

ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG EINES STATCOM IN EIN ANALOGES NETZMODELL

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Technische Universität Graz

Vorgelegt von
Ing. Manuel Galler, BSc

Betreuer
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner

Institutsleiter:
Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.iean.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Oktober – 2018



Danksagung

Diese Arbeit bildet den Abschluss meines Studiums und es gab einige Personen die daran nicht unwesentlich beteiligt waren, dass es überhaupt soweit gekommen ist.

Allen voran ist es die Lerngruppe der ersten Semester, welche sich bereits in den Anfangstagen des Elektrotechnikstudiums formierte. Nur mithilfe dieser Gruppe konnten die Start- und Anfangsstrapazen überwunden werden. Einen großen Dank an euch Burschen!

In der Mitte meines Bachelor-Studiums verlagerten sich nicht nur der Uni-Alltag, sondern auch die sozialen Gepflogenheiten eines Studenten - nämlich in die Räumlichkeiten des Dynamobauzeichensaals. Dieser „Verein“ förderte nicht nur meinen Studienerfolg, sondern formte auch mein soziales Umfeld erheblich. Ich danke all meinen Kollegen des Dynamobauzeichensaals für diese geile Zeit!

Nur durch den starken Rückhalt meiner Eltern und meiner Schwester war es mir möglich von einem bereits geregelten Berufsalltag ins Studentendasein zu wechseln. Die gesamte Familie stand während des Studiums hinter mir und motivierte mich dutzende Male mit dem Satz: „Wie geht's denn so im Studium?“. Vielen Dank an meine Eltern, meiner Schwester und der gesamten Familie!

Einen großen Dank an meine Cousine Niki für das, wirklich immer sehr spontane, Korrekturlesen, nicht nur bei dieser Arbeit.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 07.11.2018

Ing. Manuel Galler, BSc

Kurzfassung

Durch den Einsatz von Leistungs-Halbleitern in der Energietechnik sind FACT-Systeme keine theoretischen Komponenten mehr. Die Verwendung solcher Systeme ist ein fester Bestandteil der heutigen Netztopologie, der in den Netzberechnungen und zukünftigen Netzkonzepten mitbetrachtet werden muss. Um dabei nicht ausschließlich auf mathematische Modelle angewiesen zu sein, soll ein Miniatur-FACT für ein analoges Netzmodell entwickelt und in diesem implementiert werden.

Das zu entwickelnde flexible Drehstromübertragungssystem soll als STATCOM aufgebaut werden. Die Referenzanwendung besteht darin, dass Spannungsniveau an einem vorgegebenen Netzknoten zu halten. Die Spannungsschwankung wird durch eine Lastzuschaltung am selben Netzknoten hervorgerufen.

Schlüsselwörter: FACT, STATCOM, Spannungsregelung

Abstract

With the advent of power semiconductors in power engineering FACT-systems are no longer theoretical components. The use of such systems is a main element of today's network topologies. This must be considered in network calculations and future network concepts. To rely not only on mathematical models there should be a miniature FACT developed. This should be implemented into an analog network model. The FACT should be set up as a STATCOM module. The reference application is to hold the voltage level on a special network node. The voltage fluctuation will be generated by an extra load on the given network node.

Keywords: FACT, STATCOM, voltage control

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 8 |
| Symbolverzeichnis | 9 |
| 1 Kurzfassung | 12 |
| 1.1 Ziel | 12 |
| 1.2 Methode | 12 |
| 1.3 Ergebnisse | 12 |
| 1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick | 12 |
| 2 Einleitung | 13 |
| 2.1 Allgemeines zu flexiblen Drehstromübertragungssystemen | 13 |
| 2.2 Allgemeines zur Spannungsstützung | 13 |
| 2.2.1 Spannungsstützung mit STATCOM | 14 |
| 2.2.1 Vorgehensweise zur Entwicklung und Implementierung eines STATCOM..... | 14 |
| 2.3 Untersuchungen mit Hilfe eines Netzmodells..... | 15 |
| 2.3.1 Komponenten | 16 |
| 2.3.2 Szenario | 19 |
| 3 Aufbau und Funktion eines STATCOMS | 20 |
| 3.1 Spannungszwischenkreisumrichter..... | 20 |
| 3.2 Raumzeigermodulation | 21 |
| 3.3 Netzfilter | 23 |
| 4 Regelung eines STATCOM..... | 25 |
| 4.1 Modaltransformation | 25 |
| 4.1.1 Clark-Transformation | 25 |
| 4.1.2 Park-Transformation | 25 |
| 4.2 Reglerauslegung | 26 |
| 4.2.1 Übersicht Regelungskonzept | 26 |
| 4.2.2 Stromregler..... | 27 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.3 | Spannungszwischenkreisregler | 29 |
| 4.2.4 | Netzspannungsregler..... | 30 |
| 4.2.5 | Bilinear-Transformation und Anti-Wind-Up..... | 31 |
| 4.2.6 | Ermittlung der Reglerparameter..... | 32 |
| 5 | Simulation in MATLAB® / Simulink® | 35 |
| 5.1 | Überblick Gesamtsystem..... | 35 |
| 5.2 | Vorladung | 37 |
| 5.3 | Regelungssystem | 38 |
| 5.3.1 | Filter und Transformation..... | 39 |
| 5.3.2 | Stromregler..... | 40 |
| 5.3.3 | Netzspannungsregler..... | 41 |
| 5.3.4 | Strom- und Spannungsbegrenzung | 41 |
| 5.4 | Generierung der Schaltsignale..... | 42 |
| 5.5 | Steuerungslogik des STATCOM..... | 43 |
| 5.6 | Simulationsergebnisse in MATLAB® / Simulink® | 44 |
| 6 | Entwicklung der Hardware | 45 |
| 6.1 | Struktur..... | 45 |
| 6.2 | dSpace Hard- und Software..... | 46 |
| 6.3 | Verbindungsplatine | 48 |
| 6.3.1 | Schaltplanentwurf | 48 |
| 6.3.2 | Platinen | 48 |
| 6.4 | Kommunikationsplatine..... | 49 |
| 6.4.1 | Schaltplanentwurf | 49 |
| 6.4.2 | Platine | 50 |
| 6.5 | Stromrichterplatine..... | 51 |
| 6.5.1 | Schaltplanentwurf | 51 |
| 6.5.2 | Platinen | 52 |
| 6.6 | Gesamtsystem am analogen Netzmodell..... | 53 |
| 6.7 | Verhalten der Hardware am Netzmodell | 54 |
| 7 | Diskussion..... | 55 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------|-----------|
| 7.1 | Ausblick | 56 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 57 |
| 9 | Verzeichnisse | 59 |
| 9.1 | Abbildungsverzeichnis | 59 |
| 9.2 | Bilderverzeichnis | 59 |
| 9.3 | Tabellenverzeichnis | 60 |
| 10 | Anhang | 61 |
| 10.1 | Initialisierung der Simulation | 61 |
| 10.2 | Reglerauslegung | 63 |
| 10.3 | Diverse Berechnungen | 65 |
| 10.4 | Schaltpläne | 67 |
| 10.4.1 | Verbindungsplatine | 67 |
| 10.4.2 | Kommunikationsplatine | 68 |
| 10.4.3 | Stromrichterplatine | 69 |
| 10.5 | Signalmapping dSpace zu STATCOM | 71 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|---|
| AC | Alternating Current - Wechselstrom |
| ADC | Analog to Digital Converter - Analog zu Digital Umsetzer |
| B6 | Brückenschaltung mit 6 Dioden |
| BNC-Buchse | Bayonet Neill Concelman - Buchse |
| DC | Direct Current - Gleichstrom |
| D-Sub | D-Subminiature |
| engl.: | In Englisch: |
| ESB | Ersatzschaltbild |
| FACTS | Flexible Alternating Current Transmission System Flexible Drehstromübertragungssysteme |
| IDC | Insulation Displacement Connector |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistors |
| komp. | Kompensation |
| PC | Personal Computer |
| PCC | Point of Common Coupling - Anschlusspunkt |
| PLL | Phase Locked Loop - Phasenregelschleife |
| pu | Per-Unit-System |
| PWM | Pulsweitenmoulation |
| SI-Einheit | Internationales Einheitensystem |
| STATCOM | Static Synchronous Compensator |
| SVPWM | Space Vector modulation - Raumzeigermodulation |
| TU | Technische Universität |
| VSC | Voltage Source Converter (Spannungsumrichter) |

Symbolverzeichnis

| | |
|------------------------|---|
| $\Delta U(z)$ | Delta Regelgröße |
| b_1 und b_0 | Koeffizienten – Regler im z-Bereich |
| C | Kapazität |
| C_{AW} | Anti-Windup Verstärkungsfaktor |
| C_{DC} | Zwischenkreiskapazität |
| C_{F1} | Filterkapazität |
| d_1 | Tastverhältnis |
| e_{abc} | Regelabweichung Netzspannungsregler |
| e_{DC} | Regelabweichung Zwischenkreisspannungsregler |
| e_i | Regelabweichung Stromregler |
| $E(z)$ | Regelabweichung im z-Bereich |
| f | Frequenz |
| f_{swi} | Schaltfrequenz |
| G_d | Übertragungsfunktion der Umrichterdynamik |
| G_{ui} | Übertragungsfunktion des Filters |
| $\mathbf{G}_{ui_{dq}}$ | Übertragungsfunktionsmatrix des Filters |
| I | Strom |
| $i_{C1}(t)$ | Zeitveränderlicher Strangstrom – Phase 1 |
| i_C^α | Zeitveränderlicher Umrichterstrom- α -Komponente |
| i_C^β | Zeitveränderlicher Umrichterstrom- β -Komponente |
| i_C^d | Zeitveränderlicher Umrichterstrom- d-Komponente |
| i_C^q | Zeitveränderlicher Umrichterstrom- q-Komponente |
| $i_{DC}(t)$ | Zeitveränderlicher Zwischenkreisstrom |
| k_I | Korrekturfaktor – Strommessung |
| $K_{I_{abc}}$ | Netzspannungsregler – integrale Verstärkung |
| $K_{I_{DC}}$ | Zwischenkreisregler – integrale Verstärkung |
| K_{I_i} | Stromregler - integrale Verstärkung |
| K_{Iz} | Integraler Verstärkungsfaktor im z-Bereich |
| $K_{P_{abc}}$ | Netzspannungsregler – proportionale Verstärkung |

| | |
|------------------------|--|
| $K_{P_{DC}}$ | Zwischenkreisregler – proportionale Verstärkung |
| K_{P_i} | Stromregler - proportionale Verstärkung |
| K_{P_z} | Proportionaler Verstärkungsfaktor im z-Bereich |
| k_U | Korrekturfaktor - Spannungsmessung |
| L | Induktivität |
| L_{F1} | Filterinduktivität |
| $m(t)$ | Zeitveränderlicher Modulationsgrad |
| P_{abc} | Regelstrecke – Netzspannung |
| P_{DC} | Regelstrecke - Zwischenkreisspannung |
| $p_{DC}(t)$ | Zeitveränderliche Zwischenkreisleistung |
| P_i | Stromregelstrecke |
| $p_N(t)$ | Zeitveränderliche Netzleistung |
| R | Widerstand |
| R_{abc} | Netzspannungsregler |
| R_{DC} | Zwischenkreisregler |
| R_{F1} | Filterwiderstand |
| R_i | Stromregler |
| R_{in} | Innenwiderstand der Spannungsmessung |
| RP_i | Übertragungsfunktion - Geschlossener Stromregelkreis |
| $R(z)$ | Regler im z-Bereich |
| T_{abc} | Netzspannungsregler – Zeitkonstante |
| T_C^{-1} | Clark-Transformationsmatrix |
| T_{DC} | Zwischenkreisregler – Zeitkonstante |
| T_{F1} | Filterzeitkonstante |
| T_i | Stromregler - Zeitkonstante |
| $T_P(\varphi(t))^{-1}$ | Inverse Park-Transformationsmatrix |
| T_s | Abtastrate - Regelungssystem |
| T_{swi} | Schaltperiode |
| U | Spannung |
| $u_a(t)$ | Zeitveränderliche Strangspannung – Phase a |
| u_C^α | Zeitveränderliche Umrichterspannung – α -Komponente |

| | |
|------------------------------|---|
| u_c^β | Zeitveränderliche Umrichterspannung – β -Komponente |
| $u_c^{\alpha\beta}(t)$ | Umrichterstrangspannungsmatrix in $\alpha \beta$ |
| $u_c^{dq}(t)$ | Umrichterstrangspannungsmatrix in dq |
| $\bar{u}_c^{\alpha\beta}(t)$ | Zeitveränderlicher Umrichterspannungsvektor |
| \bar{u}_{c1} | Mittlere Umrichterausgangsspannung |
| U_{DC} | Zwischenkreisspannung |
| $u_{DC}(t)$ | Zeitveränderliche Zwischenkreisspannung |
| $u_{Komp.}$ | Kompensationsspannungsmatrix |
| $u_{Komp.}^d$ | Kompensationsspannung - d-Komponente |
| $u_{Komp.}^q$ | Kompensationsspannung - q-Komponente |
| $U_{max}(z)$ | Beschränkte Regelgröße |
| u_N^α | Zeitveränderliche Netzspannung – α -Komponente |
| u_N^β | Zeitveränderliche Netzspannung – β -Komponente |
| U_N^d | Konstante Netzspannung - d-Komponente |
| u_N^d | Zeitveränderliche Netzspannung – d-Komponente |
| u_N^q | Zeitveränderliche Netzspannung – q-Komponente |
| $U(z)$ | Regelgröße im z-Bereich |
| V_{abc} | Netzspannungsregler – Verstärkung |
| V_{DC} | Zwischenkreisregler – Verstärkung |
| V_i | Stromregler - Verstärkung |
| Z | Impedanz |
| $Z_{Leitung}$ | Leitungsimpedanz |

1 Kurzfassung

1.1 Ziel

Ziel ist die Entwicklung und Implementierung eines Moduls aus dem Bereich Flexibler Drehstrom-Übertragungssysteme (FACTS) in das vorhandene analoge Netzmodell am Institut für Elektrische Anlagen und Netze. Das zu realisierende Modul soll als ein statischer Kompensator, ein sogenannter STATCOM, ausgeführt werden. Dieser soll zur Spannungsstützung bei starkem Lastwechsel eingesetzt werden können.

1.2 Methode

In MATLAB® / Simulink® wurde unter Zuhilfenahme der Toolbox Simscape Electrical™ ein Modell des verwendeten analogen Netzmodells aufgebaut und das STATCOM Modul mit seiner Regelung darin integriert, um die Funktionsweise der zu realisierenden Hardware zu überprüfen. Anschließend wurde die Hardware aufgebaut und am realen analogen Netzmodell getestet.

1.3 Ergebnisse

Durch die Simulation konnte eine Variante entwickelt werden, welche technisch sinnvoll und möglich ist. Die Simulationsergebnisse zeigten ein realisierbares Konzept für ein STATCOM am analogen Netzmodell, welches dort zur Spannungsstützung eingesetzt werden kann.

Das reale STATCOM Modul am analogen Netzmodell ergab annäherungsweise jene Ergebnisse der Simulation und konnte zur Spannungsstützung eingesetzt werden.

1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Entwicklung und anschließende Implementierung eines STATCOM Moduls in ein analoges Netzmodell erforderte eine elektrotechnisch fächerübergreifende Denkens- und Arbeitsweise: von der Simulation über die Regler-Auslegung, das Platinen-Layout bis hin zur anschließenden Inbetriebnahme des Moduls. Dadurch war es in dieser Arbeit nicht möglich auf die einzelnen Fachbereiche bzw. Themengebiete wie zum Beispiel die Reglerauslegung oder das Filterdesign detailliert einzugehen. In diesen Teilbereichen ist eine detaillierte Betrachtung sowie eine weitere Optimierung möglich und sinnvoll.

2 Einleitung

2.1 Allgemeines zu flexiblen Drehstromübertragungssystemen

Eine Definition des Begriffes FACTS und deren verschiedenen Ausführungsarten wurde bereits im Jahre 1997 im IEEE [1] veröffentlicht.

FACTS sind Systeme zur Verbesserung von Netzeigenschaften. Diese Systeme können durch Zusammenwirken von passiven Bauteilen, wie Kondensatoren und/oder Induktivitäten, mit Thyristoren ausgeführt werden. Mit den Thyristoren wird im Prinzip der Leitwert der passiven Komponenten stufenlos geregelt. Mit dem Einzug der abschaltbaren Leistungshalbleiter in die Energietechnik entstanden Konzepte mit selbstgeführten Umrichtern, welche durch eine entsprechende Ansteuerung induktive oder kapazitive Blindleistung bis zur Umrichter-Nennleistung ausgeben können.

Durch den Einsatz verschiedener Netzregelkonzepte können Lastflussregelungen, sowie Spannungsregelungen realisiert werden. Dabei ist auf das gesamte Netzregelungskonzept stets Rücksicht zu nehmen um Reglerinstabilitäten zu vermeiden.

Mit FACTS kann ebenfalls eine Verbesserung der statischen Stabilität sowie der dynamischen Stabilität erreicht werden. Für eine funktionierende Umsetzung gilt hier, dass stets eine Anpassung an die gegebene Netzkonfiguration zu berücksichtigen ist.

2.2 Allgemeines zur Spannungsstützung

Änderungen des Spannungsniveaus sind in einem Netz im Nennbetrieb üblich und müssen in den dafür vorgeschriebenen Toleranzbereich bleiben. Diese betriebsmäßigen Spannungsänderungen können durch verschiedenste Ursachen entstehen, wie zum Beispiel Laständerung, Änderung der Netztopologie oder Veränderung der Einspeisesituation.

Um die Spannung im Toleranzbereich zu halten werden primär Spannungsregler in Kraftwerken eingesetzt. Wenn sich im Verteilnetz dauerhafte Lastzustände ergeben bei denen eine Spannung vorherrscht, die sich am oberen oder unteren Toleranzbereich befindet, werden unter anderem Regeltransformatoren eingesetzt, welche die Spannung Stufenweise verändern können.

In Übertragungsnetzen wird stets auf eine ausgleichende Blindleistungsbilanz der einzelnen Netzknoten geachtet, da diese in direktem Zusammenhang mit dem Spannungsniveau steht. Um an einem bestimmten Netzknoten die Blindleistung gezielt zu beeinflussen, werden flexible Drehstromübertragungssysteme eingesetzt.

2.2.1 Spannungsstützung mit STATCOM

STATCOMs sind selbstgeführte Spannungszwischenkreis-Umrichter, welche zur Verbesserung der Spannungsstabilität, Haltung des Spannungsniveaus oder zur Leistungsfaktorkorrektur eingesetzt werden. In Abbildung 2.1 ist ein möglicher Anwendungsfall eines STATCOM dargestellt, dabei handelt es sich um eine Spannungsregelung oder Leistungsfaktorkorrektur an der Sammelschiene PCC.

