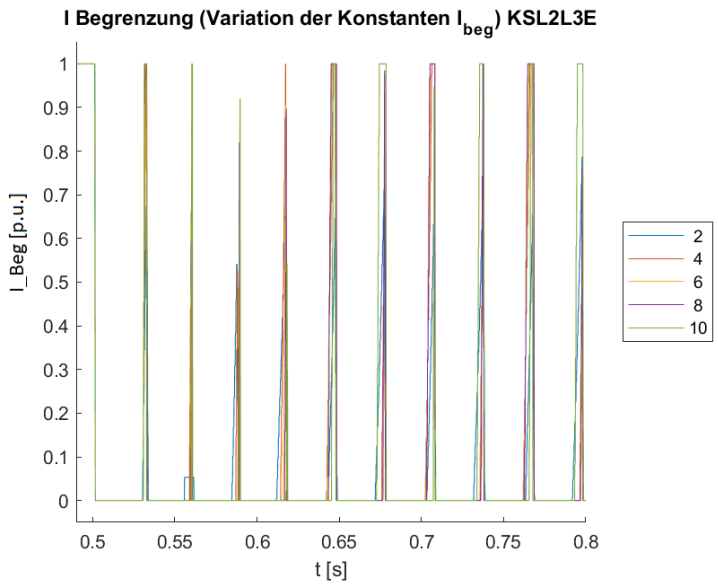


Abbildung 4.3: Verlauf Strombegrenzung Ibeg=2-10

In Abbildung 4.4 ist das gleiche Bild wie Abbildung 4.3 nochmals größer dargestellt. Man erkennt, dass der Anstieg der Strombegrenzung mit der Größe der Konstanten I_{beg} kleiner wird und dadurch der Scheitelwert des Stromes früher begrenzt wird.

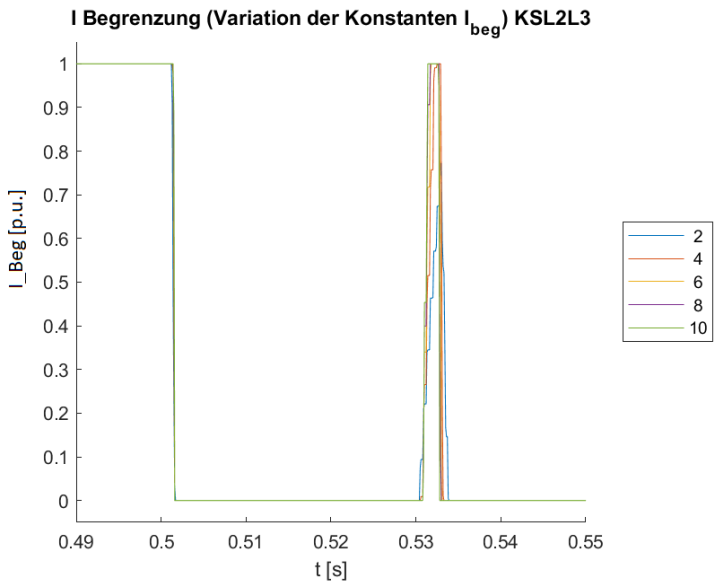


Abbildung 4.4: Verlauf Strombegrenzung Ibeg=2-10 vergrößert

In Abbildung 4.5 ist der durch die Moving Maximum Funktion des Strombegrenzungsblockes ermittelte Scheitelstrom in der Phase L2 dargestellt. Man erkennt, dass mit Verkleinerung der Konstanten der Strombegrenzung der maximal auftretende Strom nach Kurzschlusseintritt, sowie auch der Strom im eingeschwungenen Zustand sinken. Bei Erhöhung der Konstanten steigt der Kurzschlussstrom an. Während den ersten Perioden nach dem Kurzschluss verhält sich die Höhe des Stromes unterproportional zur Änderung der Konstanten. Im eingeschwungenen Zustand verhält sich die Höhe des Stromes proportional zur Konstanten. Die Einsenkungen in den Stromverläufen sind durch die schnelle Reaktion der Strombegrenzung zu erklären.

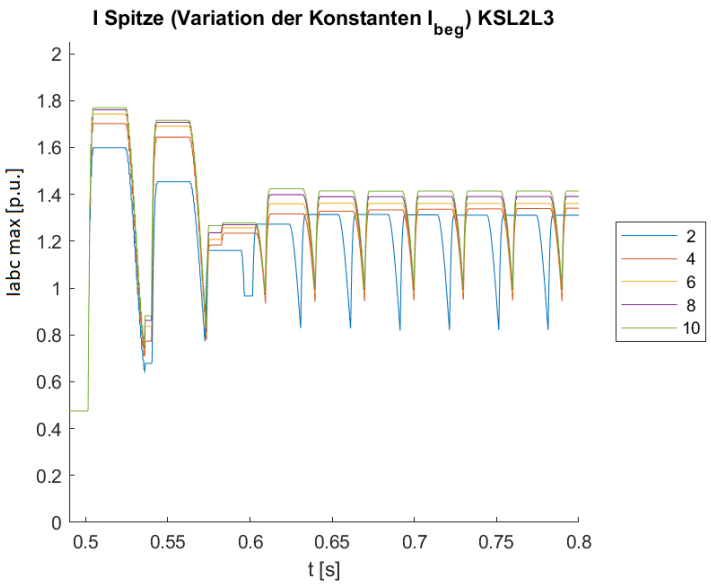


Abbildung 4.5: Verlauf Strommaximum Ibeg=2-10

4.2 Netzgekuppelter Betrieb

4.2.1 Einfluss der Parameter der Leistungsregler

In Abbildung 4.6 ist der Verlauf des Ausgangsstromes im d- q- Koordinatensystem bei verschiedenen Werten der Integrationskonstanten I der PI- Leistungsregler dargestellt. Die Übertragungsfunktion dieses Reglers ist in Gleichung 4.2angegeben.

$$G(s) = P + I\frac{1}{s} \tag{4.2}$$

Die Integrationskonstante I versteht sich als Steigung des Integrators des PI- Reglers. Die Konstante besitzt somit die Einheit $\frac{1}{s}$. Durch Kehrwertbildung ergibt sich die Zeitkonstante des PI- Reglers. Die verschiedenen Werte der Integrationskonstanten I ergeben damit die in Tabelle 4.1 angegebenen Zeitkonstanten.

Zum Zeitpunkt t=0,3s wird auf den Leistungsregler ein Sollwertsprung der von 0% auf 50% der Nennleistung aufgeschaltet. Je größer die Integrationskonstante des Reglers wird, umso schneller erreicht der Strom und damit die abgegebene Leistung des Wechselrichters ihren Sollwert. Mit Hilfe dieses Parameters kann somit die Trägheit des Systems auf Änderungen der Leistungssollwerte frei bestimmt werden.

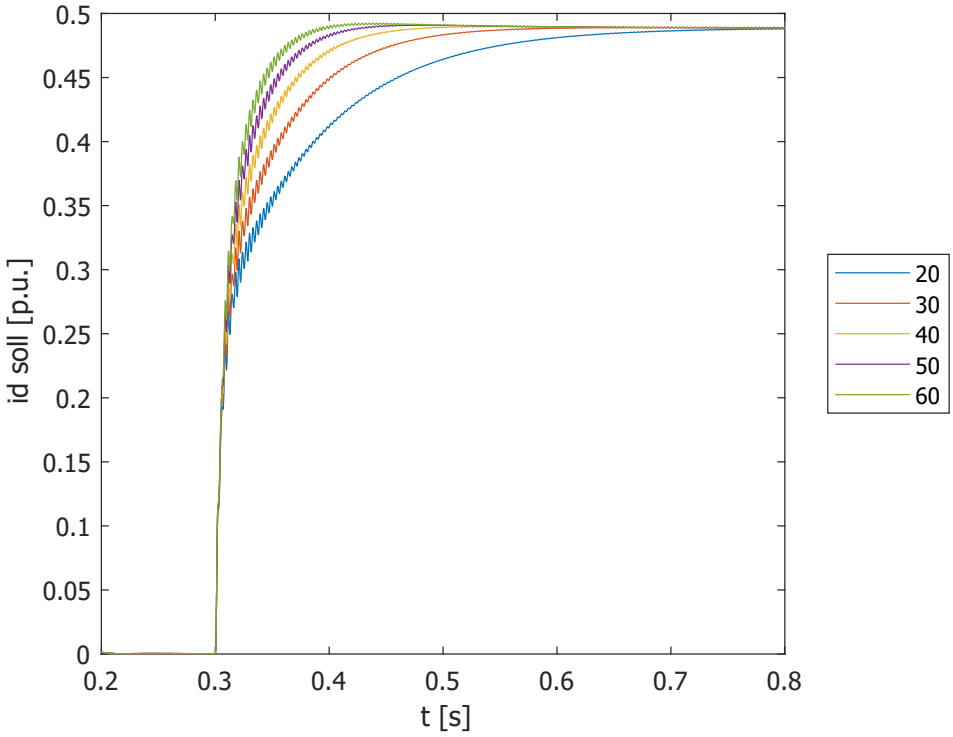


Abbildung 4.6: Variation der Integrationskonstanten I der Leistungsregler im netzgekuppelter Betrieb (Signalverlauf $i_{d,soll}$ Abbildung 2.8)

In Abbildung 4.7 ist der Einfluss der Proportionalkonstanten der PI- Leistungsregler auf einen Sprung des Leistungssollwertes dargestellt. Man erkennt, dass mit wachsendem Wert dieser Konstante der Strom bzw. die Leistung schneller ihren Endwert erreichen. Allerdings tritt bei Werten größer 0 eine Schwingung des Systems auf. Diese Schwingung klingt bei einem Wert der Konstanten zwischen 0,5 und 1,5 ab. Ist die Konstante 2, so klingt die Schwingung auf und der Regler, und damit das gesamte System, wird instabil.

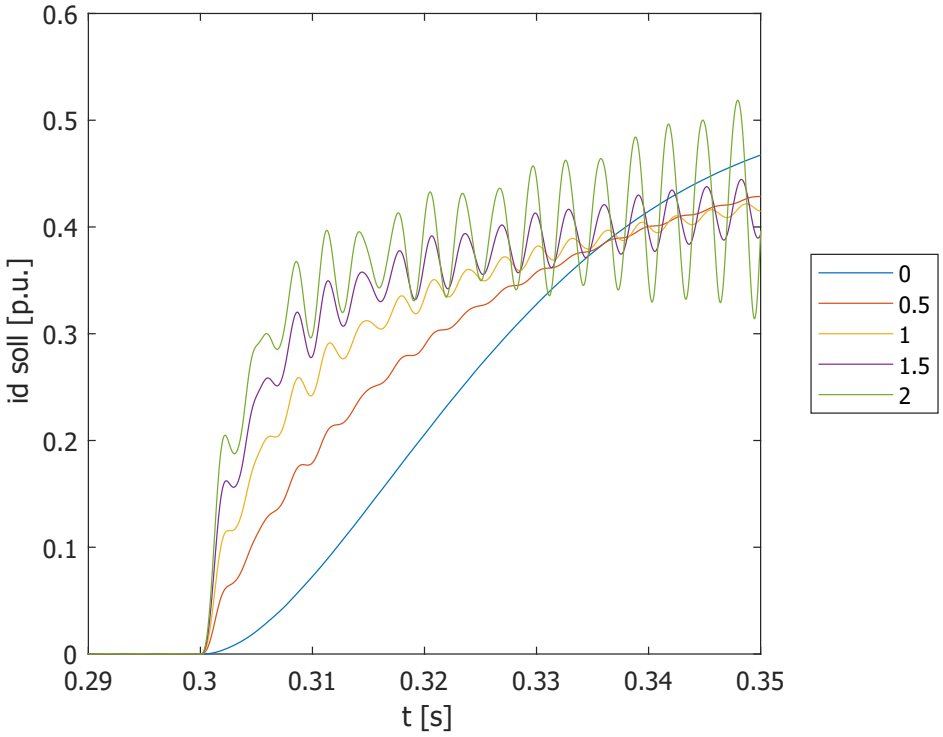


Abbildung 4.7: Variation der Proportionalkonstanten P der Leistungsregler im netzgekuppelter Betrieb (Signalverlauf $i_{d,soll}$ Abbildung 2.8)

In Abbildung 4.8 ist der Einfluss der Zeitkonstante des PT1- Gliedes in den Leistungsreglern auf einen Sprung des Leistungssollwertes dargestellt. Es lässt sich erkennen , dass sich der Verlauf des Stroms durch Variation dieser Konstanten nur geringfügig verändern lässt. Aus diesem Grund ist dieser Parameter nur bedingt dazu geeignet, das Regelverhalten zu beeinflussen. Das PT1- Glied ist aber dennoch notwendig, da dieses zur Auflösung von algebraischen Schleifen in der Simulation dient.

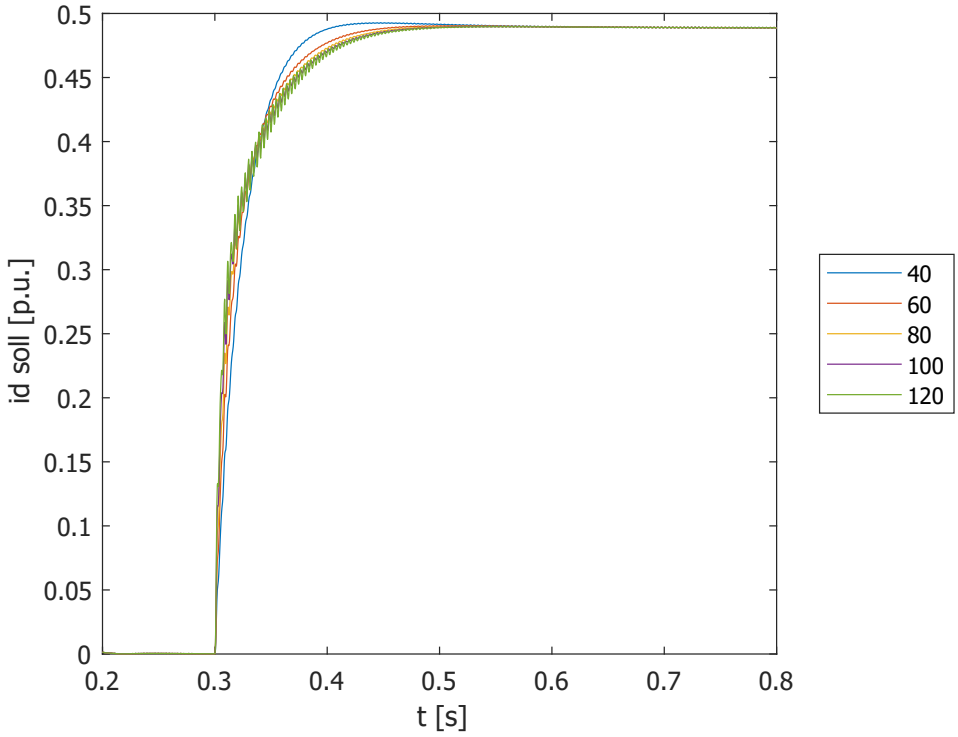


Abbildung 4.8: Variation der PT1 Zeitkonstanten der Leistungsregler im netzgekuppelter Betrieb

4.2.2 Einfluss der Parameter des Stromreglers

In Abbildung 4.9 ist der Einfluss der Proportionalkonstanten des Stromreglers auf den Verlauf des Ausgangsstromes bei einem Sprung des Leistungssollwertes dargestellt. Auf der linken Seite ist der gesamte Stromverlauf bis zum stationären Zustand dargestellt. Man erkennt, dass der Stromregler keinen Einfluss darauf hat wie schnell die Leistung nachgeregelt wird. Auf der rechten Seite ist ein Bereich des Stromverlauf vergrößert dargestellt. Umso kleiner die Proportionalkonstante der Strombegrenzung, desto mehr neigt der Stromregler zur Schwingung. Die Frequenz der Schwingung wird mit zunehmenden Wert der Konstante größer.