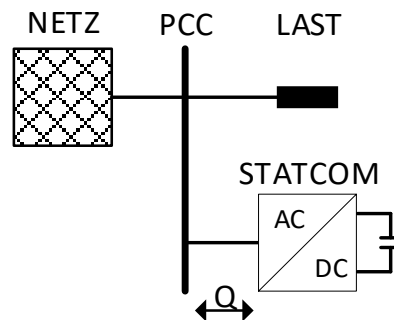


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer STATCOM Anwendung

Durch die eingesetzte Technologie von abschaltbaren Halbleitern und der eines Spannungszwischenkreisumrichters, kann ein STATCOM stufenlos regelbar induktive und kapazitive Blindleistung mit dem Netz austauschen. Die Grenzen sind durch den maximalen Strom der Leistungshalbleiter gegeben. Wirkleistung wird im Betrieb nur für die Deckung der Verluste – überwiegend Schaltverluste – benötigt.

Sofern die Spannung an einem Verknüpfungspunkt ein unzulässiges Spannungsniveau erreicht, regelt der STATCOM die Spannung an dem Verknüpfungspunkt auf einen zulässigen Wert. Um in einem Netzknoten das Spannungsniveau zu beeinflussen muss dort die Blindleistungsbilanz verändert werden. Dies geschieht durch Blindleistungsbezug bzw. -lieferung vom STATCOM an den Netzknoten.

2.2.1 Vorgehensweise zur Entwicklung und Implementierung eines STATCOM

Um einen statischen Kompensator zu entwickeln und zu implementieren, müssen zuerst die Rahmenbedingungen festgelegt werden. Die Rahmenbedingungen für eine realistische Simulation und eine Realisierung als Hardware überschneiden sich, haben aber unterschiedliche Schwerpunkte.

Die Rahmenbedingungen für eine Simulation ergeben sich durch die Netzverhältnisse im Nennbetrieb und im Fehlerfall sowie der geforderten Nennwerte des STATCOMs.

Die Rahmenbedingungen für den Aufbau eines statischen Kompensators umfassen neben den elektrotechnischen Eigenschaften auch hardware spezifische Eigenschaften wie Größe der einzelnen Komponenten und Kosten der Bauteile.

Mit den definierten Randbedingungen für die Simulation und den Aufbau kann eine detailliertere Betrachtung begonnen werden.

Mit gegebenen Rahmenbedingungen und einer Konzeptidee wird eine vereinfachte Simulation aufgebaut. Diese zeigt, ob das gewählte Konzept funktional ist und das gewünschte Ergebnis bringen kann. Ein gefordertes und plausibles Simulationsergebnis ist Voraussetzung um mit dem gewählten Konzept in die Umsetzung zu gehen.

In wie weit die verwendete Simulation vereinfacht werden kann, hängt von den Rahmenbedingungen ab, denn mit jeder Vereinfachung wird ein Simulationsmodell ungenauer im Ergebnis.

Nach der Verifizierung eines Konzeptes in der Simulation kann die Hardware, wie in der Simulation angenommen, aufgebaut werden. Durch weitere Tests an einem realen Netzmodell wird sichergestellt, dass durch die angewendeten Vereinfachungen in der Simulation keine unzulänglichen Abweichungen entstanden sind.

Die Ergebnisse der Simulation und vom realen Netzmodell werden verglichen um festzustellen, wie groß die Abweichung zwischen Simulation und realer Anwendung ist.

2.3 Untersuchungen mit Hilfe eines Netzmodells

Um aktuelle und zukünftige Netzsituationen beurteilen zu können, werden heutzutage Berechnungsprogramme eingesetzt in welchen Übertragungs- und Verteilnetze abgebildet sind. In diesen Modellen werden verschiedenen Netzsituationen nachgebildet und in Abhängigkeit von Einspeisung, Last und vorherrschender Netztopologie berechnet. Diese berücksichtigen auch den Einsatz von im Netz vorhandenen FACTS. Die daraus resultierenden Ergebnisse nutzt man um die aktuelle Netzsituation zu beurteilen und abzuschätzen, welche Netzsituationen vermieden werden müssen. Sie beschränken sich jedoch meist auf Lastfluss- und Fehlerberechnung, was keine Aussage über die genaueren Strom- und Spannungsverläufe bringt, welche zum Zweck der Realisierung jedoch benötigt werden. Um solche Informationen zu erhalten sind detailliertere Simulationen, Versuche direkt am Netz oder ein analoges Netzmodell notwendig.

Um zukünftige Konzepte für bereits bestehende Netze zu testen oder bestehende Anwendungen zu verbessern werden neben computergestützten Simulationen analoge Netzmodelle eingesetzt. An solchen Modellen können unter realitätsnahen Bedingungen Netzfehler oder spezielle Netzsituationen nachgebildet werden.

In analogen Netzmodellen werden ausgewählte Teile eines Netzes hardwaremäßig aufgebaut um dort spezielle Netzsituationen nachzustellen und neue Techniken zu erproben. Diese werden in einem gewählten Maßstab, zum Beispiel 1:1000 für Hoch- und Höchstspannungsnetze ausgeführt. Dabei entsprechen die Strom- und Spannungswerte dem Maßstab und die Impedanzen werden mit den Originalwerten eingesetzt.

Für die Konzeptentwicklung von flexiblen Drehstromübertragungssystemen, vor allem bei Kompensatoren mit Stromrichtertechnologie, sind analoge Netzmodelle besonders hilfreich. Für detaillierte Simulation solcher Betriebsmittel wird ein hoher Rechenaufwand benötigt, daher dauern diese Berechnungen sehr lange. Außerdem werden bei Simulationen einige

Vernachlässigungen in Kauf genommen, was zu Verfälschungen der Ergebnisse führen kann.

Der zu entwickelnde STATCOM wird in das analoge Netzmodell am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz implementiert. Das verwendete Modell hat die Maßstäbe wie in Tabelle 2.1 beschrieben. Generell ist es für 1 A Dauerstrom und 230 V Phasenspannung beziehungsweise für 400 V verkettete Spannung ausgelegt.

Tabelle 2.1: Maßstäbe des analogen Netzmodells

| 50 Hz Netzmodell | Maßstab | Verhältnis |
|------------------|-----------|--------------|
| Spannungsmaßstab | 1:1000 | 1 V → 1 kV |
| Strommaßstab | 1:1000 | 1 A → 1 kA |
| Leistungsmaßstab | 1:1000000 | 1 VA → 1 MVA |
| Impedanzmaßstab | 1:1 | 1 Ω → 1 Ω |

2.3.1 Komponenten

2.3.1.1 Stabilisierte Spannungsquelle

Das gesamte analoge Netzmodell wird von einer stabilisierten Spannungsquelle, zu sehen in Bild 2.1, gespeist. Die verkettete Spannung beträgt 220 V, diese Spannung wird konstant gehalten und ist mit 6 A abgesichert.



Bild 2.1: Stabilisierte Spannungsquelle

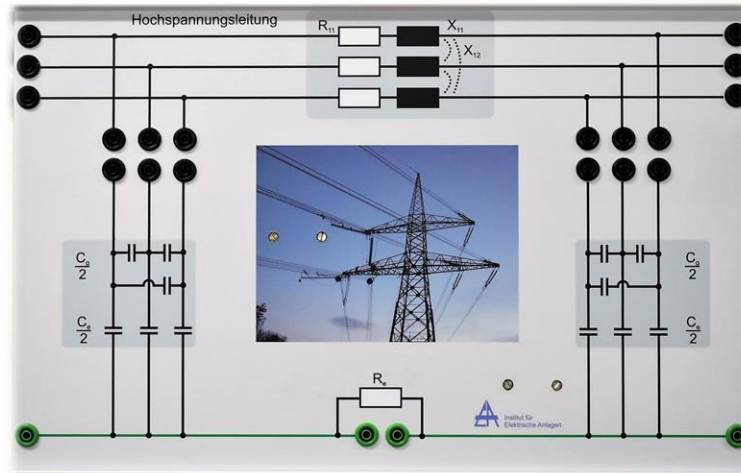


Bild 2.3: Freileitungsmodul

2.3.1.4 Last

Als Belastung wird ein steckbarer Belastungswiderstand verwendet, in Bild 2.4 ist die verwendete Last abgebildet. Diese Last hat drei unterschiedliche Werte für Belastungswiderstände. Von jedem Wert der Belastungswiderstände sind jeweils 3 Stück vorhanden um jede Phase mit dem gleichen Wert belasten zu können. In Tabelle 2.3 sind die möglichen Widerstandswerte eingetragen.

Tabelle 2.3: Werte der Belastungswiderstände

| Widerstand | L1 | L2 | L3 |
|------------|-------|-------|--------|
| R1 | 220 Ω | 660 Ω | 1500 Ω |
| R2 | 220 Ω | 660 Ω | 1500 Ω |
| R3 | 220 Ω | 660 Ω | 1500 Ω |

Die in Bild 2.4 aufgebaute Belastung entspricht einer Sternschaltung mit 220 Ω und einer weiteren Sternschaltung mit 660 Ω, parallel dazu geschaltet.

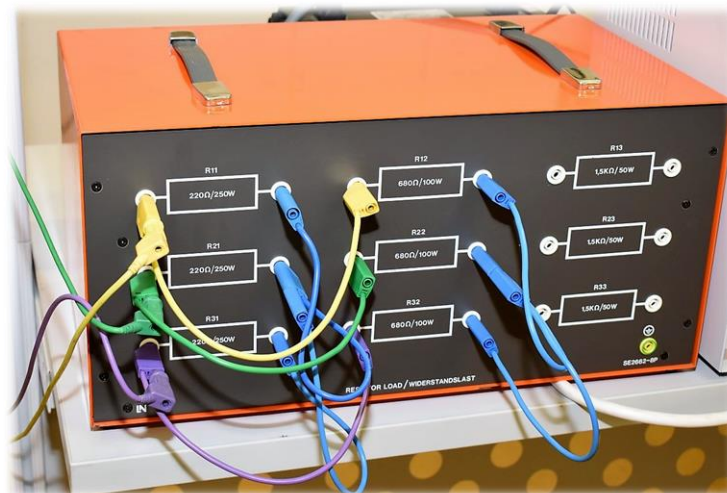


Bild 2.4: Last am Netzmodell

2.3.2 Szenario

Die in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Komponenten werden zu einer ausgewählten Netztopologie zusammengeschaltet. Diese Topologie wird als Szenario für den Einsatz eines STATCOM verwendet.

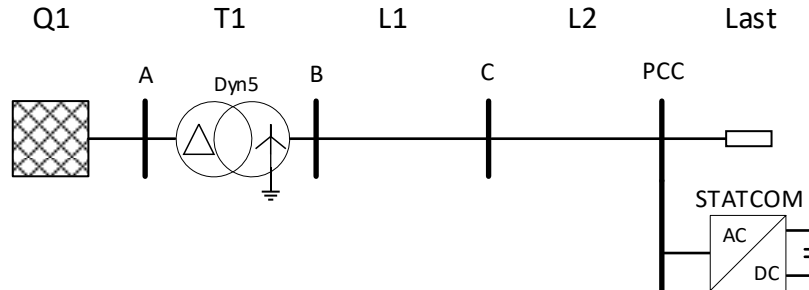


Abbildung 2.2: Gewählte Netztopologie für den Einsatz eines STATCOM

Das gewählte Szenario ist in Abbildung 2.2 gezeigt, in dieser Abbildung ist bereits der STATCOM an der Sammelschiene PCC eingezeichnet.

Tabelle 2.4: Beschreibung der Kurzbezeichnungen aus Abbildung 2.2

| Kurzbezeichnung | Komponente | Beschreibung |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|
| A, B, C, PCC | Sammelschiene | |
| Q1 | Stabilisierte Spannungsquelle | In Abschnitt 2.3.1.1 |
| T1 | Steckbarer Transformator | In Abschnitt 2.3.1.2 |
| L1 & L2 | Freileitungsmodul | In Abschnitt 2.3.1.3 |
| Last | Belastungswiderstand | In Abschnitt 2.3.1.4 |
| STATCOM | Statischer Kompensator | In Abschnitt 3 |

Die Aufgabe des STATCOM ist es, den Spannungsbereich am Netzanschlusspunkt PCC in dem vorgegebenen Toleranzbereich zu halten.

In Österreich ist das Übertragungsnetz, Spannungen mit ≥ 110 kV, in einem Toleranzbereich von 0.9 pu bis 1.118 pu der Nennbetriebsspannung zu halten, siehe [2].

3 Aufbau und Funktion eines STATCOMS

3.1 Spannungszwischenkreisumrichter

Der STATCOM wird als Spannungszwischenkreisumrichter mit abschaltbaren Halbleitern aufgebaut. Er besteht aus 3 Halbbrücken mit je zwei IGBT's. Jeder IGBT besitzt eine antiparallele Freilaufdiode. Werden die IGBT's vernachlässigt, entspricht die Struktur einer B6 Diodenbrücke. Der Spannungszwischenkreis ist mit zwei seriellen Kondensatoren aufgebaut.

Abbildung 3.1 zeigt den detaillierten Aufbau des Umrichters. Für die erste Phase und den Gleichspannungszwischenkreis sind die Strom- und Spannungsrichtungen darin eingezeichnet.

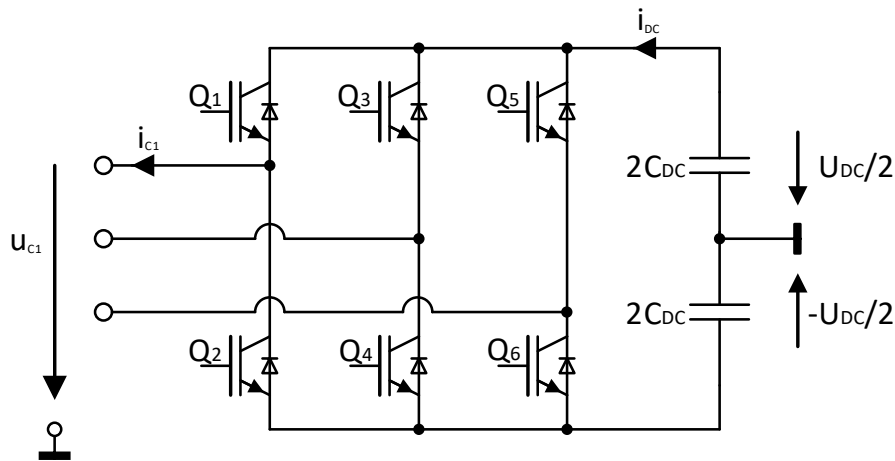


Abbildung 3.1: Detaildarstellung des Umrichters mit Zwischenkreiskondensator

Der Mittelpunkt des Spannungszwischenkreises in Abbildung 3.1 besitzt keine reale Verbindung, dieser wird für die Herleitung der mittleren Umrichterspannung $\overline{u_{c1}}$ benötigt. Die IGBT's Q_1 bis Q_6 werden so angesteuert, dass die gewünschte Spannung $\overline{u_{c1}}$ bzw. der benötigte Strom i_{c1} auftritt. Dabei ist stets darauf zu achten, dass die gegenüberliegenden IGBT's (Q_1 mit Q_2 , Q_3 mit Q_4 , Q_5 mit Q_6) niemals zur selben Zeit eingeschaltet werden, was den Zwischenkreiskondensator kurzschließen würde.

$$\overline{u_{c1}} = \frac{U_{DC}}{2} \cdot (2 \cdot d_1 - 1) \quad (3.1)$$

Die Formel (3.1) gibt die mittlere Umrichterspannung in Abhängigkeit des Tastverhältnisses an, dabei wird die Zwischenkreisspannung vereinfacht als konstant angenommen. Eine detaillierte Herleitung dieser Formel ist im Skriptum [3] ausgeführt.

Die Zwischenkreisspannung u_{DC} ist vom zu- bzw. abfließenden Strom i_{DC} in den Zwischenkreiskondensator C_{DC} , siehe Abbildung 3.1, abhängig. Die Dynamik des Spannungszwischenkreises ist durch den Zusammenhang (3.2) gegeben.

$$\frac{d}{dt} u_{DC}(t) = -\frac{1}{C_{DC}} \cdot i_{DC}(t) \quad (3.2)$$

Um eine Beschreibung der Zwischenkreisspannung zu erhalten, welche ebenfalls die Wechsellspannungsseite des Umrichters berücksichtigt, wird eine Betrachtung der Leistungsbilanz herangezogen. Die Leistung auf der DC Seite lässt sich durch (3.3) beschreiben.

$$p_{DC}(t) = u_{DC}(t) \cdot -i_{DC}(t) = u_{DC}(t) \cdot \left(C_{DC} \cdot \frac{d}{dt} u_{DC}(t) \right) \quad (3.3)$$

Werden die IGBT's als ideale Schalter betrachtet und auch sonst keine Verluste berücksichtigt, dann kann die Wirkleistung der Netzseite mit der Leistung der DC-Seite gleichgesetzt werden.

$$\begin{aligned} p_N(t) &= \begin{pmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -i_{C1}(t) \\ -i_{C2}(t) \\ -i_{C3}(t) \end{pmatrix} \stackrel{(4.4)}{=} -\frac{3}{2} (u_N^\alpha \cdot i_C^\alpha + u_N^\beta \cdot i_C^\beta) \\ &\stackrel{(4.5)}{=} -\frac{3}{2} (u_N^d \cdot i_C^d + u_N^q \cdot i_C^q) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Die mathematische Beschreibung der momentanen netzseitigen Leistung ist in (3.4) beschrieben. Die detaillierte Herleitung der Form für das Alpha-Beta-System und für das d-q-System sind in [4] zu finden.

$$p_N(t) = -\frac{3}{2} (u_N^d \cdot i_C^d + u_N^q \cdot i_C^q) = u_{DC}(t) \cdot \left(C_{DC} \cdot \frac{d}{dt} u_{DC}(t) \right) = p_{DC}(t) \quad (3.5)$$

Die dynamische Wirkleistung zwischen Netz und Zwischenkreis wird durch (3.5) beschrieben.

3.2 Raumzeigermodulation

Die Raumzeigermodulation (engl.: space vector modulation - SVPWM) ist ein häufig angewandtes Verfahren zur Erzeugung von Ausgangsspannungen bei dreiphasigen Stromrichtern. Die Grundlagen zur Herleitung dieses Verfahrens sind in der Literatur [5] zu finden.

$$\vec{u}_C^{\alpha\beta}(t) = u_C^\alpha + j \cdot u_C^\beta \quad (3.6)$$

Bei diesem Verfahren wird zur Erzeugung der Schaltsignale für die IGBTs aus Abbildung 3.1 die geforderte Umrichterspannung $\vec{u}_C^{\alpha\beta}$ herangezogen. Diese Referenzspannung wird als Raumzeiger bezeichnet und kommt aus einem vorgeschalteten Regelungssystem.

Eine detaillierte Darstellung dieses Regelungskonzeptes ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

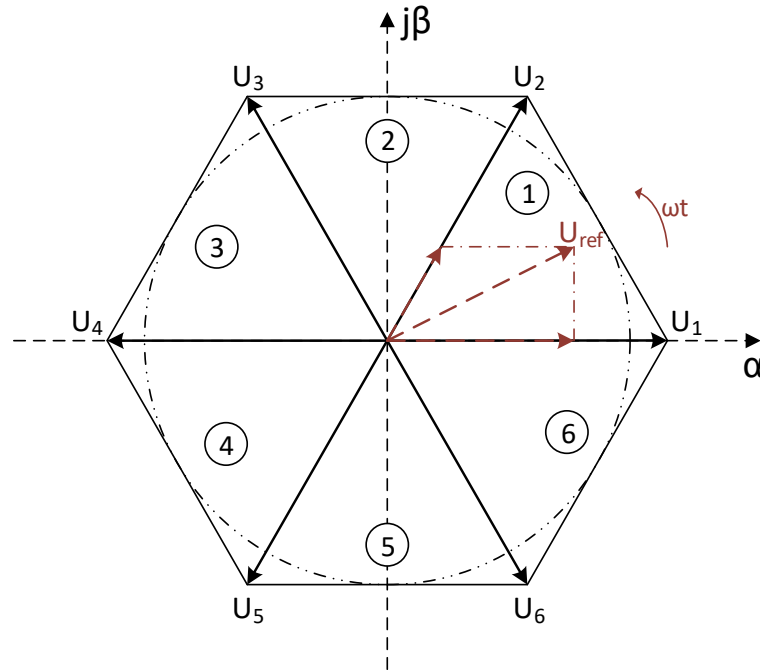


Abbildung 3.2: Schaltzustände der Raumzeigermodulation

Für die α - und β -Komponente gilt der Zusammenhang in Gleichung (3.6), dieser Spannungszeiger rotiert nun in einem komplexen Koordinatensystem mit der Winkelgeschwindigkeit ωt .

In das komplexe Koordinatensystem in Abbildung 3.2 ist ein Hexagon mit sechs möglichen Ausgabespannungszeigern eingezeichnet. Diese zeigen sechs der acht möglichen Ausgabespannungen an. Die Schaltzustände 0 und 7 befinden sich im Mittelpunkt des Koordinatensystems und haben beide eine Ausgabespannung von 0 V.

Das Hexagon ist in sechs Sektionen aufgeteilt, in welchen jeweils der Referenzspannungszeiger auf die zwei angrenzenden Ausgabespannungszeiger abgebildet wird. Um am Ausgang des Umrichters die geforderte Referenzspannung zu erhalten wird zwischen den zugehörigen Schaltzuständen so geschaltet, dass sich im Mittel der geforderte Spannungszeiger ergibt.

Tabelle 3.1: Schaltzustände und zugehörige Ausgangsspannungen der Raumzeigermodulation

| Ausgabe- spannungszeiger | Schaltzustände | | | Ausgabespannung | | |
|-----------------------------|----------------|-------|-------|-----------------|---------------|---------------|
| | Q_1 | Q_3 | Q_5 | U_{UV} in V | U_{VW} in V | U_{WU} in V |
| U_0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| U_1 | 1 | 0 | 0 | $+U_{dc}$ | 0 | $-U_{dc}$ |
| U_2 | 1 | 1 | 0 | 0 | $+U_{dc}$ | $-U_{dc}$ |
| U_3 | 0 | 1 | 0 | $-U_{dc}$ | $+U_{dc}$ | 0 |
| U_4 | 0 | 1 | 1 | $-U_{dc}$ | 0 | $+U_{dc}$ |
| U_5 | 0 | 0 | 1 | 0 | $-U_{dc}$ | $+U_{dc}$ |
| U_6 | 1 | 0 | 1 | $+U_{dc}$ | $-U_{dc}$ | 0 |
| U_7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

In Tabelle 3.1 sind die möglichen Schaltzustände mit den zugehörigen Ausgabespannungen eines in Abbildung 3.1 dargestellten Umrichters eingetragen. Es sind nur die Schaltzustände der oberen Schalter beschrieben, denn die unteren müssen immer gegengleich geschaltet werden, ansonsten würde ein Kurzschluss des Spannungszwischenkreises entstehen.

Der in Abbildung 3.2 strichpunktierte Kreis, welcher sich innerhalb des Hexagons befindet, markiert den maximalen Modulationsgrad von 1 pu des Referenzspannungszeigers. Die Gleichung (3.7) beschreibt den Modulationsgrad in Abhängigkeit des Betrages der Referenzspannung und der Zwischenkreisspannung.

$$m(t) = \frac{\sqrt{3} \cdot |u_c(t)|}{u_{DC}(t)} \quad (3.7)$$

Dabei entspricht der berechnete Modulationsgrad dem Betrag des Referenzspannungszeigers in Abbildung 3.2.

3.3 Netzfilter

Um sinusförmige Ströme in das Netz einspeisen zu können, muss ein Netzfilter zwischen den Netzeinspeisepunkt (PCC) und den Umrichter verwendet werden. Der benötigte Filter wird als RLC-Filterkreis aufgebaut, dargestellt in Abbildung 3.3. Die Filterkapazitäten C_{F1-3} befinden sich auf der Seite des PCC und sind im Sternpunkt zusammengeschlossen. Der Sternpunkt ist nicht geerdet. Zwischen PCC und Umrichter befindet sich die Filterimpedanz. Jede Filterimpedanz besteht aus einem Filterwiderstand R_{F1} und einer Filterinduktivität L_{F1} . Die Kopplungen zwischen den Impedanzen sind bei der Filterdrossel vernachlässigbar.

Die in Abschnitt 2.3.2 dargestellte Netztopologie wird von der stabilisierten Spannungsquelle bis zur Sammelschiene PCC bei der Modellbildung vereinfacht und als Spannungsquelle mit geerdeten Sternpunkt betrachtet.

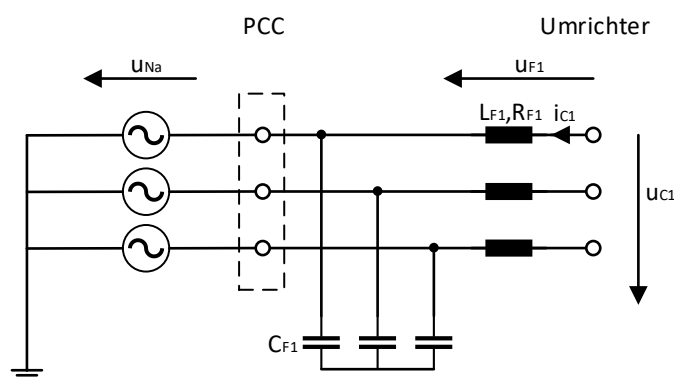


Abbildung 3.3: Vereinfachtes Netz mit Filterkreis zwischen STATCOM und PCC

In Abbildung 3.3 sind repräsentativ für alle drei Phasen die Ströme und Spannungen von Phase 1 eingezeichnet. Die Strangspannung u_{C1} vom Umrichter ergibt sich durch die Maschengleichung (3.8), dabei werden die Filterkapazitäten C_F vernachlässigt.

$$u_{C1}(t) - u_{Na}(t) - u_{F1}(t) = 0 \quad (3.8)$$

Die Spannung u_{F1} kann als (3.9) geschrieben werden:

$$u_{F1}(t) = i_{C1}(t) \cdot R_{F1} + L_{F1} \cdot \frac{di_{C1}(t)}{dt} \quad (3.9)$$

Durch einsetzen von (3.9) in (3.8) ergibt sich die Form:

$$u_{C1}(t) - u_{Na}(t) - i_{C1}(t) \cdot R_{F1} - L_{F1} \cdot \frac{di_{C1}(t)}{dt} = 0 \quad (3.10)$$

Durch Ermittlung von Gleichung (3.10) für einen Strang kann das gesamte Netzwerk, nach Umformung auf u_c durch (3.11) ausgedrückt werden.

$$\mathbf{u}_c(t) = \begin{pmatrix} u_{C1}(t) \\ u_{C2}(t) \\ u_{C3}(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} u_{Na}(t) + i_{C1}(t) \cdot R_{F1} + L_{F1} \cdot \frac{di_{C1}(t)}{dt} \\ u_{Nb}(t) + i_{C2}(t) \cdot R_{F2} + L_{F2} \cdot \frac{di_{C2}(t)}{dt} \\ u_{Nc}(t) + i_{C3}(t) \cdot R_{F3} + L_{F3} \cdot \frac{di_{C3}(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Das Netz in Abbildung 3.3 wird unter Zuhilfenahme der Modaltransformation in das Alpha-Beta und anschließend in das d-q-Koordinatensystem transformiert. Hierbei werden symmetrische Bedingungen angenommen, somit wird kein Nullsystem betrachtet.

$$\mathbf{u}_c^{\alpha\beta}(t) = \mathbf{T}_c^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_{C1}(t) \\ u_{C2}(t) \\ u_{C3}(t) \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

In (3.12) werden die Strangspannungen des Umrichters in das Alpha-Beta-System transformiert. Anschließend wird dieses System mit der inversen Drehmatrix (4.6) in das ruhende d-q-System transformiert.

$$\mathbf{u}_c^{dq}(t) = \begin{pmatrix} u_c^d(t) \\ u_c^q(t) \end{pmatrix} = \mathbf{T}_P(\varphi(t))^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_c^\alpha(t) \\ u_c^\beta(t) \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Durch die Transformation (3.13) mit konstanter Kreisfrequenz der Netzspannung ergibt sich mit der Eigenschaft (4.7) das Modell des netzseitigen elektrischen Netzwerks in Spannungsorientierung. Aufgrund der besseren Übersichtlichkeit wird auf die Angabe von zeitveränderlichen Größen mit (t) nun verzichtet.

$$\mathbf{u}_c^{dq} = \begin{pmatrix} u_N^d + i_c^d \cdot R_{F1} - \omega \cdot L_{F1} \cdot i_c^q + L_{F1} \cdot \frac{di_c^d}{dt} \\ u_N^q + i_c^q \cdot R_{F1} + \omega \cdot L_{F1} \cdot i_c^d + L_{F1} \cdot \frac{di_c^q}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_N^d - \omega \cdot L_{F1} \cdot i_c^q + u_F^d \\ u_N^q + \omega \cdot L_{F1} \cdot i_c^d + u_F^q \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Das Ersatzschaltbild des elektrischen Modells (3.14) ist in Abbildung 3.4 zu sehen.

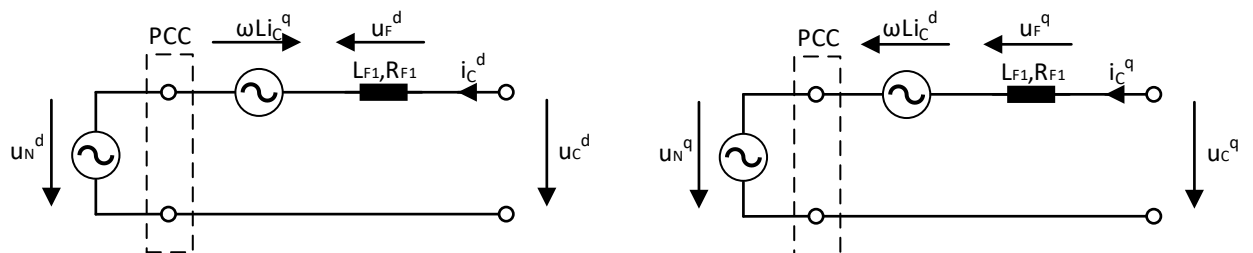


Abbildung 3.4: ESB des netzseitigen elektrischen Modelles. Links im d- und rechts im q-System

4 Regelung eines STATCOM

4.1 Modaltransformation

Eine detaillierte Herleitung der Clark- und Park-Transformation ist in der Literatur [6] zu finden.

4.1.1 Clark-Transformation

Die Clark-Transformation wird auch Alpha-Beta-Null Transformation genannt. Sie dient dazu, ein symmetrisches Dreiphasensystem in ein Zweiphasensystem zu transformieren. Wenn das Dreiphasensystem nicht symmetrisch ist, ergibt sich zusätzlich noch eine sogenannte Nullkomponente.

$$\begin{pmatrix} x^\alpha(t) \\ x^\beta(t) \\ x^0(t) \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} = \mathbf{T}_C^* \cdot \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

In Formel (4.1) ist die mathematische Transformation zu sehen. Die Größen x_a , x_b und x_c entsprechen dabei der Form (4.2):

$$x_i(t) = \hat{x}_i(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi_i(t)) \quad (4.2)$$

Die Indizes i in (4.2) stehen für die jeweiligen Signale a, b oder c. Der Winkel φ_i beinhaltet einen Phasenoffsetwinkel φ_{off} plus, je Indizes i , den statischen Winkel des Signalvektors. Der Winkel ist mit 0° für Signal a und $+120^\circ$ bzw. -120° für die Signale b und c definiert.

Die Inverse Clark Transformation wird mit der Transformationsmatrix in (4.3) beschrieben.

$$\mathbf{T}_C^{-1*} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Für symmetrische Bedingungen des zu transformierenden Signals wird die Transformationsmatrix (4.4) verwendet.

$$\mathbf{T}_C^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

4.1.2 Park-Transformation

Die Park Transformation wird auch d-q-Transformation genannt. Durch diese Transformation wird ein rotierendes Zweiphasensystem in ein stehendes Zweiphasensystem transformiert.

In (4.5) ist die mathematische Beschreibung der Transformation dargestellt, wobei hier die Transformationsmatrix als inverse Drehmatrix definiert wird:

$$\begin{pmatrix} x^d(t) \\ x^q(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi(t) & \sin \varphi(t) \\ -\sin \varphi(t) & \cos \varphi(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^\alpha(t) \\ x^\beta(t) \end{pmatrix} = \mathbf{T}_P(\varphi(t))^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x^\alpha(t) \\ x^\beta(t) \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Wird in (4.5) für den Transformationswinkel $\varphi(t)$ die Winkelgeschwindigkeit ωt verwendet, ergibt sich ein nun stehendes System.

Wenn das Alpha-Beta-System eine Nullkomponente besitzt, besitzt es im d-q-System dieselbe Nullkomponente. Hierbei ist keine Transformation notwendig, die Nullkomponente wird der d-q Matrix als letzter Eintrag hinzugefügt.

Die inverse Park-Transformation wird mit der Drehmatrix in (4.6) beschrieben:

$$\mathbf{T}_P(\varphi(t)) = \begin{bmatrix} \cos \varphi(t) & -\sin \varphi(t) \\ \sin \varphi(t) & \cos \varphi(t) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Für die Modellierung und Regelung werden bestimmte Eigenschaften der d-q-Transformation verwendet. Auf die Herleitung dieser Eigenschaften wird hier nicht näher eingegangen.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{T}_P(\varphi(t)) := \omega(t) \cdot \mathbf{T}_P(\varphi(t)) \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \omega(t) \cdot \mathbf{T}_P(\varphi(t)) \cdot \mathbf{J} \quad (4.7)$$

Die Eigenschaft in (4.7) wird für weitere Herleitungen benötigt.

4.2 Reglerauslegung

Die Regler für den STATCOM werden aufgrund der einfacheren Auslegung im spannungsorientierten d-q-Koordinatensystem berechnet. Die Ströme und Spannungen in diesem Koordinatensystem können für die Regler wie Gleichgrößen behandelt werden.

Die in Abschnitt 3.3 hergeleiteten Ersatzschaltbilder werden für die Reglerauslegung des STATCOM verwendet.

4.2.1 Übersicht Regelungskonzept

Die in Abschnitt 4.2.2 bis 4.2.4 beschriebenen Regler werden, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, in einem STATCOM eingesetzt. Diese Abbildung beinhaltet ebenfalls die in Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 beschriebenen Transformationen. In dieser Abbildung wurde auf die Darstellung der Stellgrößenbeschränkungen verzichtet, um eine übersichtlichere Abbildung zu erhalten.

Der graue Block ist eine Kompensation. In diesem Block befindet sich das mathematische Model der Störgrößenkompensation und der Kopplungsterme aus Gleichung (4.10).

Die roten Blöcke repräsentieren die verwendeten Regler, welche in weiterer Folge beschrieben werden. Der Block „Stromregler“ beinhaltet zwei separate Regler, einen für die d-Komponente und einen für die q-Komponenten. Diese zwei Regler sind jedoch ident, wie in weiterer Folge noch gezeigt wird.

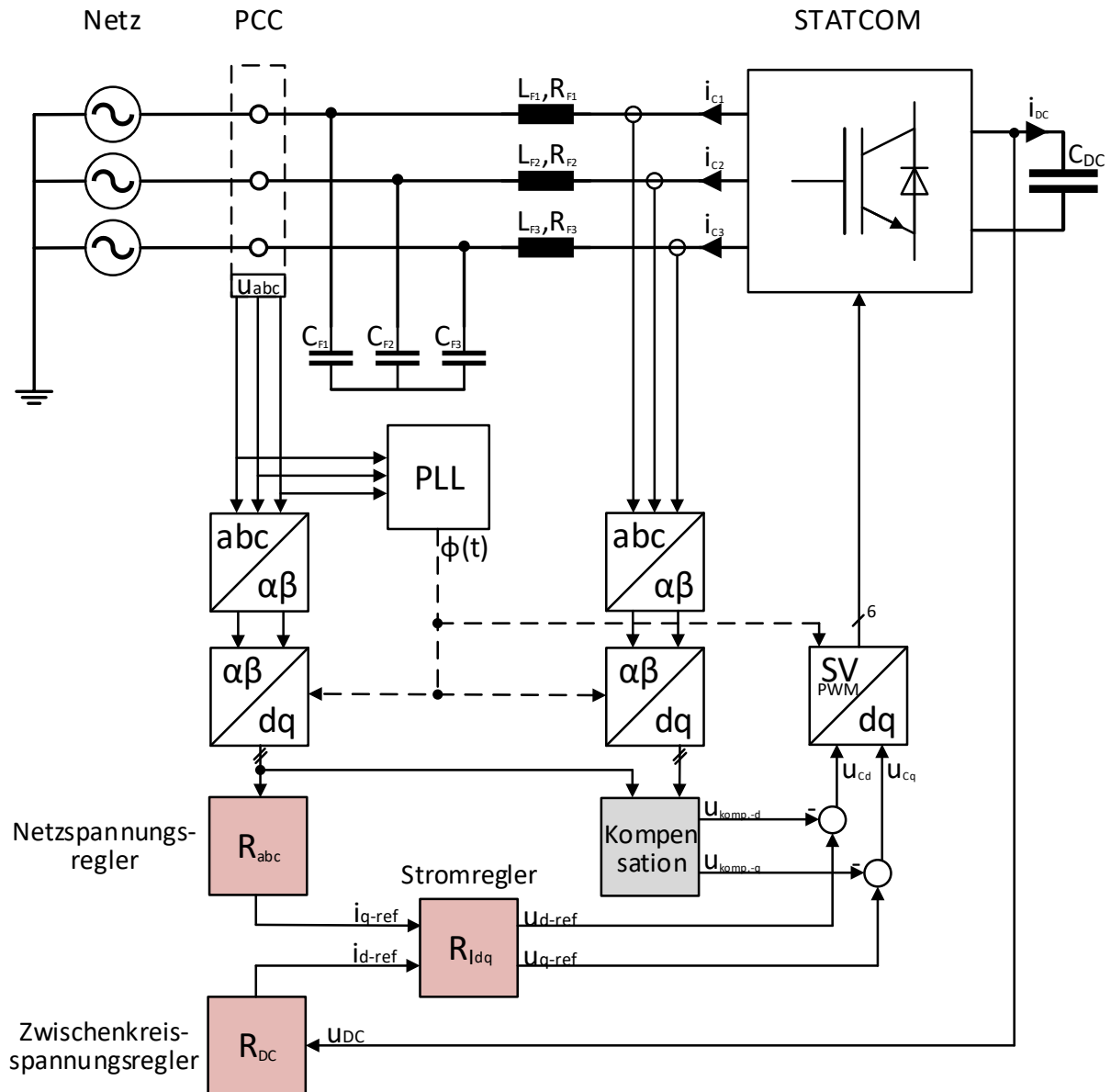


Abbildung 4.1: Regelungskonzept eines STATCOM

4.2.2 Stromregler

Für eine Stromreglerauslegung ist die Stromdynamik von Interesse. Diese wird für das netzseitige Netzwerk in Gleichung (3.14) im spannungsorientierten dq-System beschrieben. Für eine netzseitige Stromreglerauslegung wird diese Gleichung in den Laplacebereich, siehe [4], transformiert.

$$\mathcal{L}\{\mathbf{u}_c^{dq}(t)\} = \begin{pmatrix} u_c^d(s) \\ u_c^q(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_N^d(s) + i_c^d(s) \cdot R_{F1} - \omega \cdot L_{F1} \cdot i_c^q(s) + L_{F1} \cdot s \cdot i_c^d(s) \\ u_N^q(s) + i_c^q(s) \cdot R_{F1} + \omega \cdot L_{F1} \cdot i_c^d(s) + L_{F1} \cdot s \cdot i_c^q(s) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Die laplacetransformierte Gleichung (4.8) stellt noch immer ein gekoppeltes System dar. Um den Reglerentwurf möglichst einfach zu gestalten muss ein entkoppeltes Systemverhalten zwischen d- und q-Komponente vorliegen.