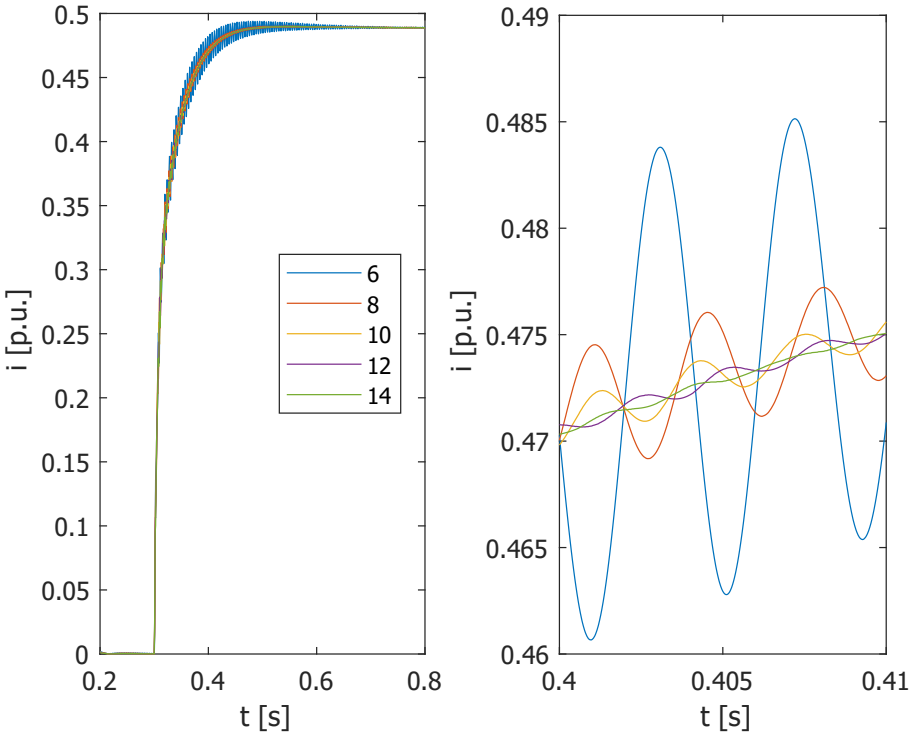


Abbildung 4.9: Variation der Proportionalkonstanten k_p des Stromreglers im netzgekuppelter Betrieb (Signalverlauf U (p.u.) Abbildung 2.9)

5 Verhalten der Modelle im Fehlerfall

5.1 Inselbetrieb

Der Fehlerwiderstand an der Fehlerstelle beträgt in allen Simulation 1Ω. Der Fehlerort befindet sich in einer Entfernung von 50km vom einspeisenden VSC. Vor dem Fehler befindet sich das System im eingeschwungenen Zustand mit einer Belastung von S=0.5p.u..

5.1.1 1 poliger Fehler

Zum Zeitpunkt 0,5s tritt in der Phase L1 ein 1 poliger Erdfehler auf. Der Wechselrichter besitzt einen starr geerdeten Sternpunkt.
In Abbildung 5.1 ist die Spannung und der Strom am Wechselrichter bei einem 1 poligen Fehler dargestellt. Die Spannung in der fehlerhaften Phase L1 bricht ein. Die Spannung in den beiden gesunden Phasen L2 und L3 bleibt jedoch unverändert. Der Strom in der Phase L1 steigt an und wird durch die Strombegrenzung begrenzt. Aufgrund der Begrenzung ist der Stromverlauf nicht mehr sinusförmig. In den beiden fehlerfreien Phasen sinkt der Strom leicht und wird geringfügig verzerrt. Aus Abbildung 5.1 lässt sich bereits erkennen, dass sich die 3 Phasenströme nicht zu Null addieren. Es existiert somit ein Nullsystem im Strom

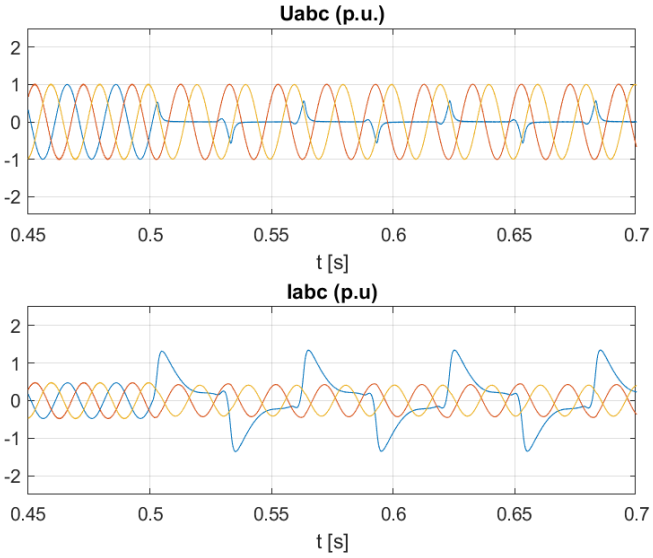


Abbildung 5.1: 1 poliger Fehler Inselbetrieb Strom und Spannung an B1

In Abbildung 5.2 ist der Strom aus Abbildung 5.1 in symmetrischen Komponenten dargestellt. Die Darstellung ist auf den maximalen Strom normiert. Es lässt sich erkennen, dass vor dem Eintritt des Fehlers nur ein Mitsystemstrom existiert. Nach Eintritt des Kurzschlusses bildet sich aufgrund des geerdeten Sternpunktes des Wechselrichters, sowie des Fehlers mit Erdberührung ein Nullsystem aus. Für die Ströme in symmetrischen Komponenten kann sich kein stabiler Wert mehr einstellen, da der auftretende Strom durch die Strombegrenzung nicht mehr sinusförmig ist. Im Mittel ergeben sich zirka folgende Werte für den Strom in symmetrischen Komponenten:

- $I^{(0)}$=20%
- $I^{(1)}$=50%
- $I^{(2)}$=30%

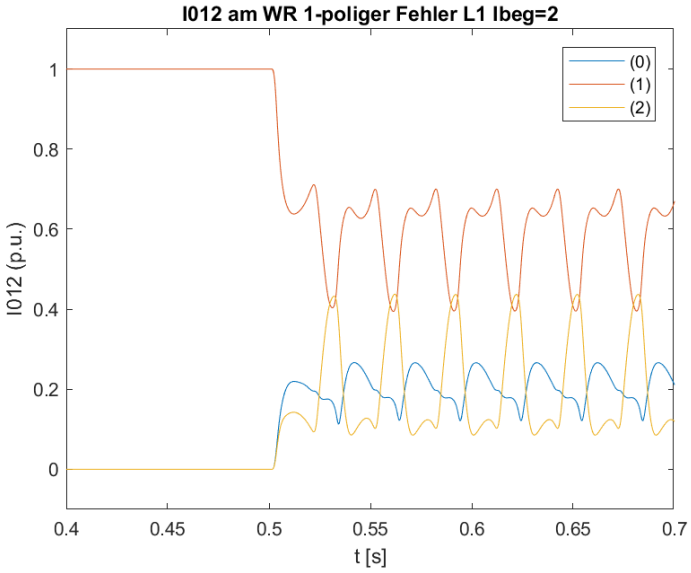


Abbildung 5.2: 1 poliger Fehler Inselbetrieb Strom in sym. Komponenten an B1

5.1.2 2 poliger Fehler mit Erdberührung

Zum Zeitpunkt 0,5s tritt in den beiden Phasen L2 und L3 eine Erdberührung auf. Der Wechselrichter besitzt einen starr geerdeten Sternpunkt. Die bei diesem Fehler an den Wechselrichterklemmen auftretende Spannung, sowie der auftretende Strom sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Man erkennt, dass die Spannung in den

beiden fehlerbehafteten Phasen L2 und L3, durch die Strombegrenzung, in kurzer Zeit (rund 5ms) auf 0 gesenkt wird. Die Spannung in der Phase L1 bleibt unverändert, da der Strom in der Phase L1 nicht den Maximalstrom überschreitet. Bei Eintritt des Fehlers steigt der Strom in den fehlerbehafteten Phasen rasch an, bis die Strombegrenzung reagieren kann. Danach sinkt der Strom wieder ab, bis dieser einen Wert kleiner als der eingestellten Maximalstromes erreicht. Der Strom ist nicht mehr Sinusförmig, da durch die Strombegrenzung keine harmonische Spannung mehr existiert, die einen harmonischen Strom treiben würde. Unterschreitet der Strom die Schwelle des Maximalwertes wird die Strombegrenzung für kurze Zeit deaktiviert. Daraufhin steigt die Spannung und damit auch der Strom wieder an. Da der Strom durch diesen Anstieg den Maximalstrom wieder überschreitet, wird die Strombegrenzung wieder aktiv und senkt die Spannung auf 0. Daraufhin sinkt auch der Strom wieder. Im eingeschwungenen Zustand wiederholt sich dieser Vorgang, bis der Fehler geklärt wird. Der Strom in der Phase L1 wird durch den Fehler leicht verzerrt, aber dieser behält seine Sinusform, da die Spannung in L1 nach wie vor Sinusförmig ist.
Aus Abbildung 5.3 kann man schon erkennen, dass sich die drei Phasenströme nicht zu 0 addieren, es existiert also ein Nullsystem im Strom.