Für eine übersichtlichere Darstellung wird in weiterer Folge auf die Bezeichnung (s) für Laplacegrößen verzichtet.

Die Gleichung (4.8) wird in die Darstellung (4.9) umgeformt um die Störterme identifizieren zu können.

$$\begin{pmatrix} i_C^d \cdot (L_{F1} \cdot s + R_{F1}) \\ i_C^q \cdot (L_{F1} \cdot s + R_{F1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_C^d + \omega \cdot L_{F1} \cdot i_C^q - u_N^d \\ u_N^q - \omega \cdot L_{F1} \cdot i_C^d - u_C^q \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Die Gleichung (4.9) beinhaltet auf der rechten Seite Kopplungsterme und Störgrößen, diese werden in (4.10) zusammengefasst.

$$\mathbf{u}_{Komp.} = \begin{pmatrix} u_{Komp.}^d \\ u_{Komp.}^q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega \cdot L_{F1} \cdot i_C^q - u_N^d \\ -\omega \cdot L_{F1} \cdot i_C^d - u_N^q \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Aus den Gleichungen (4.9) und (4.10) können durch Umformung die Übertragungsfunktionen (4.11) erhalten werden.

$$\mathbf{G}_{ui_{dq}} = \begin{pmatrix} \frac{i_C^d}{u_C^d + u_{Komp.}^d} \\ \frac{i_C^q}{u_N^q + u_{Komp.}^q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_{F1} \cdot s + R_{F1}} \\ \frac{1}{L_{F1} \cdot s + R_{F1}} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Die Übertragungsfunktionen der d und q Komponente wären ohne die Kompensationsterme ident. Um für den Reglerentwurf ein einfaches und entkoppeltes System vorliegen zu haben werden die Kompensationsterme durch dynamische Störgrößenaufschaltung kompensiert. Somit muss in der Übertragungsfunktion keine Störgröße mehr berücksichtigt werden. Daraus resultiert die dynamische, jeweils für das d und q System gültige, Übertragungsfunktion (4.12), dabei wurde die Filterzeitkonstante T_{F1} der Übertragungsfunktion bereits herausgeformt.

$$G_{ui} = \frac{\frac{1}{R_{F1}}}{\left(1 + s \cdot \frac{L_{F1}}{R_{F1}}\right)} = \frac{\frac{1}{R_{F1}}}{(1 + s \cdot T_{F1})} \quad (4.12)$$

Für die Stromreglerauslegung muss auch eine Verzögerung der Spannungserzeugung berücksichtigt werden. Diese Verzögerung entsteht dadurch, dass der Umrichter die gewünschte Sollspannung nicht instantan erzeugt. Die geforderte Spannung kann immer nur im Mittel über eine Schaltperiode ausgegeben werden. Diese Umrichterdynamik, nach [5], kann durch die Übertragungsfunktion (4.13) beschrieben werden, T_{swi} ist dabei die Schaltperiode.

$$G_d = \frac{1}{(1 + s \cdot T_{swi})} \quad (4.13)$$

Mit zuvor angenommener idealer Störgrößenkompensation lässt sich die gesamte Übertragungsfunktion der Regelstrecke für die Stromreglerauslegung mit (4.14) angeben.

$$P_i = G_d \cdot G_{ui} = \frac{\frac{1}{R_{F1}}}{(1 + s \cdot T_{swi}) \cdot (1 + s \cdot T_{F1})} \quad (4.14)$$

Für diese Strecke soll nun ein passender PI-Regler der Form (4.15) eingesetzt werden.

$$R_i = V_i \frac{1+sT_i}{sT_i} = V_i + \frac{V_i}{sT_i} = K_{I_i} + K_{P_i} \frac{1}{s} \quad (4.15)$$

Die Zusammenschaltung der Regelstrecke und des PI-Reglers ergeben die in Abbildung 4.2 dargestellte Form, wobei für d und q Strom jeweils ein eigener, jedoch identer Stromregler verwendet wird.

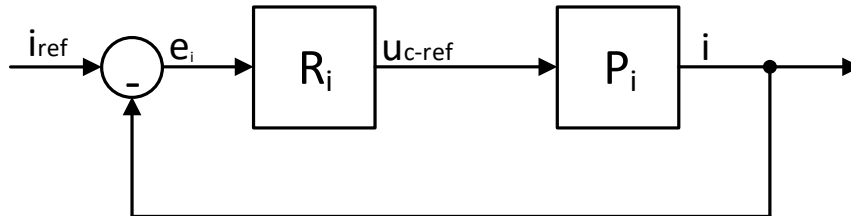


Abbildung 4.2: Stromregelung - Regler und Regelstrecke

Die geschlossene Regelstrecke wird durch die Gleichung (4.16) beschrieben, eine Herleitung für geschlossene Regelkreise ist in der Literatur [7] und [4] dargestellt.

$$RP_i = \frac{i}{i_{ref}} = \frac{R_i \cdot P_i}{1 + R_i \cdot P_i} = \frac{V_i \frac{1+sT_i}{sT_i} \cdot \frac{1}{R_{F1}}}{1 + V_i \frac{1+sT_i}{sT_i} \cdot \frac{1}{R_{F1}}} \approx \frac{1}{1+s \cdot 2 \cdot T_{swi}} \quad (4.16)$$

Die approximierte Angabe der Übertragungsfunktion (4.16) gilt nur dann, wenn die Filterzeitkonstante T_{F1} annähernd gleich der Regelzeitkonstante T_i ist!

Die Dimensionierung des Verstärkungsfaktors und der Regelzeitkonstante für den PI-Regler R_i erfolgt rechnerunterstützt mit dem Frequenzkennlinienverfahren aus [7], siehe Anhang 10.2.

4.2.3 Spannungszwischenkreisregler

Für die Auslegung des Spannungszwischenkreisreglers ist die Dynamik der Zwischenkreisspannung erforderlich, diese wird über die Leistungsbilanz zwischen Netz und Zwischenkreis in Gleichung (3.5) beschrieben.

Die Auslegung erfolgt wieder im Frequenzbereich, die Gleichung (3.5) wird dazu laplace-transformiert, siehe [4]. Für eine übersichtlichere Darstellung wird auf die Bezeichnung (s), für laplace-transformierte Größen verzichtet.

$$\mathcal{L}\{p_N(t)\} = -\frac{3}{2}(u_N^d \cdot i_C^d + u_N^q \cdot i_C^q) = u_{DC} \cdot (C_{DC} \cdot s \cdot u_{DC}) = \mathcal{L}\{p_{DC}(t)\} \quad (4.17)$$

Für die weitere Umformung der Gleichung (4.17) und die anschließende Reglerauslegung werden zur Vereinfachung der Auslegung zwei Annahmen getroffen. Erste Annahme ist, dass sich die Spannungsorientierung des d-q-Systems stets nach u_N^d orientiert. Dies bedeutet, dass u_N^q bei optimaler Spannungsorientierung immer 0 sein muss. Die zweite Annahme ist, dass die Netzspannung konstant ist. Diese Annahmen gelten nur in einem stationären Punkt des netzseitigen Netzwerkes, sie sind jedoch ausreichend genau für eine Reglerauslegung des Spannungszwischenkreises.

Mit den gegebenen Annahmen kann die Gleichung (4.17) zu der Übertragungsfunktion (4.18) umgeformt werden, es ist ersichtlich, dass sich die Übertragungsfunktion nur auf die d-Komponente des Stroms bezieht.

$$P_{DC} = \frac{u_{DC}^2}{i_C^d} = -\frac{3 \cdot U_N^d}{2 \cdot C_{DC} \cdot s} \quad (4.18)$$

Vor die geschlossene Regelstrecke für die d-Komponente (4.16) und der Strecke (4.18) wird nun ein weiterer PI-Regler der Form (4.19) geschaltet.

$$R_{DC} = V_{DC} \frac{1+s \cdot T_{DC}}{s \cdot T_{DC}} = V_{DC} + \frac{V_{DC}}{s \cdot T_{DC}} = K_{IDC} + K_{PDC} \frac{1}{s} \quad (4.19)$$

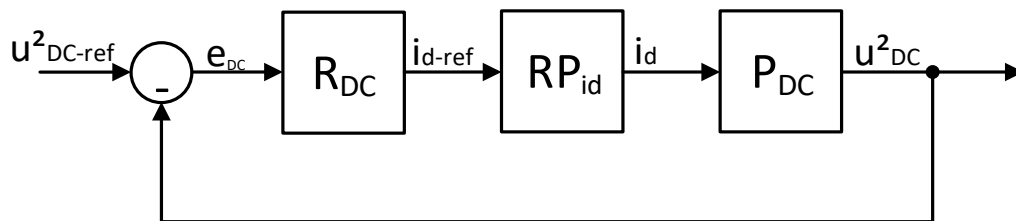


Abbildung 4.3: Spannungszwischenkreisregelung - Regler und Regelstrecke

Die Struktur der Spannungszwischenkreisregelung ist in Abbildung 4.3 dargestellt, die Referenz- und die Ausgangsgröße des geschlossenen Regelkreises sind die quadrierte Zwischenkreisspannung. Dadurch wird die Problematik einer nichtlinearen Regelstrecke auf ein einfaches lineares Problem reduziert, für diese Anwendung ist das zulässig.

Die Dimensionierung, des Verstärkungsfaktors und der Regelzeitkonstante, für den PI-Regler R_{dc} erfolgt rechnerunterstützt, siehe Anhang 10.2.

4.2.4 Netzspannungsregler

Wegen der schwachen Kopplung zwischen Blindleistungseinspeisung und Wirkleistungsfluss, jedoch starken Kopplung zwischen Knotenblindleistung und Knotenspannung, wird die Spannung am PCC durch Blindstromeinspeisung bzw. Blindstrombezug geregelt. Eine detaillierte Beschreibung der Beziehungen zwischen Knotenspannung und Blindleistungsbilanz ist in [8] beschrieben.

Für die Regelung der Knotenspannung wird bei einem als entkoppelt betrachteten System nur die q-Komponente des Stromes benötigt. Als Regelstrecke dient die Kurzschlussimpedanz zum betrachteten Netzknoten. Im Gegensatz zu dem hergeleiteten Ersatzschaltbild in Abschnitt 3.3 wird diese Impedanz nun zusätzlich vor dem Knoten PCC mitbetrachtet. Da die Kurzschlussimpedanz eines Netzes maßgeblich induktiv ist, wird für die Übertragungsfunktion (4.20) vereinfacht der Absolutwert der Leitungsimpedanzen angenommen.

$$P_{abc} = \frac{|\Delta u|}{i_q} = abs(2 \cdot Z_{Leitung}) \quad (4.20)$$

Da, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, die Spannungsorientierung sich auf den Netzeinspeisepunkt bezieht, bringt eine q-Komponente des Stromes eine

Spannungsdifferenz an diesen Punkt durch die zusätzliche Spannungsdifferenz an der Netzimpedanz.

$$R_{abc} = V_{abc} \frac{1+sT_{abc}}{sT_{abc}} = V_{abc} + \frac{V_{abc}}{sT_{abc}} = K_{I_{abc}} + K_{P_{abc}} \frac{1}{s} \quad (4.21)$$

Mit dem geschlossenen Regelkreis für den q-Strom (4.16), der Regelstrecke (4.20) und den PI-Regler (4.21) ergibt sich die gesamte Reglerstruktur in Abbildung 4.4, welche für die Auslegung von R_{abc} verwendet wird.

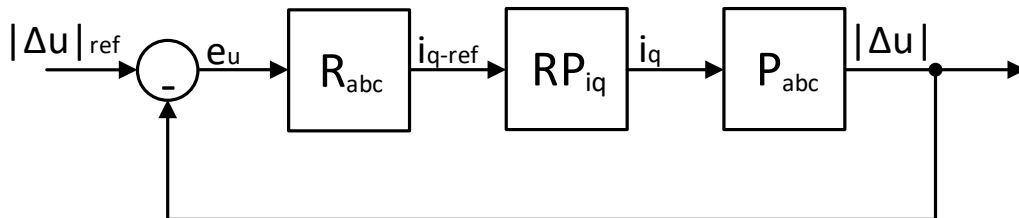


Abbildung 4.4: Netzspannungsregelung - Regler und Regelstrecke

Die Dimensionierung des Verstärkungsfaktors und der Regelzeitkonstante für den PI-Regler R_{abc} erfolgt rechnerunterstützt mit dem Frequenzkennlinienverfahren nach [7], Berechnung in Anhang 10.2.

4.2.5 Bilinear-Transformation und Anti-Wind-Up

Alle Regler in den Abschnitten 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4 wurden im Frequenzbereich hergeleitet und in weiterer Folge in diesem berechnet. Dies entspricht einem Entwurf im zeitkontinuierlichen Bereich. Für eine Implementierung in einem digitalen Rechensystem ist jedoch eine zeitdiskrete Form der Regler notwendig.

Für die Transformation in den zeitkontinuierlichen Bereich wird eine Bilinear-Transformation verwendet, welche einer Substitution von der Form (4.22) entspricht, dabei entspricht T_s dem verwendeten Abtastintervall des Rechensystems.

$$s = \frac{z-1}{T_s z+1} \quad (4.22)$$

Die Bilinear-Transformation (4.22) führt zu einer Standardform für zeitkontinuierlichen PI-Regler in Gleichung (4.23), diese Transformation wird in Anhang 10.2 rechnerunterstützt durchgeführt.

$$R(z) = \frac{b_1 \cdot z + b_0}{z-1} = b_1 + \frac{b_1 + b_0}{z-1} \quad (4.23)$$

Mithilfe der Gleichung (4.23) wird die Gleichung (4.24) nach [9] hergeleitet.

$$U(z) = K_{Pz} \cdot \left(E(z) + \frac{K_{Iz} \cdot E(z) - C_{AW} \cdot \Delta U(z)}{z-1} \right) \quad (4.24)$$

Die Differenz zwischen Regelgröße und Ausgangsgröße einer nachgeschalteten Begrenzung wird für das Anti-Windup verwendet, der mathematische Zusammenhang für $\Delta U(z)$ ist in Gleichung (4.25) beschrieben.

$$\Delta U(z) = U(z) - U_{max}(z) \quad (4.25)$$

$$K_{Iz} = \frac{b_1 + b_0}{b_1} \quad (4.26)$$

$$K_{Pz} = b_1 \quad (4.27)$$

$$C_{AW} = \frac{b_1 + b_0}{b_1^2} \quad (4.28)$$

Die Abbildung 4.5 zeigt den Signalfussplan der Gleichung (4.24), wobei die Koeffizienten K_{Iz} , K_{Pz} und die Anti-Windup-Verstärkung C_{AW} in (4.26), (4.27) und (4.28) beschrieben sind.

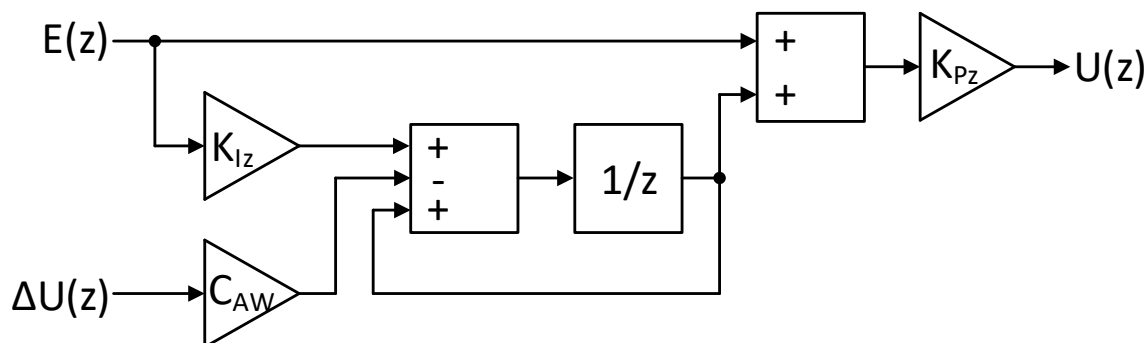


Abbildung 4.5: Signalfussplan zeitkontinuierlicher Regler mit Anti-Windup

4.2.6 Ermittlung der Reglerparameter

Unter Zuhilfenahme der oben angeführten Herleitungen wurde die Reglerauslegung rechnerunterstützt durchgeführt. Die Berechnung wurde im Programm MATLAB[®] durchgeführt, die verwendeten Berechnungen sind im Anhang 10.2 beigefügt.

Tabelle 4.1: Parameter der berechneten PI-Regler im Frequenzbereich

| PI-Regler | K_P | K_I |
|--------------------------|-----------|------------|
| Stromregler d-Komponente | 501.13 | 5262.80 |
| Stromregler q-Komponente | 501.13 | 5262.80 |
| Zwischenkreisregler | -4.21e-04 | -13.00e-04 |
| Netzspannungsregler | -7.09e-04 | -2.00 |

Die Ergebnisse der im Frequenzbereich dimensionierten Reglerparameter sind in Tabelle 4.1 zu sehen.