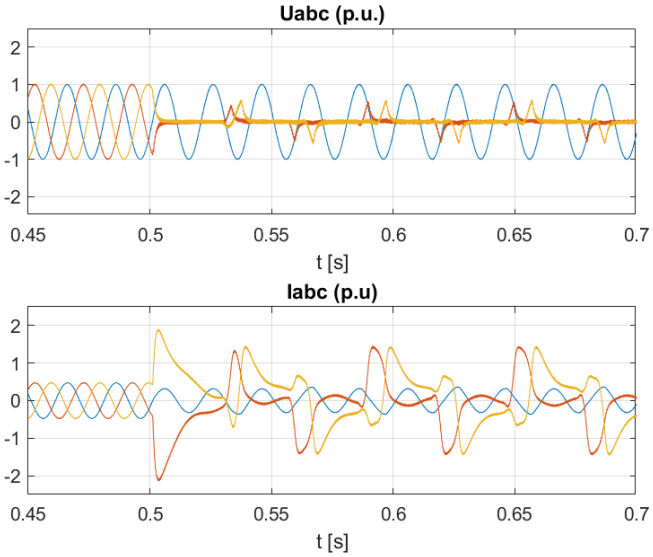


Abbildung 5.3: 2 poliger Fehler mit Erdberührung Inselbetrieb Strom und Spannung an B1

In Abbildung 5.4 ist der Strom aus Abbildung 5.3 in symmetrischen Komponenten dargestellt. Die Darstellung ist auf den maximalen Strom normiert. An

den symmetrischen Komponenten erkennt man deutlich das Nullsystem das sich ausbildet. Der relativ große Anteil an Nullstrom ist durch die starre Erdung des Wechselrichters zu begründen. Da die Ströme nach dem Fehlereintritt nicht mehr sinusförmig sind, ergeben sich keine konstanten Werte für die symmetrischen Komponenten des Stromes. Im Mittel ergeben sich zirka folgende Werte für den Strom in symmetrischen Komponenten:

- $I^{(0)}$=25%
- $I^{(1)}$=60%
- $I^{(2)}$=15%

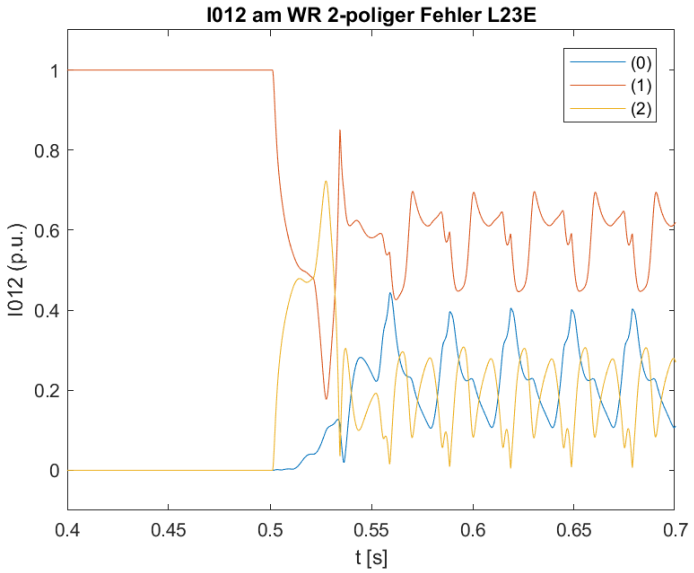


Abbildung 5.4: 2 poliger Fehler mit Erdberührung Inselbetrieb Strom in sym. Komponenten an B1

5.1.3 2 poliger Fehler ohne Erdberührung

Zum Zeitpunkt 0,5s tritt zwischen den beiden Phasen L2 und L3 ein Fehler auf. Der Wechselrichter besitzt wiederum einen starr geerdeten Sternpunkt. Die bei diesem Fehler an den Wechselrichterklemmen auftretende Spannung, sowie der auftretende Strom sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Spannung in den beiden fehlerbehafteten Phasen wird durch die Strombegrenzung, ähnlich wie in Abschnitt 5.1.2, rasch auf den Wert 0 gesenkt. Die Ströme in den Phasen

L2 und L3 steigen nach Eintritt des Fehlers rasch an, bis die Strombegrenzung reagiert. Aufgrund des Fehlers ohne Erdberührung kann sich kein Nullsystem im Strom ausbilden. Die Ströme in den fehlerhaften Phasen stehen daher immer in Phasenopposition zueinander. Der Strom in der gesunden Phase L1 wird nur leicht verzerrt.

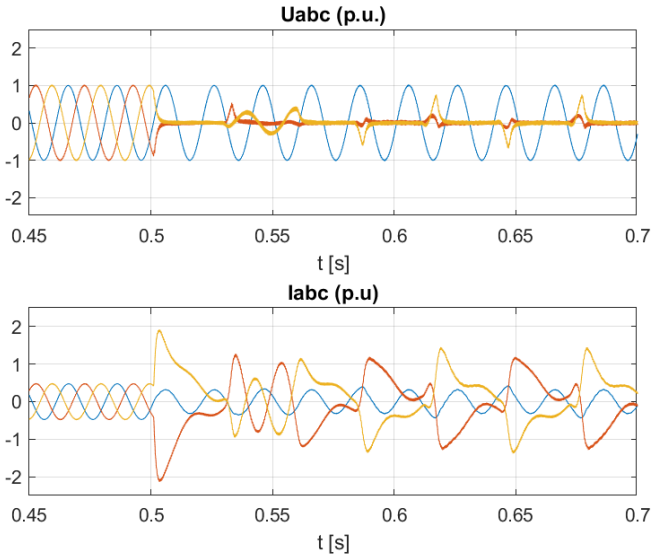


Abbildung 5.5: 2 poliger Fehler ohne Erdberührung Inselbetrieb Strom und Spannung an B1

In Abbildung 5.6 ist der Strom aus Abbildung 5.5 in symmetrischen Komponenten dargestellt. Die Darstellung ist auf den maximalen Strom normiert. An den symmetrischen Komponenten erkennt man deutlich, dass sich im Gegensatz zum Fehler mit Erdberührung (Abbildung 5.4) in diesem Fall nur ein kleines Nullsystem ausbilden kann. Dieses Nullsystem ist mit den Leiter- Erde Kapazitäten und dem daraus resultierenden kapazitiven Erdstrom zu erklären. Da die Ströme nach Fehlereintritt nicht mehr sinusförmig sind, ergibt sich auch kein konstanter Wert für den Strom in symmetrischen Komponenten. Im Mittel ergeben sich zirka folgende Werte für den Strom in symmetrischen Komponenten:

- $I^{(0)}$=0%
- $I^{(1)}$=60%
- $I^{(2)}$=40%

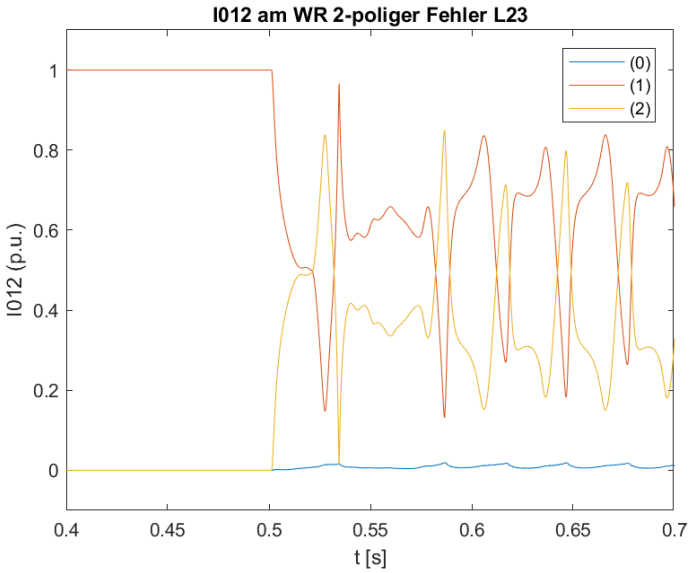


Abbildung 5.6: 2 poliger Fehler ohne Erdberührung Inselbetrieb Strom in sym. Komponenten an B1

5.1.4 3 poliger Fehler

Tritt im Inselnetz ein 3 poliger Fehler mit oder ohne Erdberührung auf, so regelt die Strombegrenzung die Spannung in allen 3 Phasen auf 0. Dies hat zur Folge, dass auch der Strom in allen 3 Phasen auf 0 absinkt. Damit ist das gesamte Inselnetz in einem spannungs- und stromlosen Zustand.

5.2 Netzgekuppelter Betrieb

Der Fehlerwiderstand an der Fehlerstelle beträgt in allen Simulation 1Ω. Der Fehlerort befindet sich in der Mitte der Leitung zwischen Wechselrichter und starrem Netz. Damit ergibt sich jeweils ein Abstand von 50km. Vor dem Fehler befindet sich das System im eingeschwungenen Zustand mit einer Belastung von S=0.5p.u..

5.2.1 1 poliger Fehler

In Abbildung 5.7 ist der Spannungs-, sowie der Stromverlauf an den Klemmen des synchron mit dem Netz laufenden Wechselrichters, bei Auftreten eines 1 poligen Fehlers dargestellt. Beim ersten positiven Nulldurchgang der Spannung nach 0,5s

Simulationsdauer tritt in der Phase 1 ein 1 poliger Erdfehler auf. Die Spannung in der fehlerbehafteten Phase L1 bricht auf circa 10% der Nennspannung ein. Die Spannung in den beiden fehlerfreien Phasen steigt an. Der Strom steigt in allen 3 Phasen auf den Nennwert an. Bei Erreichen des Nennwertes wird der Strom durch die Strombegrenzung begrenzt. Zudem ergeben sich durch die Begrenzung des Stromes Verzerrungen in Spannung und Strom. Da der Sternpunkt des Wechselrichters isoliert und der Sternpunkt des Netzes starr geerdet betrieben wird, wird der Strom an der Fehlerstelle hauptsächlich durch das Netz getrieben. Aus diesem Grund ändert sich die Phasenverschiebung zwischen den Strömen der einzelnen Phasen nicht.

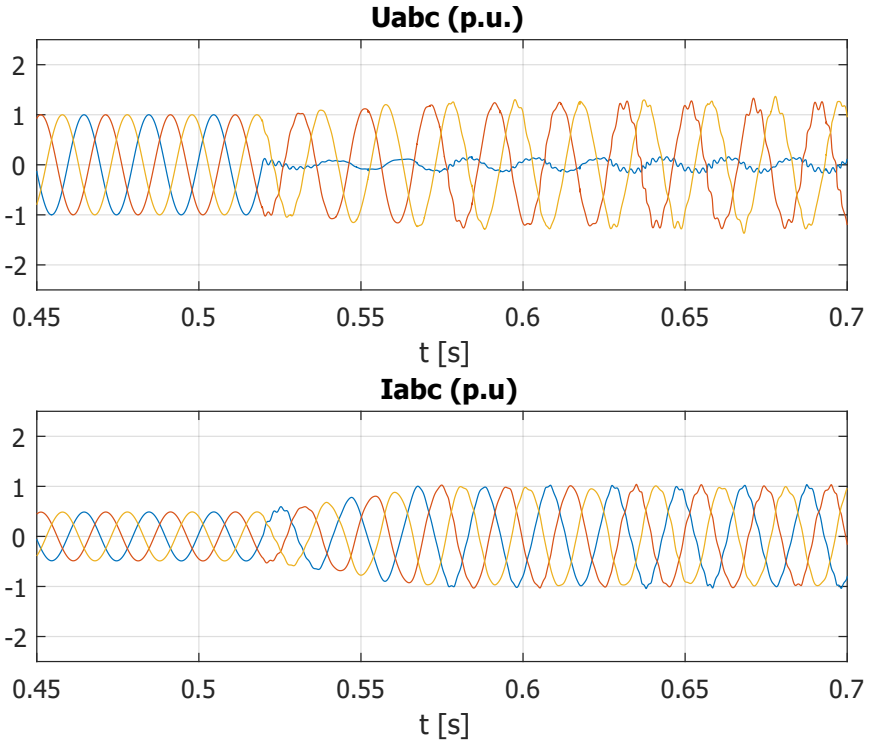


Abbildung 5.7: 1 poliger Fehler netzsynchron Strom und Spannung an B1

5.2.2 2 poliger Fehler mit Erdberührung

In Abbildung 5.8 ist der Spannungs-, sowie der Stromverlauf an den Klemmen des synchron mit dem Netz laufenden Wechselrichters, bei Auftreten eines 2 poligen Fehlers mit Erdberührung dargestellt. Beim ersten positiven Nulldurchgang der Spannung L1 nach 0,5 s Simulationsdauer tritt zwischen den Phasen L2 und

L3 ein Fehler mit Erdberührung auf. In den ersten beiden Netzperioden nach Auftreten des Fehlers zeigt sich ein Einschwingverhalten des Systems. Danach befinden sich die Regler im eingeschwungenen Zustand. Die Spannung in den beiden fehlerbehafteten Phasen bricht auf Grund des Fehlers ein. Die Spannung in der fehlerfreien Phase steigt an. Der Strom in allen 3 Phasen steigt auf den Nennwert an und wird dann durch die Strombegrenzung begrenzt.

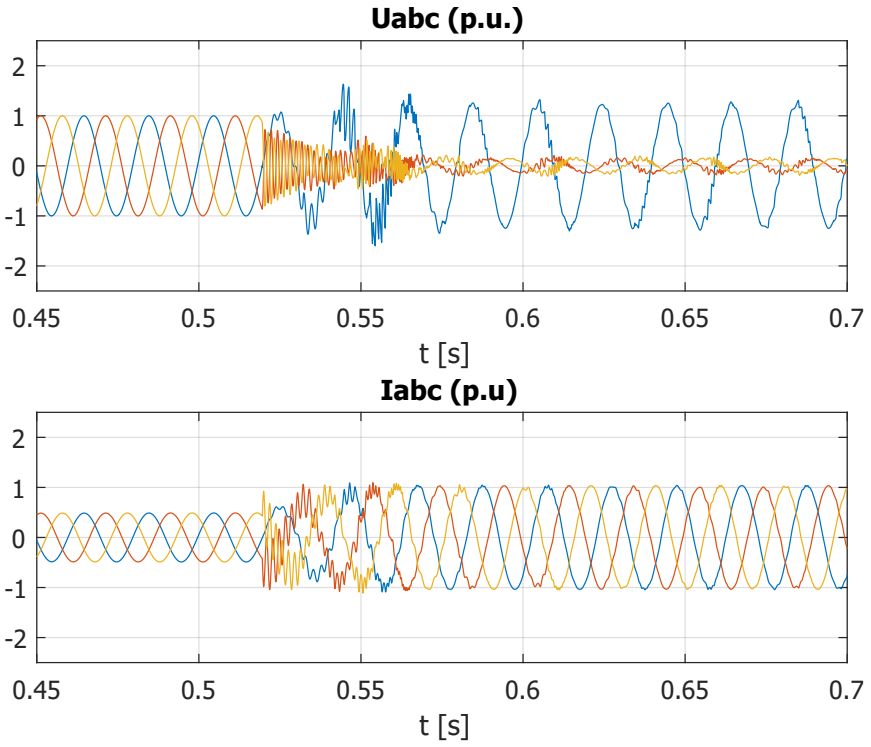


Abbildung 5.8: 2 poliger Fehler mit Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1

5.2.3 2 poliger Fehler ohne Erdberührung

In Abbildung 5.9 ist der Spannungs-, sowie der Stromverlauf an den Klemmen des synchron mit dem Netz laufenden Wechselrichters, bei Auftreten eines 2 poligen Fehlers ohne Erdberührung dargestellt. Beim ersten positiven Nulldurchgang der Spannung L1 nach 0,5s Simulationsdauer tritt zwischen den Phasen L2 und L3 ein Fehler ohne Erdberührung auf. Der Verlauf von Spannung und Strom ähnelt stark dem 2 poligen Fehler mit Erdberührung (Abbildung 5.8), mit der Ausnahme, dass die Spannung in den beiden fehlerbehafteten Phasen größer ist als im Fall ohne

Erdberührung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Strombegrenzung des Wechselrichters die Spannung an den Klemmen nicht so weit absenken muss, um den Strom auf seinen Nennwert zu begrenzen. Zudem ist, hervorgerufen durch den 2 poligen Fehlerstrom ohne Erdberührung, die Spannung in den beiden fehlerhaften Phasen phasengleich. Die Spannung in der fehlerfreien Phase ist dazu um 180° verschoben.