Tabelle 4.2: Parameter der verwendeten PI-Regler für zeitdiskrete Implementierung

| PI-Regler | K_{Pz} | K_{Iz} | C_{AW} |
|---------------------|-----------|----------|-----------|
| d-Stromregler | 501.16 | 1.09e-04 | 2.18e-07 |
| q-Stromregler | 501.16 | 1.09e-04 | 2.18e-07 |
| Zwischenkreisregler | -4.21e-04 | 3.16e-05 | -7.52e-02 |
| Netzspannungsregler | -7.19e-04 | 2.9e-02 | -40.296 |

Für eine Implementierung in die Rechenkarte werden die Reglerparameter aus Tabelle 4.1, wie in Abschnitt 4.2.5 beschrieben, in den zeitdiskreten Bereich transformiert. Die sich daraus ergebenden zeitdiskreten Reglerparameter sind in Tabelle 4.2 eingetragen.

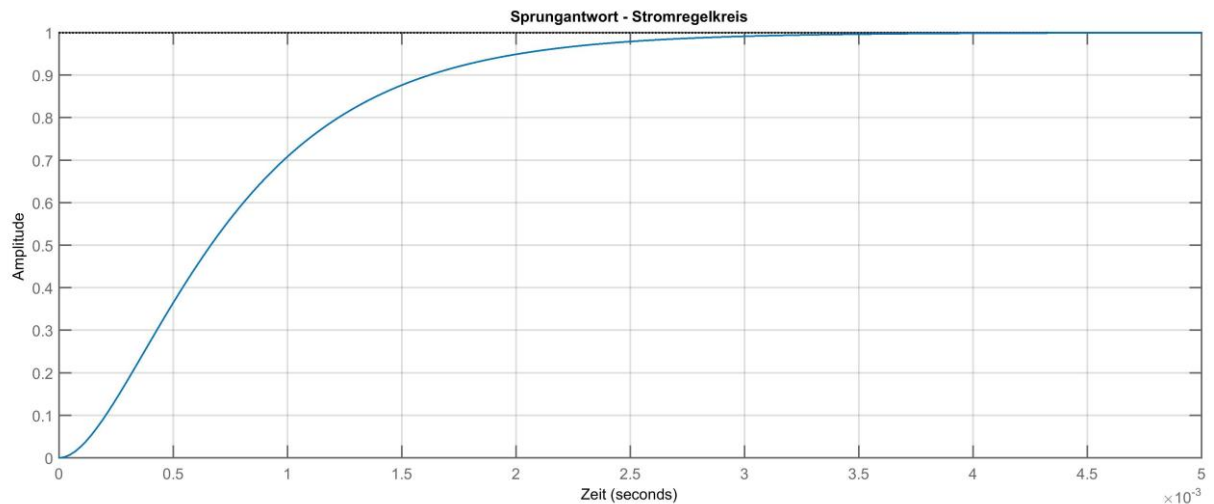


Bild 4.1: Sprungantwort des geschlossenen Stromregelkreises

Die mit dem Frequenzkennlinienverfahren dimensionierten Stromregler weisen eine Sprungantwort ohne Überschwingen auf. Der Verlauf der Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises ist im Bild 4.1 dargestellt.

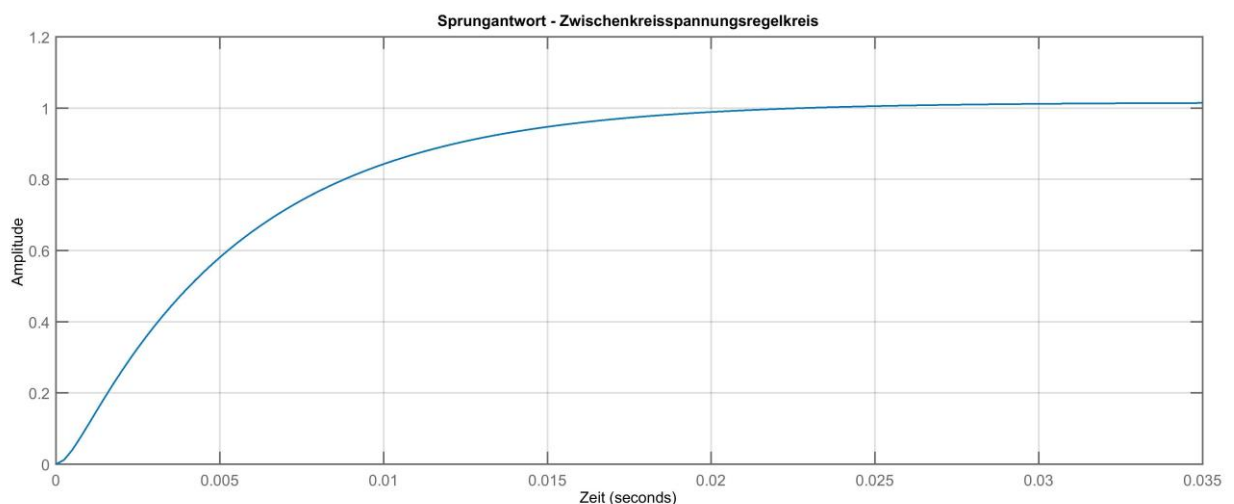


Bild 4.2: Sprungantwort des geschlossenen Zwischenkreisregelkreises

Die Sprungantwort des, über den geschlossenen Regelkreis der d-Stromkomponente kaskadierten Zwischenkreisspannungsreglers wurde so gewählt, dass sich der im Bild 4.2 dargestellte Verlauf ergibt.

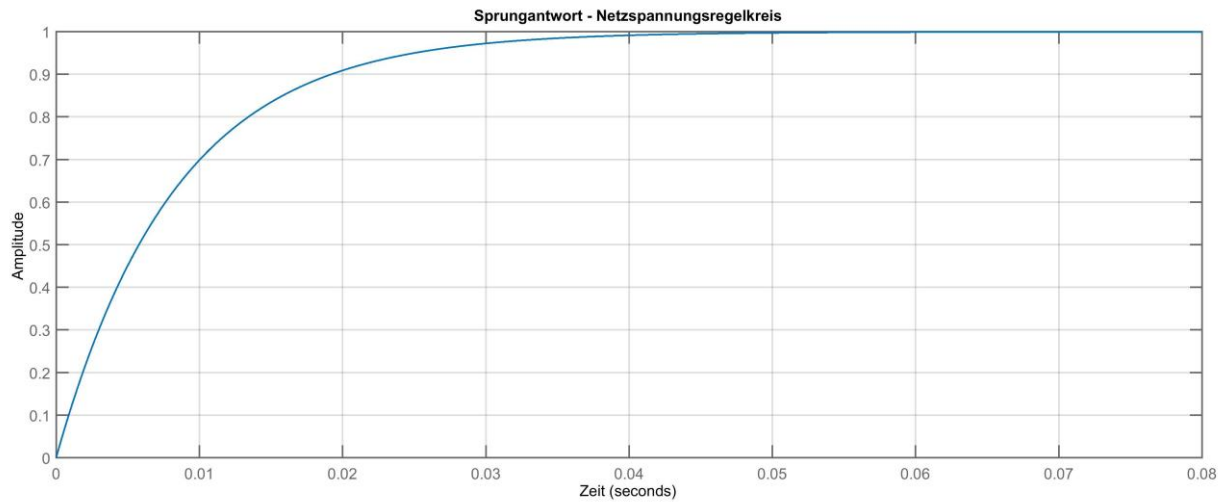


Bild 4.3: Sprungantwort des geschlossenen Netzspannungsregelkreises

Die Auslegung nach dem Frequenzkennlinienverfahren für den Netzspannungsregler führte zu dem in Bild 4.3 gezeigten Verlauf der Sprungantwort, des über den q-Stromregelkreis kaskadierten geschlossenen Netzspannungsregelkreises.

5 Simulation in MATLAB® / Simulink®

Zur Validierung der berechneten Regelparameter und der ausgewählten Komponenten wurde eine dynamische Simulation des gesamten STATCOMs durchgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Simulationsblöcke und deren Aufbau beschrieben.

5.1 Überblick Gesamtsystem

Das Simulationsmodell wurde so aufgebaut, dass es funktional dem beschriebenen Szenario in Abschnitt 2.3.2 entspricht.

Bild 5.1 zeigt das verwendete Modell für die dynamische Simulation des STATCOM. In diesem Modell wurden die selben Komponenten eingesetzt wie in Abbildung 2.2 dargestellt, dabei konnte das Netz Q1 und der Transformator T1 in einen Simulationsblock „Netz“ zusammengefasst werden.

Alle verwendeten Simulationsblöcke in Bild 5.1 sind aus der Standardbibliothek von Simulink® oder der Simscape Electrical™ Toolbox, ausgenommen davon ist der „Regelungssystem“ Block, dieser ist ein Subsystem mit mehreren Komponenten.

Die Messblöcke „PCC“ und „STATCOM“ beinhalten jeweils Strom und Spannungsmessungen aller drei Stränge. Vom Messblock „STATCOM“ werden die Strangströme und vom Messblock „PCC“ die Strangspannungen an das Regelungssystem übergeben. Es wird ebenfalls die Zwischenkreisspannung an das Regelungssystem übergeben. Vom Regelungssystem an das restliche Modell kommen die Schaltsignale der zwei Schalter und das 6-Pulsige PWM Signal an die IGBT's, siehe Bild 5.1, welche sich im „CIPOS-Modul“ befinden.

Alle in Tabelle 5.1 nicht angesprochenen Einstellungen wurden auf den MATLAB® / Simulink® Standardeinstellungen belassen.

Die detaillierte verwendete Parametrierung steht im Initialisierungsfile unter Anhang 10.1.

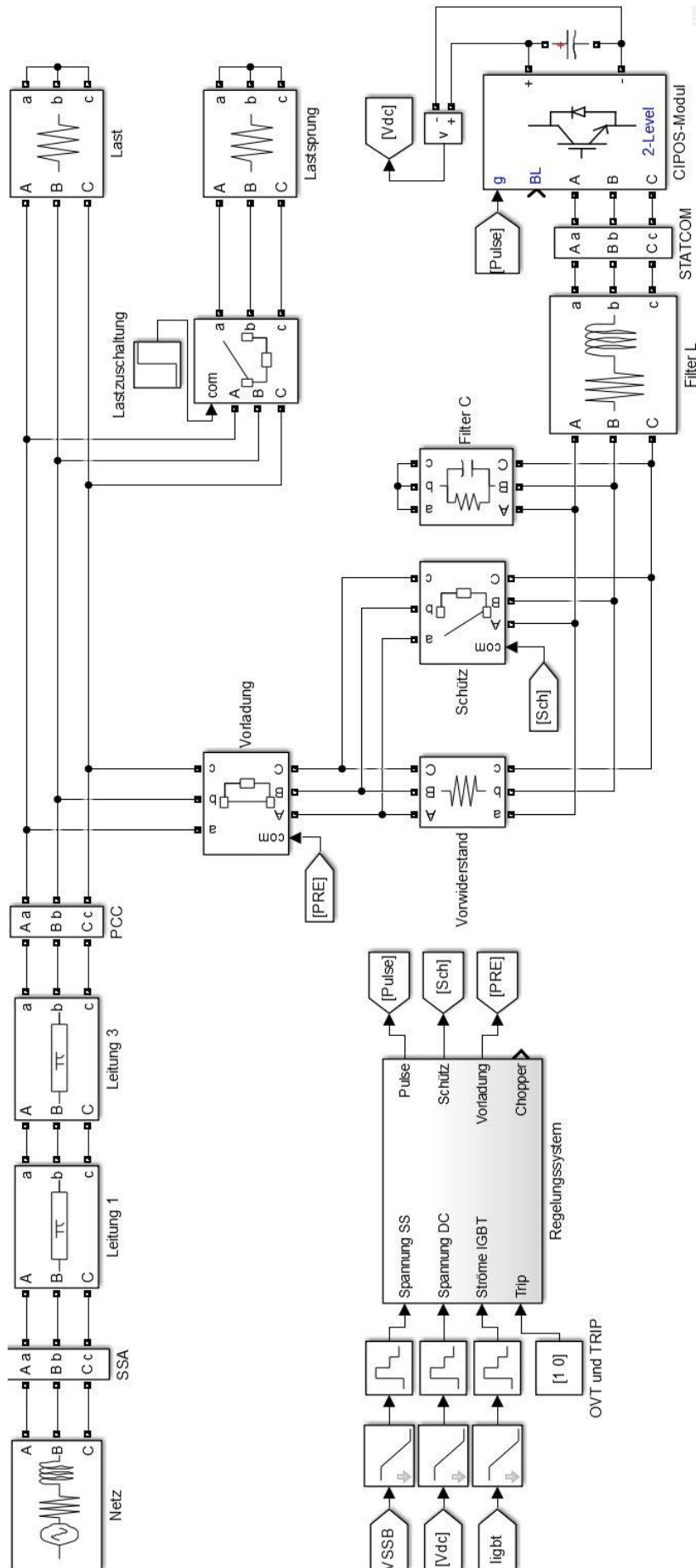


Bild 5.1: Gesamtdarstellung des Simulationsmodelles

Tabelle 5.1: Einstellungen der Simulationsblöcke

| Systemblock | Einstellwerte | Konfiguration |
|------------------------|---|--|
| Netz | U = 115 V f = 50 Hz R = 6.1 Ω | In Stern, die Innenimpedanz wurde rein ohmsch eingestellt. |
| Leitung 1 Leitung 2 | f = 50 Hz Es wurden die Werte aus Tabelle 2.2 verwendet. | PI-Ersatzschaltbild |
| Vorwiderstand | R = 220 Ω | 3 phasiger Widerstand |
| Filter C | C = 2,2 μF R = 680 kΩ | RC-parallel, 3 phasig |
| Filter L | L = 0.4085 mH R = 4.29 Ω | 3 phasige Drossel ohne Kopplung zwischen den Phasen. |
| Last | R = 220 Ω | 3 phasiger Widerstand |
| Lastsprung | R = 680 Ω | 3 phasiger Widerstand |

5.2 Vorladung

Die Vorladeschaltung in Bild 5.2 wurde so gewählt, dass sie in dem zu realisierenden Aufbau ident verwendet werden kann. Im ersten Moment schließt der Schalter „Vorladung“, was dazu führt, dass der Spannungszwischenkreiskondensator über die Freilaufdioden der IGBT's, siehe Abbildung 3.1, und über den Vorladewiderständen, an den Netzknoten PCC geschaltet wird. Die Freilaufdioden wirken dabei wie eine B6-Diodenbrücke. Der Schalter „Schütz“ schließt die Vorladewiderstände kurz sobald die Zwischenkreisspannung einen definierten Wert erreicht hat, welcher zulässige Stoßladeströme für den Zwischenkreiskondensator und die Freilaufdioden ergibt.

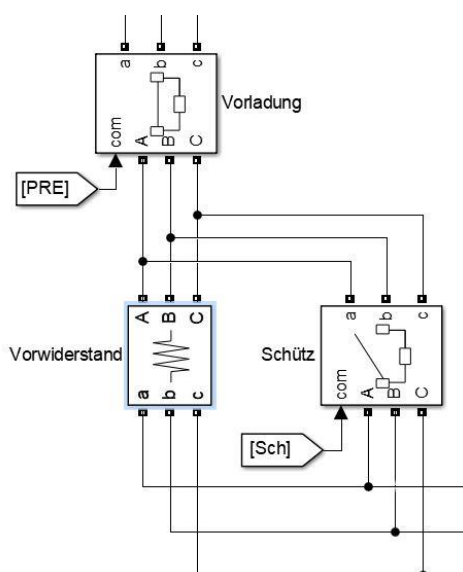


Bild 5.2: Vorladeschaltung für den Spannungszwischenkreis

5.3 Regelungssystem

Das Regelungssystem ist dafür zuständig, dass die sechs IGBT's so angesteuert werden, dass einerseits die Zwischenkreisspannung konstant gehalten wird und andererseits die Spannung am Netzknoten PCC auf einen vorgegebenen Wert gehalten wird. Dafür wurde das Regelungssystem in Bild 5.3 entworfen.

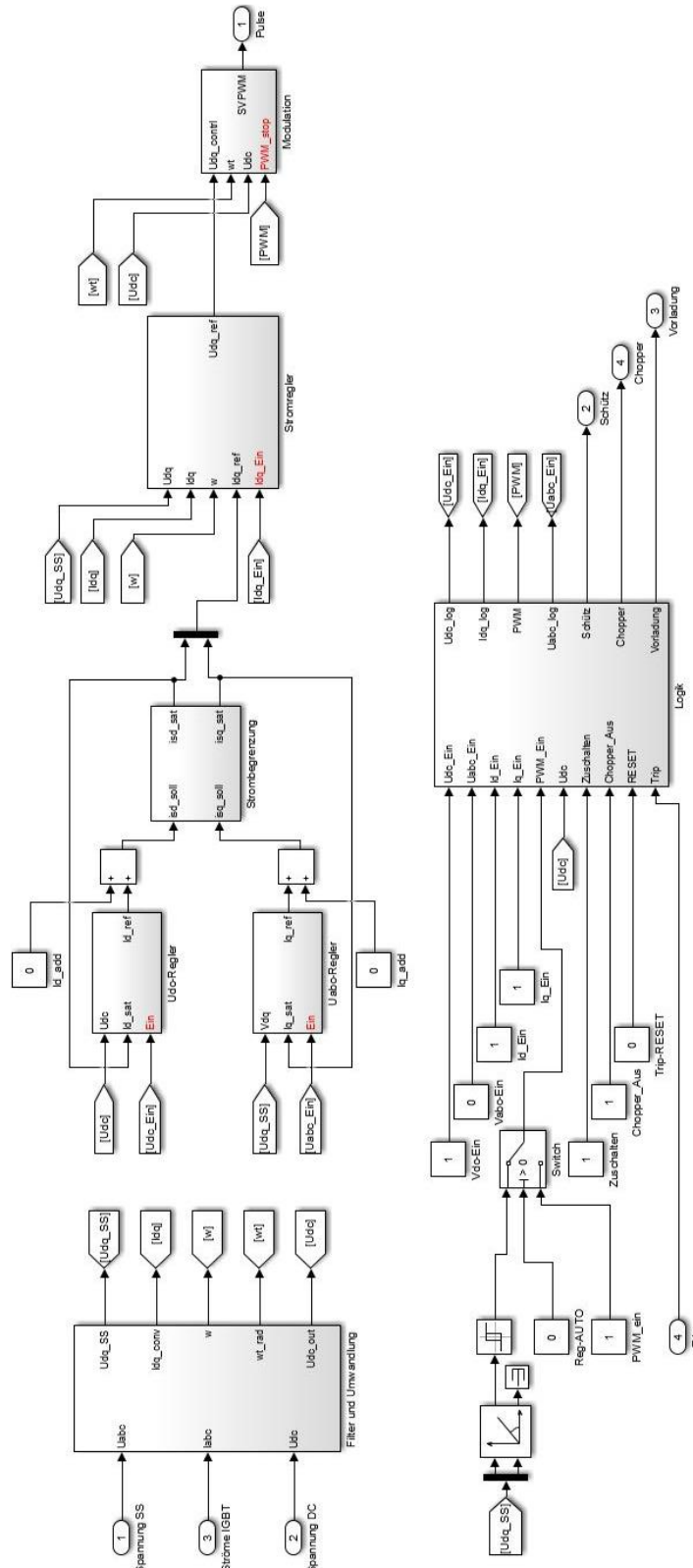


Bild 5.3: Regelungssystem des STATCOM

Die obere Hälfte im Bild 5.3 beinhaltet das eigentliche Regelungssystem, welches zu den geforderten Ausgangsspannungen bzw. Ausgangsströmen des STATCOM führt. Die untere Hälfte im Bild 5.3 zeigt die Steuerung der einzelnen Regler, welche ein- und ausgeschaltet werden können, sowie diverse Kontroll- und Sicherheitseingänge in den Block „Logik“.