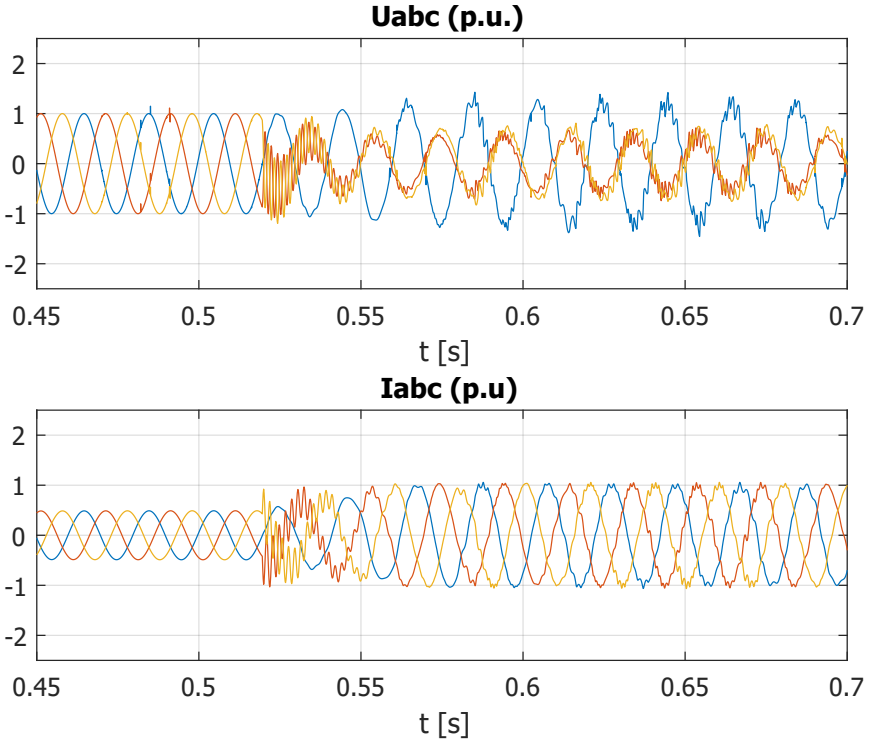


Abbildung 5.9: 2 poliger Fehler ohne Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1

5.2.4 3 poliger Fehler

In Abbildung 5.10 ist der Spannungs-, sowie der Stromverlauf an den Klemmen des synchron mit dem Netz laufenden Wechselrichters, bei auftreten eines 3 poligen Fehlers mit Erdberührung dargestellt. Beim ersten positiven Nulldurchgang der Spannung L1 nach 0,5s Simulationsdauer tritt zwischen allen 3 Phasen mit Erdberührung auf. In den ersten beiden Netzperioden nach Auftreten des Fehlers zeigt sich ein Einschwingverhalten der Regler. Danach befinden sich die Regler im eingeschwungenen Zustand. Die Spannung in den allen Phasen bricht auf

Grund des Kurzschlusses ein. Der Strom in allen 3 Phasen steigt auf den Nennwert an und wird dann durch die Strombegrenzung begrenzt. Da es sich um einen symmetrischen Fehler handelt, entstehen keine Asymmetrien in Strom und Spannung.

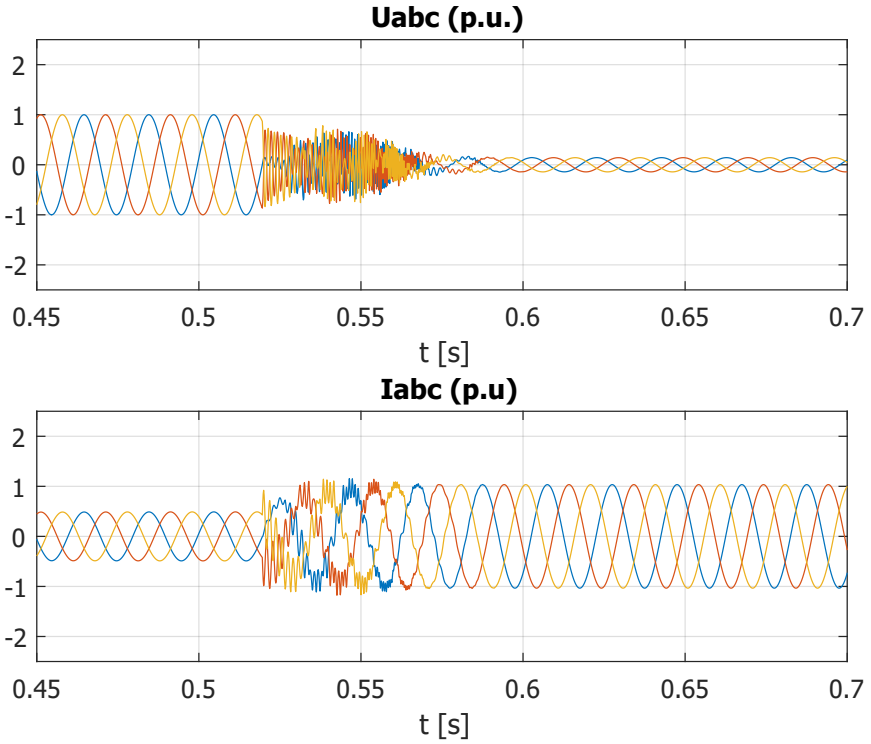


Abbildung 5.10: 3 poliger Fehler mit Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1

In Abbildung 5.11 ist der Spannungs-, sowie der Stromverlauf an den Klemmen des synchron mit dem Netz laufenden Wechselrichters, bei auftreten eines 3 poligen Fehlers ohne Erdberührung dargestellt. Beim ersten positiven Nulldurchgang der Spannung L1 nach 0,5s Simulationsdauer tritt zwischen allen 3 Phasen ohne Erdberührung auf. Der Verlauf von Strom und Spannung ähnelt stark dem des 3 poligen Fehlers mit Erdberührung.

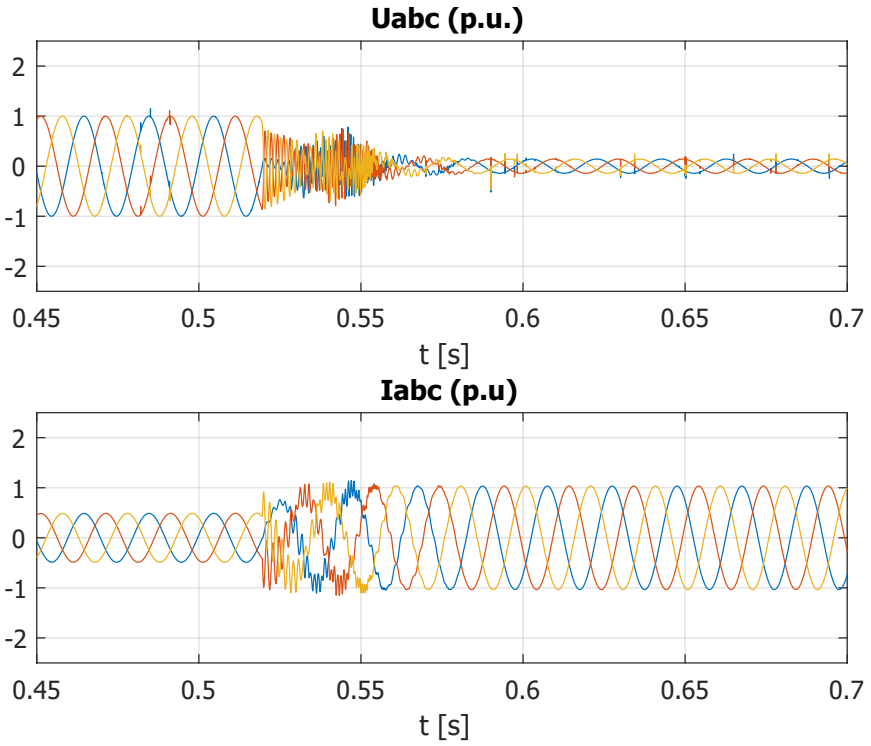


Abbildung 5.11: 3 poliger Fehler ohne Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1

6 Auswirkungen der Wechselrichtermodelle auf Netzschutzfunktionen

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Einspeisung der Wechselrichtermodelle auf Netzschutzfunktionen überprüft. Die Leitung zwischen dem Wechselrichter und dem Netz bzw. der Last im Inselbetrieb wird mit Hilfe von Differenzialschutz geschützt.