Die entworfenen Blöcke für das Regelungssystem werden im Detail in den nächsten Abschnitten näher erläutert.

5.3.1 Filter und Transformation

Der Block „Filter und Umwandlung“ beinhaltet für die in dieser Arbeit benötigte Anwendung keine Filterblöcke. Bei Anti-Aliasing-Erscheinungen oder störenden Oberschwingungen der drei Eingangssignale kann ein Filter bei den „Gain“-Blöcken hinzugefügt werden.

Wie in Bild 5.4 bei Block „Gain-labc“ zu sehen, wird der Strom mit den Faktor -1 multipliziert. Das ist notwendig, da der Messblock „STATCOM“, zu sehen in Bild 5.1, die Strangströme in umgekehrter Richtung zu den hergeleiteten Beziehungen in (3.11), misst.

Die Transformationen von den gemessenen zeitveränderlichen Stranggrößen erfolgen nach den mathematischen Beschreibungen in Abschnitt 4.1, wobei hierzu vorgefertigte Blöcke von Simulink® verwendet wurden.

Für die korrekte Transformation in das dq-System wird ein Phasenregelkreis (engl.: Phase Locked Loop - PLL) benötigt, welcher auf die benötigte Spannungsorientierung regelt. Zu diesem Zweck wurde der vorgefertigte dreiphasige PLL-Block mit den Standardeinstellungen von Simulink® verwendet.

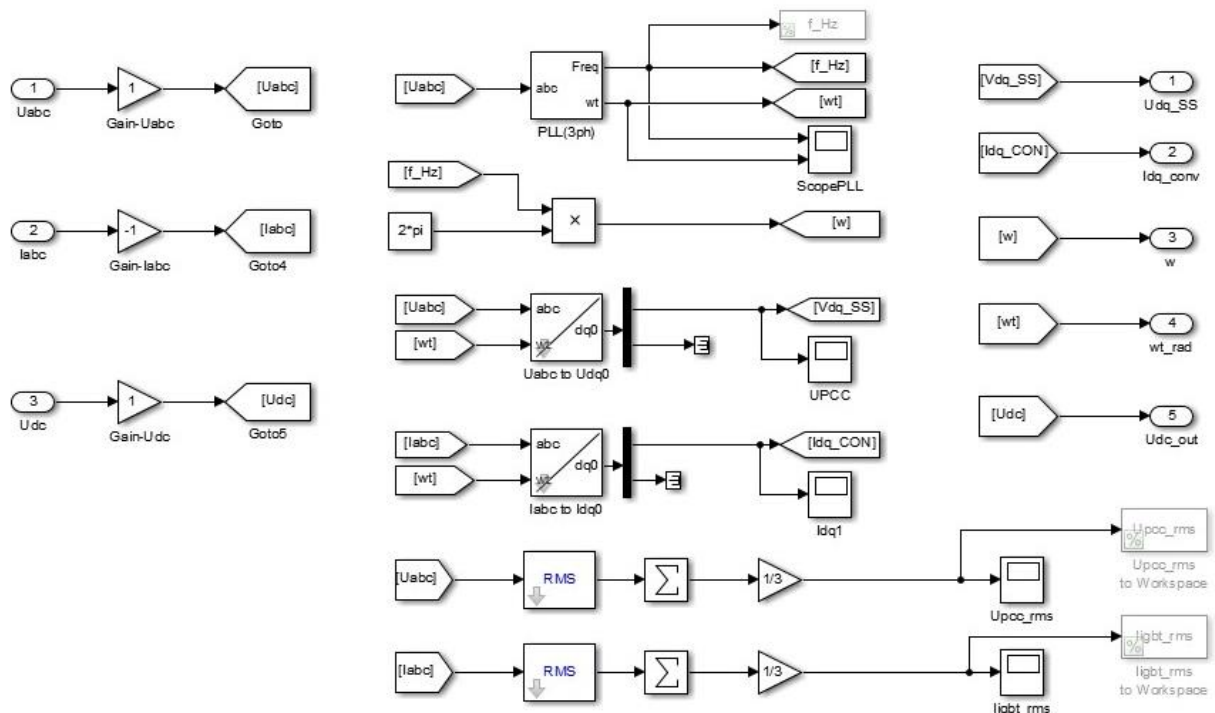


Bild 5.4: Block Filter und Umwandlung

Aus dem Block werden die dq-transformierten Strom- und Spannungsgrößen, die Winkellage ωt , die Winkelgeschwindigkeit ω und die Zwischenkreisspannung ausgegeben.

5.3.2 Stromregler

Die Stromregelung in Bild 5.5 besteht aus zwei PI-Reglern, einen für den d- und einen für den q-Strom, eine Kompensation und einer Spannungsbegrenzung. Als Ausgangsgröße erhält man die Referenzspannung, aus welcher die sechs Schaltsignale generiert werden.

Die zwei PI-Regler haben ebenfalls eine Struktur wie in Abbildung 4.2 und sind gleich aufgebaut wie in Abschnitt 4.2.5 beschrieben. Die Herleitung der Stromregler ist in Abschnitt 4.2.2 beschrieben und deren Dimensionierung in Anhang 10.2.

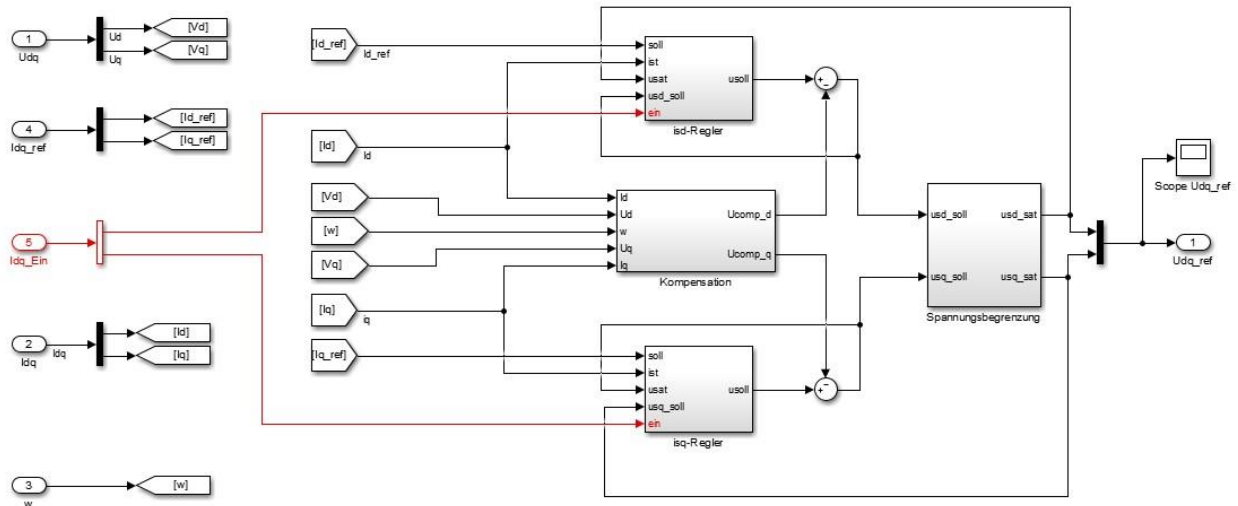


Bild 5.5: Stromregelung - Übersicht

Der Aufbau der verwendeten Spannungsbegrenzung ist in Abschnitt 5.3.4 beschrieben.

Der Block „Kompensation“ beinhaltet die Kompensation der Störgrößen und der Kopplungsterme, siehe Bild 5.6.

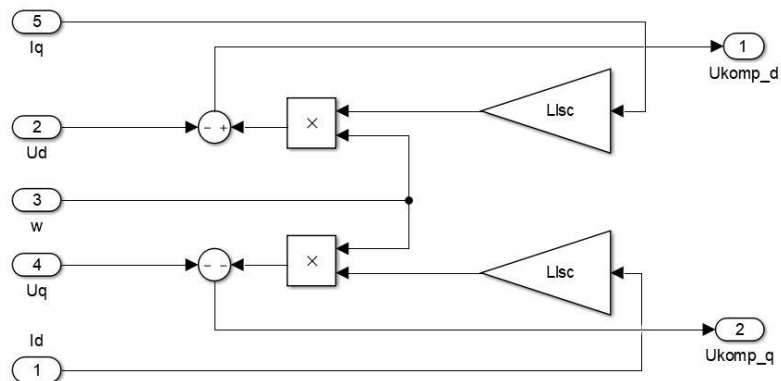


Bild 5.6: Kompensation der Störgrößen und Kopplungsterme

Die Beschreibung der zu kompensierenden Größen ist in Abschnitt 4.2.2 mathematisch hergeleitet, die Implementierung der daraus resultierenden Gleichung (4.10) ist in Bild 5.6 zu sehen.

5.3.3 Netzspannungsregler

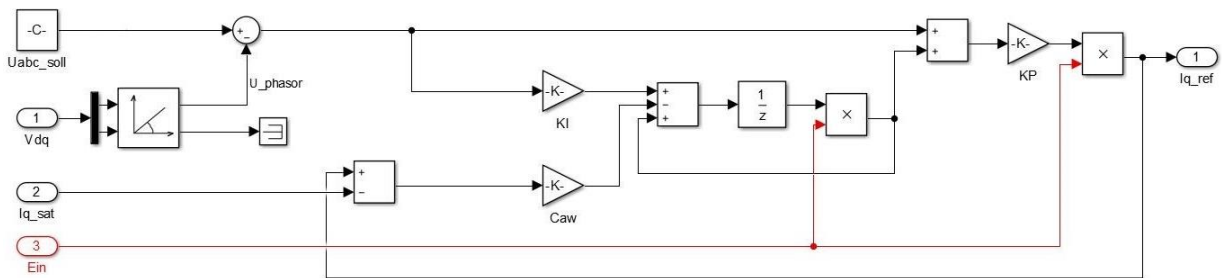


Bild 5.7: Struktur PI-Regler mit Anti-Windup

Die PI-Regler entsprechen der hergeleiteten Struktur für zeitdiskrete PI-Regler mit Anti-Windup nach Hanus [9], aus Abschnitt 4.2.5. Das rote Signal „Ein“ hat dem Wert 1 oder 0 und dient dazu, den Regler ein- und auszuschalten bzw. wieder rückzusetzen.

Der Netzspannungsregler unterscheidet sich zu der in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Reglerauslegung dadurch, dass hier der Betrag der Netzspannung als Referenz genommen wird, als Ist-Größe dient der Betrag des dq-Spannungsvektors. Dies ist zulässig, da für die Herleitung der Regelparameter das System als entkoppelt betrachtet werden kann und somit nur die q-Komponente berücksichtigt werden muss. Die drei weiteren Regler haben als Soll- und Referenzgröße die in Abschnitt 4.2.2 und 4.2.3 verwendeten Größen.

5.3.4 Strom- und Spannungsbegrenzung

Um keine unzulässigen Ströme oder Spannungen im Regelungssystem für den STATCOM zu erhalten ist es essentiell eine Strom- und Spannungsbegrenzung zu verwenden.

Bei der dynamischen Strombegrenzung in Bild 5.8 ist der gewählte Maximalstrom nur bis zu 50% für die d-Komponente gültig, hingegen kann die q-Komponente bis zu 100% des gewählten Maximalstroms ausnutzen. Da die Regelung der d-Komponente für die Spannung im Zwischenkreis maßgeblich ist, kann diese immer 50% des gewählten Maximalstromes ausnutzen. Der restliche Betrag auf den gewählten Maximalwert wird als Beschränkung auf die q-Komponente angewendet. Der mathematische Zusammenhang ist in den Gleichungen (5.1) und (5.2) gegeben.

$$\pm I_{d-max} = I_{max} \cdot 0,5 \quad (5.1)$$

$$\pm I_{q-max} = \sqrt{I_{max}^2 - i_d^2} \quad (5.2)$$

Der Aufbau der dynamischen Beschränkung lässt sich wegen der Beziehung zwischen d- und q-Komponenten so wählen. Diese stehen, vektorieil betrachtet, stets normal aufeinander, siehe Gleichung (3.6).

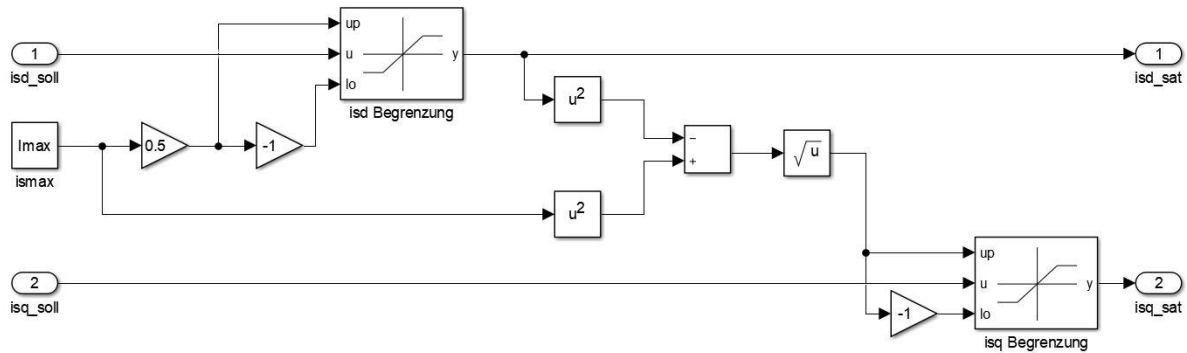


Bild 5.8: Strombegrenzung des Regulationssystems

Die Realisierung der dynamischen Strom- und Spannungsbegrenzung unterscheidet sich lediglich darin, dass die Spannung zu gleichen Teilen zwischen d- und q-Komponente begrenzt wird. Dies entspricht einen Faktor 1 anstelle von 0,5 in der Gleichung (5.1).

5.4 Generierung der Schaltsignale

Aus der Referenzspannung des „Stromregler“ Blocks in Abschnitt 5.3.2 werden im „Modulation“ Block sechs Signale generiert. Jedes dieser Signale dient zur Ansteuerung eines der sechs IGBT's im STATCOM, siehe Abbildung 3.1. Die Signalwerte sind 1 für einen geschlossenen IGBT und 0 für einen offenen IGBT. Das rote „PWM_stop“ Signal dient zur Deaktivierung der Schaltsignale an die IGBTs.

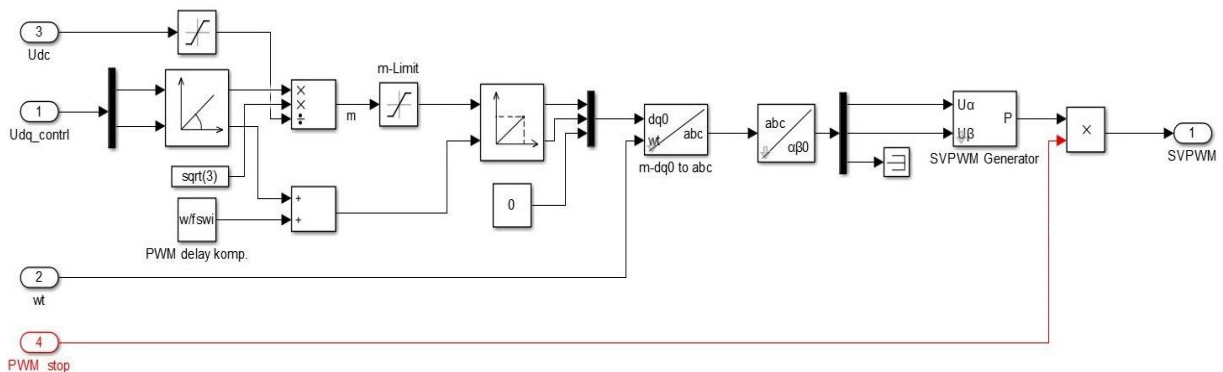


Bild 5.9: Aufbau des Blocks - Modulation

Die dq-Komponenten der Referenzspannung werden in einen Phasor und dem dazugehörigen Winkel zerlegt um eine Normierung und eine Winkelkorrektur durchführen zu können. Da die Generierung des Ausgangssignales, beschrieben in Abschnitt 4.2.2, einer Verzögerung des Schaltintervalls unterliegt, wird für eine Winkelkorrektur der dementsprechende Winkel addiert. Die Normierung des Phasors wird durchgeführt um den Spannungszwischenkreis abhängig von dem Modulationsgrad anzupassen.

Die im Abschnitt 3.2 beschriebene Raumzeigermodulation (engl.: Space Vector Modulation – SVPWM) befindet sich im Block „SVPWM Generator“. Dieser Block ist in der Simulink®

Toolbox von Simscape Electrical™ enthalten, die Einstellungen und Parametrierung dieses Blocks sind in Tabelle 5.2 angegeben.

Tabelle 5.2: Einstellungen im Modulationsblock

| Systemblock | Einstellwerte | Konfiguration |
|-------------|---------------------------------------|-----------------|
| SVPWM | $f = f_{swi}$ (siehe Anhang 10.1) | Schaltmuster #1 |
| m-Limit | Oberes Limit = 1 Unteres Limit = 0 | |

5.5 Steuerungslogik des STATCOM

Der „Logik“ Block dient dazu, dass die einzelnen Regler und Schalter zum richtigen Zeitpunkt und unter den richtigen Voraussetzungen aktiviert bzw. geschaltet werden. Des Weiteren ist eine Flankenerkennung implementiert, die bei einer Fehlermeldung von „OVT“ oder „Trip“, sowie bei Auslösung eines der beiden Schmitt-Triggers, die Ausgänge sperrt und diese erst nach einem zurücksetzen durch „Reset“ wieder freigibt.

Die Parametrierung der Trigger für „Level Schütz“ und „Level Chopper“ ist in Anhang 10.1 angegeben.

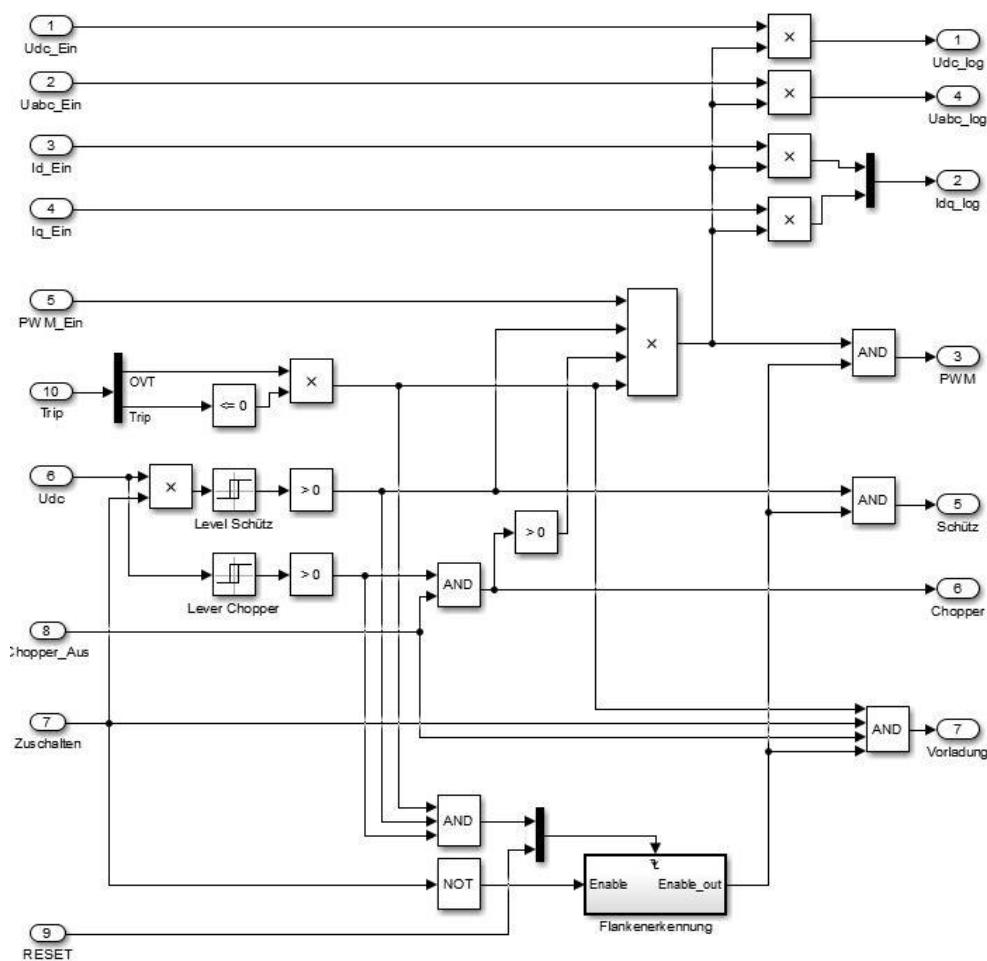


Bild 5.10: Aufbau des Logik Blocks

5.6 Simulationsergebnisse in MATLAB® / Simulink®

Der quadratische Mittelwert der drei Strangspannungen des Netzknotens PCC wurde mitgemessen und wiederum über alle drei Strangspannungen gemittelt, die Messung ist im Bild 5.4 implementiert. Im Bild 5.11 sind die Verläufe der gemittelten Knotenspannung bei einem Lastsprung am Netzknoten PCC mit und ohne STATCOM aufgetragen.

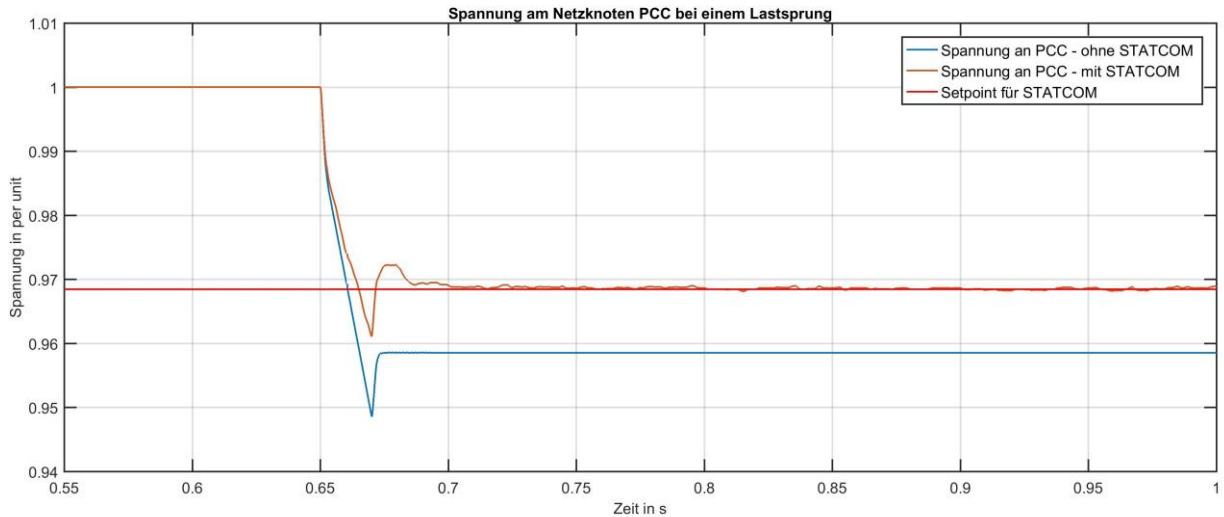


Bild 5.11: Verlauf der gemittelten RMS-Spannung am Netzknoten PCC – mit und ohne STATCOM

Für eine bessere Interpretation der Ergebnisse wurden die Verläufe der Spannungen auf das per unit System normiert, eine per unit Systembeschreibung ist in [6] gegeben.

6 Entwicklung der Hardware

Nachdem die Simulation in Abschnitt 5 durchgeführt wurde und die Ergebnisse zu einem gewünschten Resultat führen wird die detaillierte Auslegung der Komponenten für eine Realisierung am analogen Netzmodell betrachtet und realisiert.

Der Entwurf der folgenden Platinen wurde mit dem Programm EAGLE (Autodesk Inc.) durchgeführt.

6.1 Struktur

Das gesamte STATCOM-Modul wird über einen PC mit installiertem dSpace System, siehe Abschnitt 6.2, gesteuert und geregelt. Dabei wird das entworfene Regelungssystem von Abschnitt 5.3 auf eine dSpace-Karte geladen und über ein dSpace Programm angesteuert.

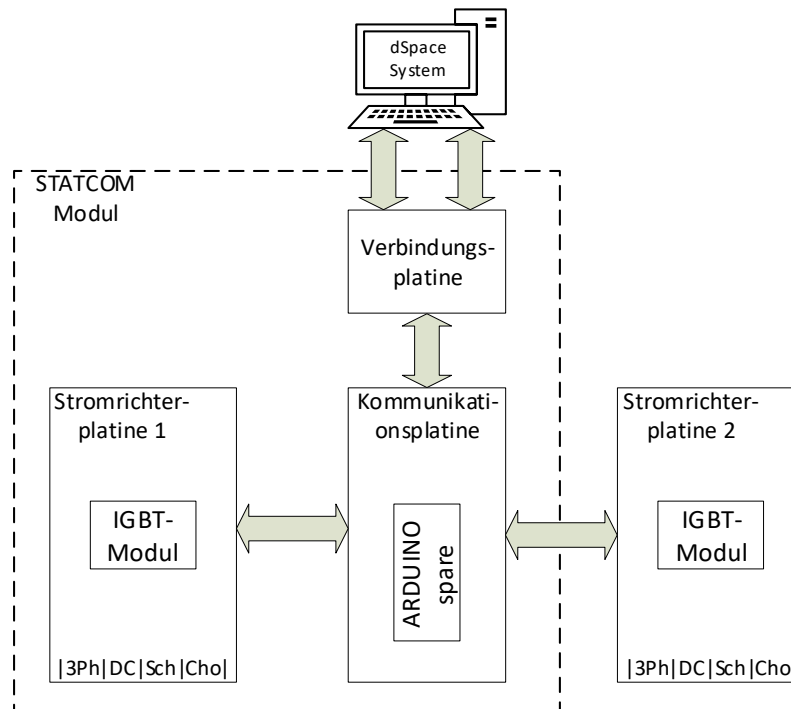


Abbildung 6.1: Konzept zur Realisierung eines STATCOM in einem analogen Netzmodell

Abbildung 6.1 zeigt das gesamte Konzept des Moduls, wobei für diese Arbeit nur der „STATCOM Modul“ Teil realisiert wird. Die „Stromrichterplatine 2“ und der abgebildete ARDUINO auf der Kommunikationsplatine werden nicht benötigt, diese sind jedoch im Konzept angeführt, da die Platinen für solch eine Erweiterung ausgelegt sind.

Tabelle 6.1: Rahmenbedingung für die Realisierung eines STATCOM-Moduls

| Bemessungswerte | Vorgabe |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Nennspannung U_{ph-ph} (Toleranz) | 220 Vrms ($\pm 15\%$) |
| Strangströme \hat{I}_C | 1,5 A |
| Steuerkreis zu Leistungskreis | Galvanisch getrennt |
| Messungen | Galvanisch getrennt |
| Zwischenkreisspannung max. | 450 V |

Die Rahmenbedingungen in Tabelle 6.1 müssen, zusätzlich zu den benötigten Bauteilwerten aus der Simulation, bei der Realisierung mitbetrachtet werden.

6.2 dSpace Hard- und Software

Für die Regelung und Steuerung des STATCOM wird eine Reglerkarte der Firma dSPACE, vom Typ DS1104, eingesetzt. Eine detaillierte Auflistung des Funktionsumfangs der Reglerkarte kann aus dem Dokument [10] entnommen werden. Die ADCs auf der Karte können Signale von 0-10 V einlesen, welche in die Software im Wertebereich 0-1 normiert eingehen.

Das Regelungssystem aus Abschnitt 5.3 muss in ein weiteres Simulink® Modell kopiert werden, in welchem die Ein- und Ausgänge der Karte berücksichtigt werden. Aus diesem Simulink® Model wird mit dem Simulink® Coder™ ein C-Code generiert, welcher zur Ausführung auf den internen Speicher der dSpace-Karte geladen wird. Die Implementierung des „Regelungssystem“ Blocks in ein konvertierbares Model ist in Bild 6.1 zu sehen.

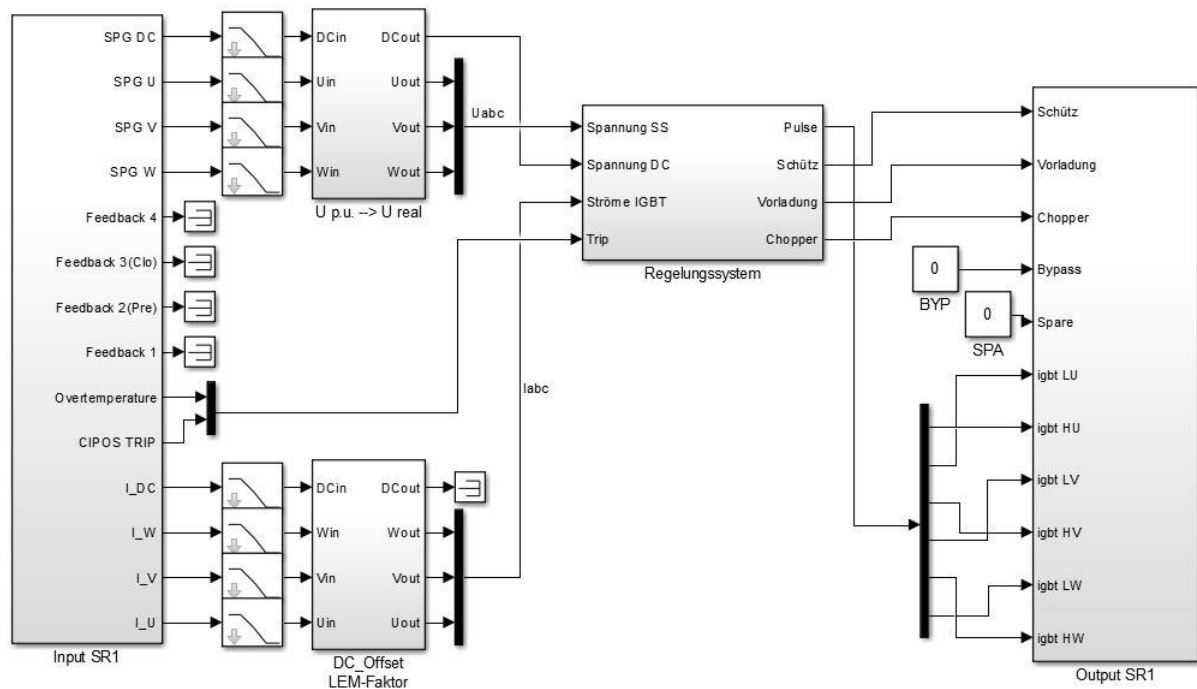


Bild 6.1: Implementierung des Regelungssystems für dSpace

Die Blöcke „U p.u. → U real“ und „DC Offset LEM-Faktor“ dienen dazu, die normierten ADC-Eingangssignale auf SI-Einheiten umzurechnen. Die verwendeten Amplitudenverhältnisse sind für die Spannungswerte in Abschnitt 6.5.1 und für die Stromwerte in Abschnitt 6.4.1 zu finden.

Um auf die Variablen und Ausgabewerte des auf der Reglerkarte laufenden Programmes zugreifen zu können, wird die dSpace-Software ControlDesk verwendet. Mit dieser Software können alle Variablen abgeändert und Ausgabewerte visualisiert werden. In dieser Arbeit ist die Software für die Visualisierung der sowie für die Steuerung des STACOM zuständig.

Der Aufbau der Visualisierung ist variabel, die erstellte Oberfläche zur Steuerung und Visualisierung der Messwerte ist in Bild 6.2 dargestellt. Dabei ist der obere Bereich in drei wesentliche Teile gegliedert. Der Teil „Messwerte-PCC“ zeigt die aktuelle Spannung und Frequenz am Netzanschlusspunkt. Der Teil „Messwerte – STATCOM“ zeigt die wesentlichen Messwerte und den Betriebszustand der Regler. Mit dem Teil „STATCOM – Steuerung“ kann auf die in Bild 5.3 dargestellten Konstanten zugegriffen werden um die einzelnen Regler ein- und auszuschalten. Ebenfalls wird auf die Sollwerte der Zwischenkreisspannung, der Zuschaltspannung des Schütz und der Zuschaltspannung des Choppers zugegriffen.

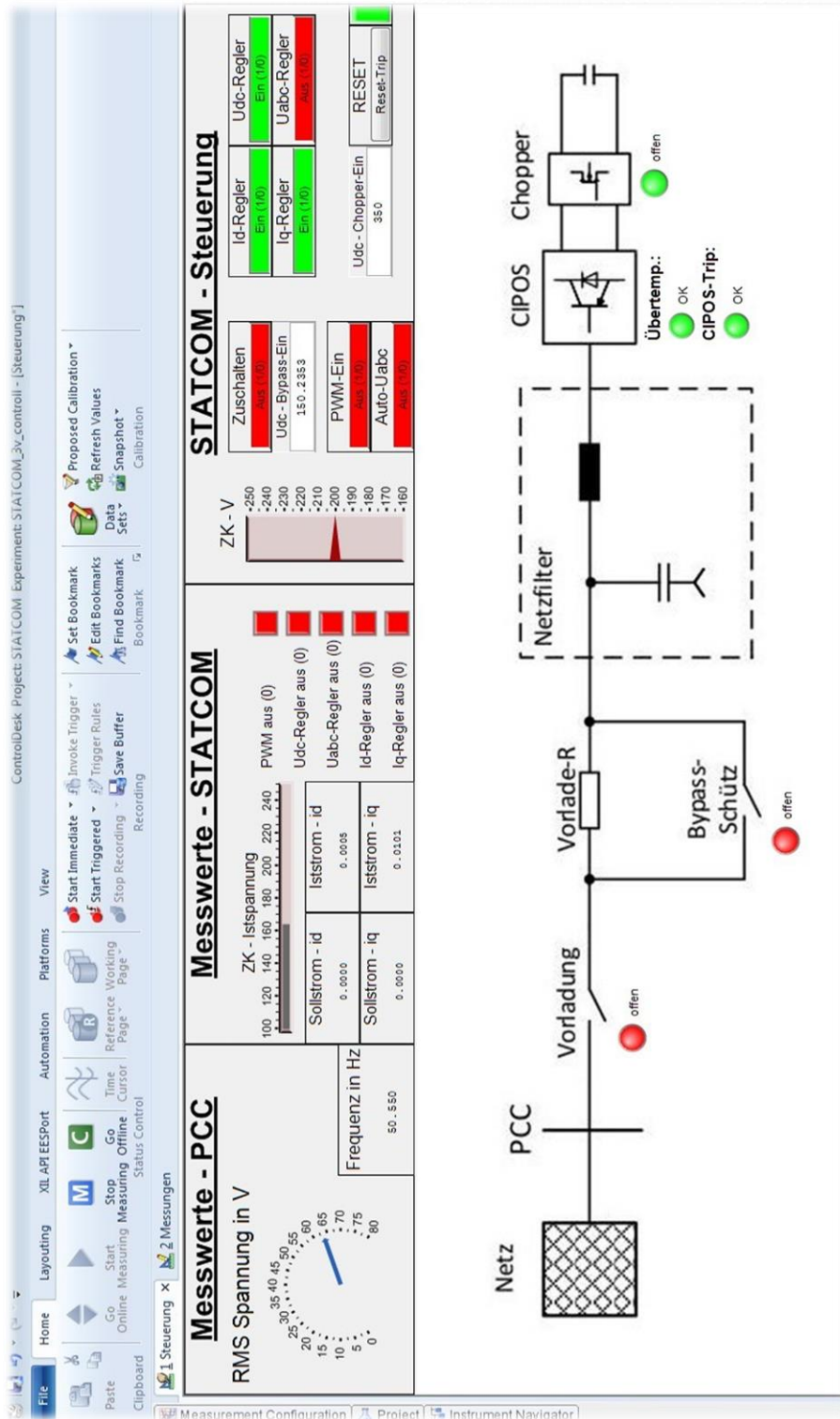


Bild 6.2: Steuerungsoberfläche des STATCOM in der Software ControlDesk

6.3 Verbindungsplatine

6.3.1 Schaltplanentwurf

Aufgabe der Verbindungsplatine ist es, alle benötigten Signalleitungen an die Kommunikationsplatine weiterzugeben. Außerdem soll es möglich sein auf die nicht benötigten Signalleitungen zuzugreifen.

Das Mapping der einzelnen Signale von der dSpace-Karte zum STATCOM ist im Anhang 10.5 enthalten, wobei darin nur die benötigten Signale für den Betrieb mit einer Stromrichterplatine enthalten sind. Eine detaillierte Beschreibung der dSpace Signalleitungen ist im Dokument [11] zu finden.

Der entworfene Schaltplan ist im Anhang 10.4.1 enthalten. Die entwickelte Platine ist in Bild 6.3 zu sehen.

6.3.2 Platinen

Die zwei 50 poligen Sub-D Stecker sind mit der dSpace-Karte verbunden.

Alle Analog-Ein- und Ausgänge sind über BNC-Buchsen zugänglich, die zwei 9 poligen Sub-D Stecker bieten Zugang zu den Encoder-Signalen der Karte, alle anderen Signale sind über die schwarzen Buchsen „COM1“ und „COM2“ bzw. über den IDC-Flachbandkabelanschluss zugänglich.