Ein Leitungsdifferenzialschutz funktioniert nach dem „Vergleichsprinzip“. Es wird die Summe der zu und abfließenden Ströme einer Leitung aufsummiert. Laut der Kirchhoff'schen Knotenregel muss diese Summe stets 0 ergeben. Gibt es auf der Leitung einen Fehler, so summieren sich die zu und abfließenden Ströme nicht mehr zu 0 und eine Stromdifferenz bleibt bestehen. Diese Stromdifferenz führt zur Schutzauslösung. Aufgrund der Ladeströme von Kabel und Leitungen, hervorgerufen durch Leiter- Erde Kapazitäten, und Wandlertoleranzen muss der Schwellwert zur Schutzauslösung auf einen Wert größer 0 eingestellt werden [2, 8]

In Abbildung 6.1 ist die Stromdifferenz zwischen Anfang und Ende der zu schützenden Leitung, zwischen netzgekuppelten Wechselrichter und starrem Netz, dargestellt. Die Stromdifferenz liegt vor dem Auftreten des Fehlers stets bei 0. Durch den Fehler steigt diese Stromdifferenz in den fehlerbehafteten Phasen stark an. Diese Differenz übersteigt sogar den Nennstrom des Wechselrichters um ein Vielfaches. Damit ist ein Auslösen des Leitungsdifferenzialschutzes im Falle des netzgekuppelten Wechselrichters bei einem Fehler auf der Leitung gewährleistet.

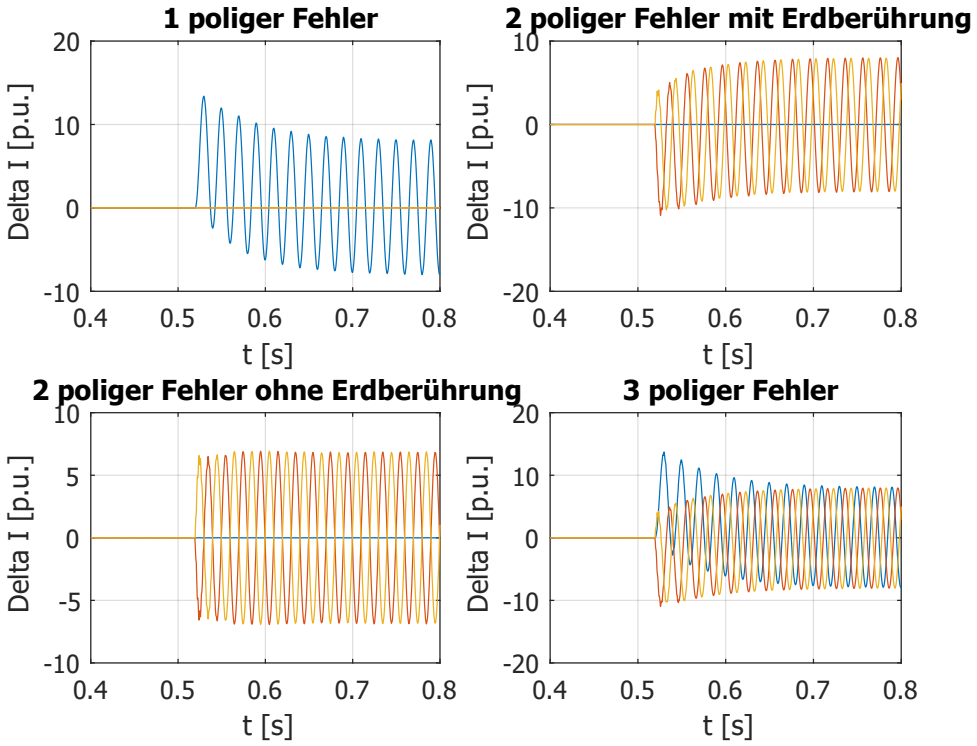


Abbildung 6.1: Stromsumme (B1 und B2 Abbildung 2.7) im Fehlerfall im gekuppelten Betrieb

In Abbildung 6.2 ist die Stromdifferenz zwischen Anfang und Ende der zu schützenden Leitung, im Inselbetrieb des Wechselrichters, dargestellt. Die Stromdifferenz liegt vor dem Auftreten des Fehlers stets bei 0. Durch den Fehler steigt diese Stromdifferenz in den fehlerbehafteten Phasen an. Da der Fehler im Inselnetz nur durch den Wechselrichter gespeist wird, ergeben sich kleinere Stromdifferenzen als im netzgekuppelten Betrieb. Eine Stromdifferenz in der Größenordnung des Nennstromes reicht aber in jedem Fall für eine Auslösung des Differenzialschutzes aus.

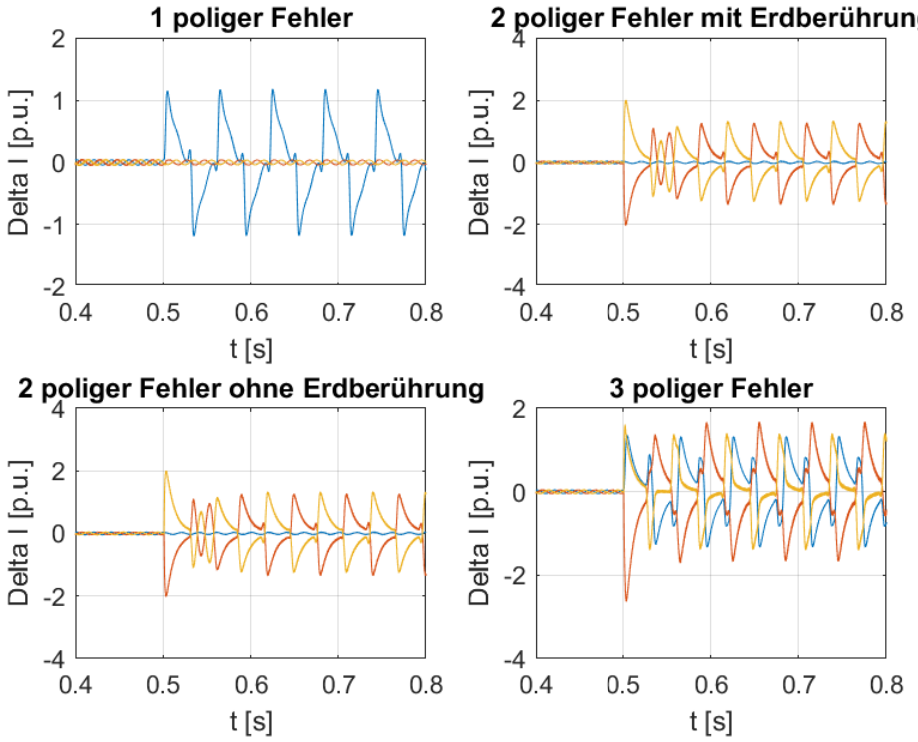


Abbildung 6.2: Stromsumme (B1 und B2 Abbildung 2.1) im Fehlerfall im Inselbetrieb

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Motivation für die vorliegende Arbeit liegt in der immer größer werdenden Anzahl von Windkraftanlagen. Um die von diesen Anlagen erzeugte erneuerbare Energie abtransportieren zu können sind neue Technologien, wie Hochspannungs-Gleichstromverbindungen (HGÜ), notwendig. Um die Auswirkungen dieser Verbindungen auf das vorhandene Drehstromnetz und die vorhandenen Schutzfunktionen abschätzen und simulieren zu können sind Simulationsmodelle dieser Verbindungen notwendig.

Im Zuge der Arbeit wurden zwei verschiedene Simulationsmodelle von Wechselrichtern erstellt. Das Wechselrichtermodell im Inselbetrieb stellt die windparkseitige Kopfstation einer HGÜ dar. Das netzgekuppelte Wechselrichtermodell stellt die Verbindung einer HGÜ zum Verbundnetz dar.

Nach der Erstellung der Modelle wurde deren Funktion durch Simulation von verschiedenen Betriebszuständen und dem Wechsel von Betriebszuständen validiert. Zudem wurde durch Simulationen das Verhalten der Modelle im Fehlerfall betrachtet.

Zum Schluss wurde die Auswirkung der beiden Modelle auf den Netzschutz betrachtet. Aus den Verläufen der Fehlerströme ist davon auszugehen, dass die Einspeisung von spannungseinprägenden Wechselrichtern keinen Einfluss auf die Schutzfunktion, einer durch Differenzialschutz geschützten Leitung, haben.

Ein weiterer Schritt ist die Vereinigung beider Modelle zu einer Hochspannungsgleichstromübertragung. Dazu müsste ein weiterer Regler modelliert werden, der die Spannung auf der Gleichstromleitung regelt. Diese Spannung ist abhängig von der Bilanz zwischen von der HGÜ auf einer Seite aufgenommen und auf der anderen Seite abgegebenen Wirkleistung. Aus diesem Grund muss dieser Regler den Wirkleistungssollwert der netzgekuppelten Seite so regeln, dass dieser genau der Wirkleistung auf der Inselseite des Wechselrichters entspricht. Danach könnte man das gesamte Modell in das am Institut bereits bestehende Modell eines Offshore- Windparks einbinden. Damit würde ein vollständiges Modell, eines über eine HGÜ angebundenen, Offshore- Windparks entstehen.

Abbildungsverzeichnis

2.1 elektrisches Gesamtsystem mit Spannungsregler 4
2.2 gesteuerte Spannungsquelle 5
2.3 Berechnungen und Normierungen 6
2.4 Spannungsregler Inselbetrieb 7
2.5 Strombegrenzung 8
2.6 gleitende Maximalwertbildung des Stromes 9
2.7 elektrisches Gesamtsystem netzgekuppelt 10
2.8 Regler netzgekuppelt 11
2.9 Stromregler netzgekuppelt 13
2.10 Berechnung Zwischenkreisspannung 14
2.11 Wirkleistungregler 15
2.12 Spannungs- und Blindleistungsregler 16
3.1 Lastsprünge ohne Strombegrenzung Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1) 17
3.2 Lastsprünge mit Strombegrenzung Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1) 18
3.3 Unsymmetrische Last 1 phasig Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1) 19
3.4 Unsymmetrische Last 2 phasig Inselbetrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.1) 20
3.5 Wirkleistungs- Sollwertsprünge netzgekuppelter Betrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 21
3.6 Wirkleistungs- Sollwertsprung 3phasig netzgekuppelter Betrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 22
3.7 Wirkleistungs- Sollwertsprünge mit Strombegrenzung netzgekuppelter Betrieb (rot: Verlauf mit deaktivierter Strombegrenzung, blau: Verlauf mit aktivierter Strombegrenzung, Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 24
3.8 Wirkleistungs- Sollwertsprünge mit Strombegrenzung Detail netzgekuppelter Betrieb (rot: Verlauf mit deaktivierter Strombegrenzung, blau: Verlauf mit aktivierter Strombegrenzung, Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 25

3.9 Blindleistung- Sollwertsprünge netzgekuppelter Betrieb (Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 26
3.10 Frequenzrampe Wechselrichter (Verläufe an B1 Abbildung 2.7) . 27
3.11 Frequenzsprung Wechselrichter Verläufe an B1 Abbildung 2.7) . . 28
3.12 Frequenzrampe Netz Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 29
3.13 Frequenzsprung Netz Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 30
3.14 Unsymmetrisches Netz Ua=80%, Spannung und Strom Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 31
3.15 Unsymmetrisches Netz Ua=80%, Leistung Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 32
3.16 Unsymmetrisches Netz Ua,Ub=80%, Spannung und Strom Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 33
3.17 Unsymmetrisches Netz Ua, Ub=80%, Leistung Verläufe an B1 Abbildung 2.7) 34
4.1 Variation der Proportionalkonstanten K des Spannungsreglers im Inselbetrieb (Signalverlauf am Ausgang des U- Reglers) 36
4.2 Variation der Integrationskonstanten I des Spannungsreglers im Inselbetrieb (Signalverlauf am Ausgang des U- Reglers) 37
4.3 Verlauf Strombegrenzung Ibeg=2-10 38
4.4 Verlauf Strombegrenzung Ibeg=2-10 vergrößert 39
4.5 Verlauf Strommaximum Ibeg=2-10 40
4.6 Variation der Integrationskonstanten I der Leistungsregler im netzgekuppelter Betrieb (Signalverlauf $i_{d,soll}$ Abbildung 2.8) 41
4.7 Variation der Proportionalkonstanten P der Leistungsregler im netzgekuppelter Betrieb (Signalverlauf $i_{d,soll}$ Abbildung 2.8) . . . 42
4.8 Variation der PT1 Zeitkonstanten der Leistungsregler im netzgekuppelter Betrieb 43
4.9 Variation der Proportionalkonstanten k_p des Stromreglers im netzgekuppelter Betrieb (Signalverlauf U (p.u.) Abbildung 2.9) 44
5.1 1 poliger Fehler Inselbetrieb Strom und Spannung an B1 45
5.2 1 poliger Fehler Inselbetrieb Strom in sym. Komponenten an B1 . 46
5.3 2 poliger Fehler mit Erdberührung Inselbetrieb Strom und Spannung an B1 47

5.4 2 poliger Fehler mit Erdberührung Inselbetrieb Strom in sym. Komponenten an B1 48
5.5 2 poliger Fehler ohne Erdberührung Inselbetrieb Strom und Spannung an B1 49
5.6 2 poliger Fehler ohne Erdberührung Inselbetrieb Strom in sym. Komponenten an B1 50
5.7 1 poliger Fehler netzsynchron Strom und Spannung an B1 51
5.8 2 poliger Fehler mit Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1 52
5.9 2 poliger Fehler ohne Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1 53
5.10 3 poliger Fehler mit Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1 54
5.11 3 poliger Fehler ohne Erdberührung netzsynchron Strom und Spannung an B1 55
6.1 Stromsumme (B1 und B2 Abbildung 2.7) im Fehlerfall im gekuppelten Betrieb 57
6.2 Stromsumme (B1 und B2 Abbildung 2.1) im Fehlerfall im Inselbetrieb 58

Literatur

[1] Bernd Engel. *Synthetische Schwungmasse, 12.ETG/GMA- Fachtagung Netzregelung und Systemfuehrung*. 2017.

[2] Brauner Gawlik. *Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Skriptum zur Vorlesung*. 2016.

[3] Wrede H. *Verhalten von Umrichtern am Netz, 12.ETG/GMA- Fachtagung Netzregelung und Systemfuehrung*. 2017.

[4] Ehrlich I. *Aspekte der Umrichterregelung in AC- Offshore Netzen, 12.ETG/GMA- Fachtagung Netzregelung und Systemfuehrung*. 2017.

[5] Ertl J. *Leistungselektronik und Stromrichtertechnik, Skriptum zur Vorlesung*. 2013.

[6] N. M. Kirby, Lie Xu, M. Luckett, and W. Siepmann. Hvdc transmission for large offshore wind farms. *Power Engineering Journal*, 16(3):135–141, June 2002.

[7] Stefan Laudahn, Muenchen [Verlag] Verlag Dr. Hut, and Technische Universitaet Braunschweig [Grad verleihende Institution]. *Dynamisches Verhalten von wechselrichterbasierten Erzeugungsanlagen im Kontext eines sicheren und stabilen Netzbetriebs*. Verlag Dr. Hut, Muenchen, 1. auflage edition.

[8] Wurm M. *Schutztechnik in elektrischen Netzen, Skriptum zur Vorlesung*. 2017.

[9] F. Schettler, H. Huang, and N. Christl. Hvdc transmission systems using voltage sourced converters design and applications. In *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, volume 2, pages 715–720 vol. 2, July 2000.

[10] X. Wei and G. Tang. Analysis and control vsc-hvdc under unbalanced ac conditions. In *2006 International Conference on Power System Technology*, pages 1–5, Oct 2006.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), 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, 01.03.2019 _____