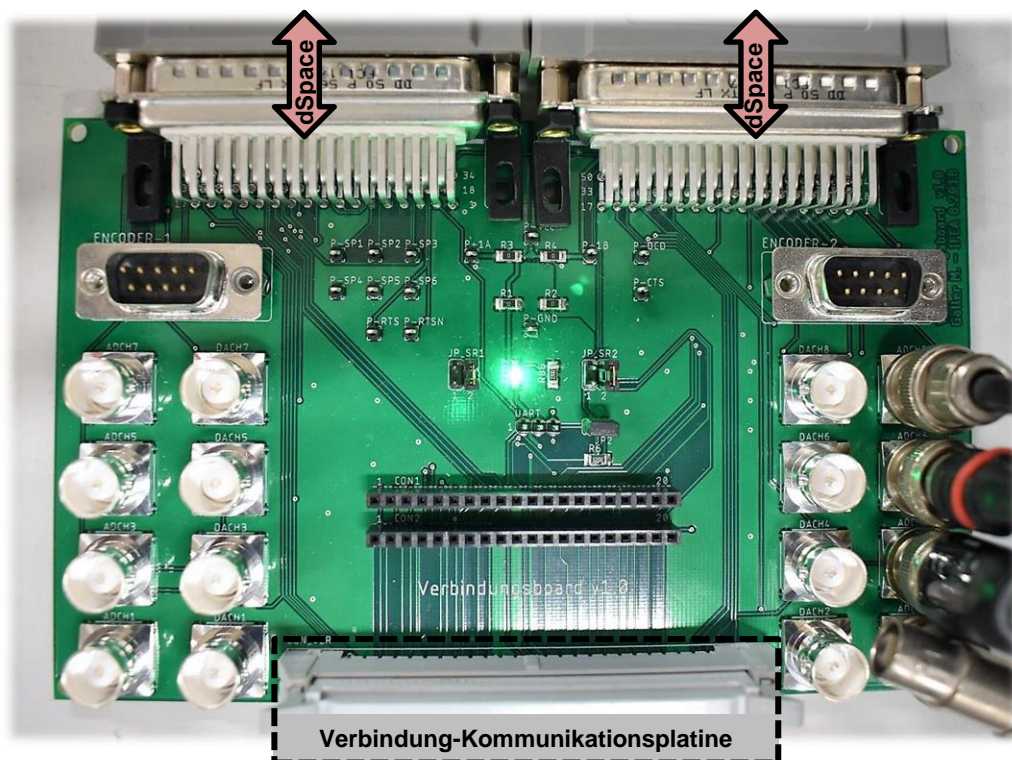


Bild 6.3: Verbindungsplatine

6.4 Kommunikationsplatine

6.4.1 Schaltplanentwurf

Die Kommunikationsplatine ist zuständig für die Messung der Strangströme der Stromrichterplatinen sowie dafür, die Signalleitungen mit den zuständigen Platinen zu verbinden. Die Kommunikationsplatine wird mit externen 24 Vdc versorgt, diese Spannung wird ebenfalls an die Stromrichterplatinen weiterverteilt. Die interne Spannung wird von der externen Spannungsversorgung mit einem isolierten Spannungsregler bereitgestellt. Ein weiterer isolierter Spannungsregler dient zur Spannungsversorgung der Trennverstärker auf der Stromrichterplatine.

Die verwendeten Stromwandler [12] sind für einen Nennstrom von 6 Arms ausgelegt. Dies entspricht einem Vielfachen des in Tabelle 6.1 geforderten Maximalstroms. Um den Messbereich des Wandlers in die Nähe des geforderten Nennstroms zu skalieren werden mehrere Windungen um den Stromwandler gewickelt. Aus dem Datenblatt [12], der gewählten Wicklungszahl und der Tatsache, dass der Messbereich zwischen 0 und 5 V liegt, ergibt sich die Gleichung (6.1). Dabei ist U_{out} die gemessene Spannung des Stromwandlers und I_N der Nennstrom des Wandlers. Diese Gleichung ist im Simulink® Modell in Bild 6.1 implementiert.

$$I_C = (u_{out} - 2,5) \cdot \frac{I_N}{\underbrace{5 \cdot 0,625}_{k_I}} \quad (6.1)$$

Für die Strommessungen wird ein Tiefpassfilter direkt nach der Messung verwendet um unnötige Oberschwingungen präventiv herauszufiltern, Berechnung im Anhang 10.3.

Tabelle 6.2: Elementare Bauteile der Kommunikationsplatine

| Bauteil | Typ | Datenblatt |
|---|-----------|------------|
| Stromwandler – alle 8 (4 pro Stromrichterplatine) | LTSR 6-NP | [12] |
| Arduino DUE | A000062 | |
| Spannungsregler Internen – TEL8-2412 | TEL8-2412 | [13] |
| Spannungsregler für Trennverstärker der Stromrichterplatinen – TMH-D | 2415D | [14] |

Ein Arduino Due ist grundsätzlich für die Digitalisierung mittels integrierten ADCs der gemessenen Ströme zuständig. Die Messwerte werden über einen RS485-Bus zur Verbindungsplatine gesendet und von dort zur dSpace Karte weitergeleitet.

Der detaillierte Schaltplan der Kommunikationsplatine ist in Anhang 10.4.2.

6.4.2 Platine

In Bild 6.4 ist in der Mitte der Kommunikationsplatine eine aufgesteckte weiße-blaue Platine zu sehen. Diese Platine ist ein Arduino DUE, welcher für diese Arbeit nicht benötigt wurde. Bei Verwendung einer zweiten Stromrichterplatine müssen jedoch die Ströme mit dem Arduino-ADCs digitalisiert und über ein Bussystem an die dSpace-Karte gesendet werden. Die LEM-Stromwandler sind in Bild 6.4 nicht zu sehen, da sie sich an der Unterseite der Platine befinden.

Die installierten 9 poligen Sub-D Buchsen dienen dazu, mit externen Messgeräten die Strom- und Spannungsmessungen abgreifen zu können. Dabei ist eine Buchse für die gemessenen Strangspannungen, eine Buchse für die gemessenen Strangströme und eine Buchse für die gemessene Zwischenkreisspannung und Strom.

Um die Signale der gemessenen Ströme auch mit gängigen Tastköpfen, z.B. von einem Oszilloskop, messen zu können, wurde nach jedem Tiefpassfilter ein Messpunkt installiert.

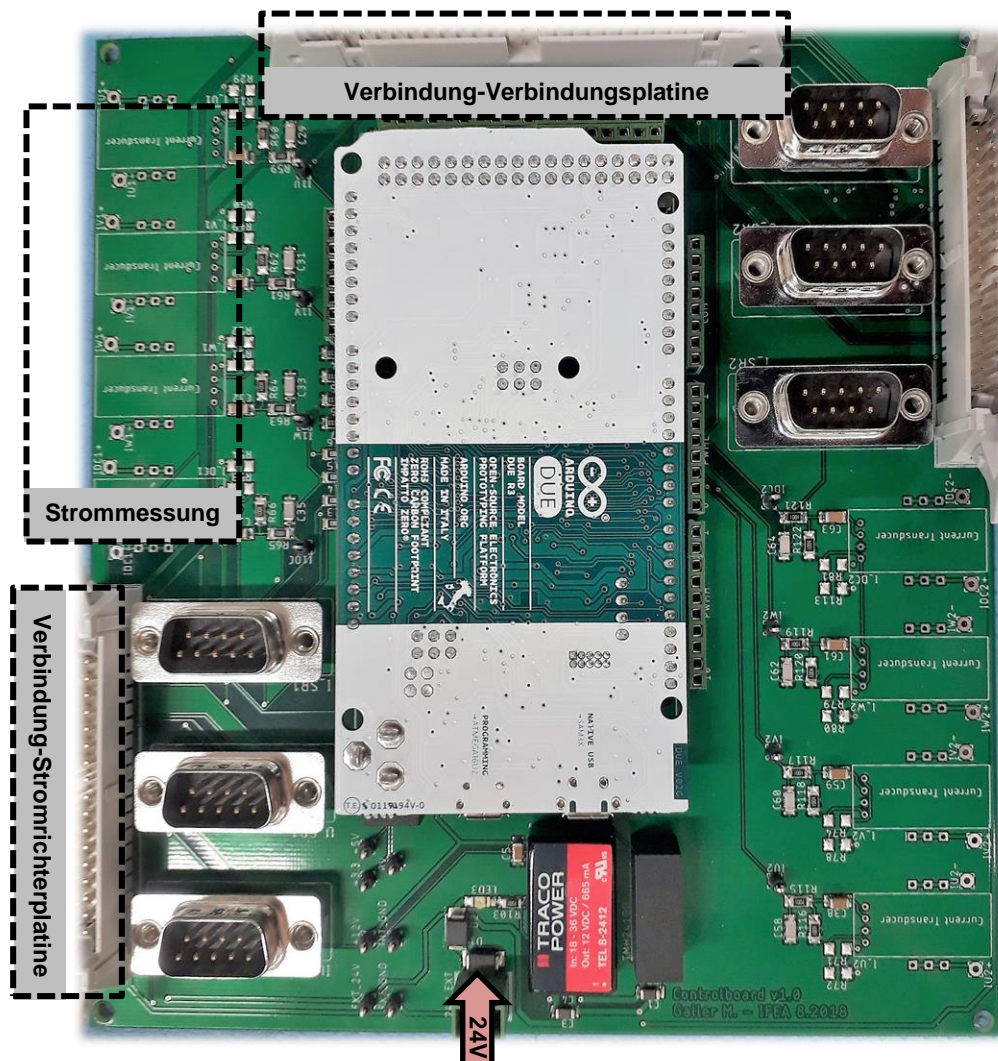


Bild 6.4: Kommunikationsplatine

6.5 Stromrichterplatine

6.5.1 Schaltplanentwurf

Die Stromrichterplatine muss mehrere Funktionen erfüllen, darunter: Spannungsmessung am Netzkoppelpunkt PCC, Spannungsmessung des Zwischenkreises, Ansteuerung des Chopper-Widerstandes, interne Spannungsversorgungen, galvanische Trennung der Signale, Schalten externer Schütz und Schalten der IGBTs. Zusätzlich muss eine - von der externen Regelung unabhängige - Schutzbeschaltung für das IGBT-Modul untergebracht werden. Bei der Auslegung der Bauteile sind stets die Rahmenbedingungen in Tabelle 6.1 zu berücksichtigen. Die verwendeten elementaren Bauteile sind in Tabelle 6.3 angegeben.

Tabelle 6.3: Elementare Bauteile der Stromrichterplatine

| Bauteil | Typ | Datenblatt |
|---|------------------------------|------------|
| IGBT Modul - CIPOS | IGCM10F60GA | [15] |
| Spannungsmessung - IC11, IC12, IC13, IC14 | ISO124 | [16] |
| Spannungsversorgung - TMH-D und TMH-S | 2415D, 2405S, 2415S | [14] |
| Relay | RY610005 | [17] |
| Optokoppler - alle | MOCD217M | [18] |
| Chopper MOSFET – CHO | IPD50R650CE | [19] |
| Spannungsteiler Überstromschutz R37 und R38 | R37 = 24 kΩ R38 = 2,7 kΩ | |
| Spannungsteiler Übertemperaturschutz R40 und R41 | R40 = 5,6 kΩ R41 = 5,6 kΩ | |

Als Leistungshalbleiter Bauteil wird ein Infineon-Chip verwendet, in welchem bereits die Treiberschaltung und eine interne Schutzbeschaltung für die IGBTs vorhanden sind. Die sogenannten CIPOS Module der Firma Infineon erfüllen diese Anforderung. Die notwendigen Peripherie-Beschaltungen für das CIPOS-Modul ergeben sich aus den Anwendungshinweisen im Dokument [20]. Das Prinzip der Schutzbeschaltung für das CIPOS-Modul wurde aus dem Dokument [21] übernommen. Die Spannungsteiler der Komparatoren für den Übertemperatur- und den Überstromschutz wurden an die Rahmenbedingungen angepasst, die Berechnung erfolgt rechnerunterstützt, siehe Anhang 10.3.

Mit der Bedingung der galvanischen Trennung zwischen Leistungskreis und Signalkreis muss ein Trennverstärker mit vorgeschaltetem Spannungsteiler für die Spannungsmessung verwendet werden. Um im Regelungssystem von den eingelesenen Werten wieder auf die SI-Einheiten zu kommen muss jeder Spannungsmesswert mit dem in Tabelle 6.4 angegebenen Faktor multipliziert werden. Diese Faktoren ergeben sich vereinfacht nach Gleichung (6.2), dabei ist R_{in} der Innenwiderstand der Trennverstärker und R_1 der Spannungsteilerwiderstand. Die Widerstände unterliegen Toleranzen, daher weichen die einzelnen Faktoren leicht ab.

$$k_U = \frac{R_1 + R_{in}}{R_{in}} \quad (6.2)$$

Tabelle 6.4: Multiplikationsfaktoren zur Berechnung der realen Spannungen

| Spannungsmessung | Spannungsteiler-Widerstand | Faktor - k_U |
|------------------|--|----------------|
| DC | $R_{13} + R_{12} = R_1$ und $R_{82} R_{in}$ | 48,69 |
| U | $R_{56} + R_7 = R_1$ | 27,85 |
| V | $R_{33} + R_6 = R_1$ | 27,9 |
| W | $R_{31} + R_5 = R_1$ | 27,9 |

Für das Messsignal wird ein Tiefpassfilter direkt nach der Messung verwendet um unnötige Oberschwingungen herauszufiltern, Berechnung im Anhang 10.3.

Als Überspannungsschutz des Zwischenkreises wird ein externer Chopper-Widerstand verwendet, um diesen zu schalten, ist ein MOSFET auf der Platine verbaut.

Für die galvanische Trennung der dSpace-Signale und jener Signale auf der Platine werden Optokoppler eingesetzt.

Der detaillierte Schaltplan der Stromrichterplatine ist in Anhang 10.4.3.

6.5.2 Platinen

In Bild 6.5 sind die Platinen-Anschlüsse bezeichnet, dabei steht „Spg.“ für Spannung, „Vorl.“ für Vorladung, „ZK“ für Zwischenkreis und „Schz.“ für Schütz.

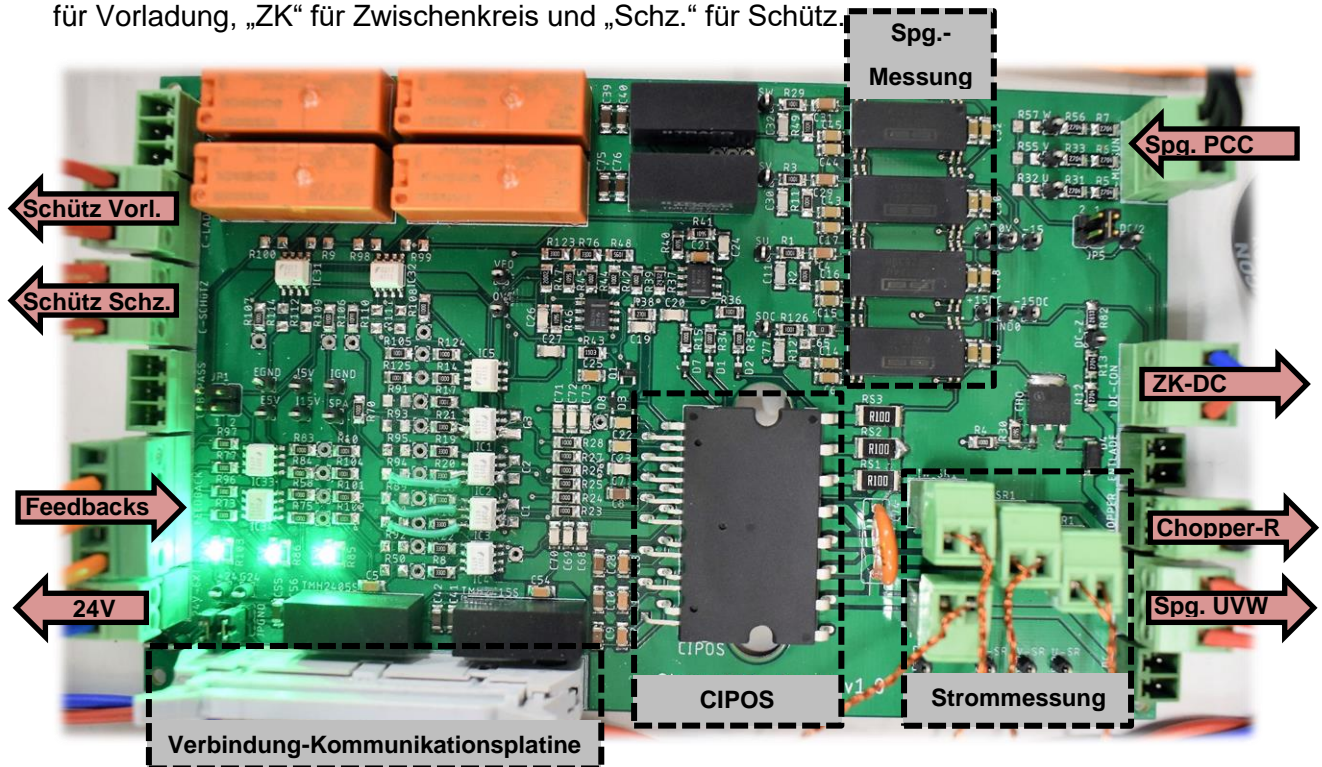


Bild 6.5: Stromrichterplatine

Die im Bild 6.5 als Strommessung bezeichnete Stelle ist nicht die Messung selbst. Hier werden die Messleitungen von der Kommunikationsplatine angeschlossen.

6.6 Gesamtsystem am analogen Netzmodell

Die beschriebenen Platinen in den Abschnitten 6.3, 6.4 und 6.5 ergeben mit den zusätzlich benötigten externen Komponenten das zu entwickelnde STATCOM Modul.

Tabelle 6.5: Externe Komponenten des STATCOM Moduls

| Bauteil | Typ | Datenblatt | | |
|---|--------------------------|--------------------|-----------|------|
| Zwischenkreiskondensator – zwei seriell | 680 μ F, 250 V | [22] | | |
| Chopper-Widerstand – 2parallel | HS50 1K5 J | [23] | | |
| Labor-Induktivität | Lucas-Nülle - 3ph 0.4 mH | | | |
| EMC Filter | B84143V0006R227 | [24] | | |
| Vorladewiderstand – pro Strang | HS100 220R J | 3ph Schütz - beide | BC6-30-10 | [25] |
| 3ph Schütz - beide | BC6-30-10 | [25] | | |

Im Bild 6.6 sieht man den gesamten Aufbau des STATCOM nach Abschnitt 5.1, inklusive aller in Tabelle 6.5 aufgezählten externen Komponenten. Dabei ist erkennbar, dass die gemessenen Ströme über Tastköpfe zu den ADCs der dSpace-Karte geführt werden um den Arduino DUE in diesem Betriebsmodus nicht zu benötigen.

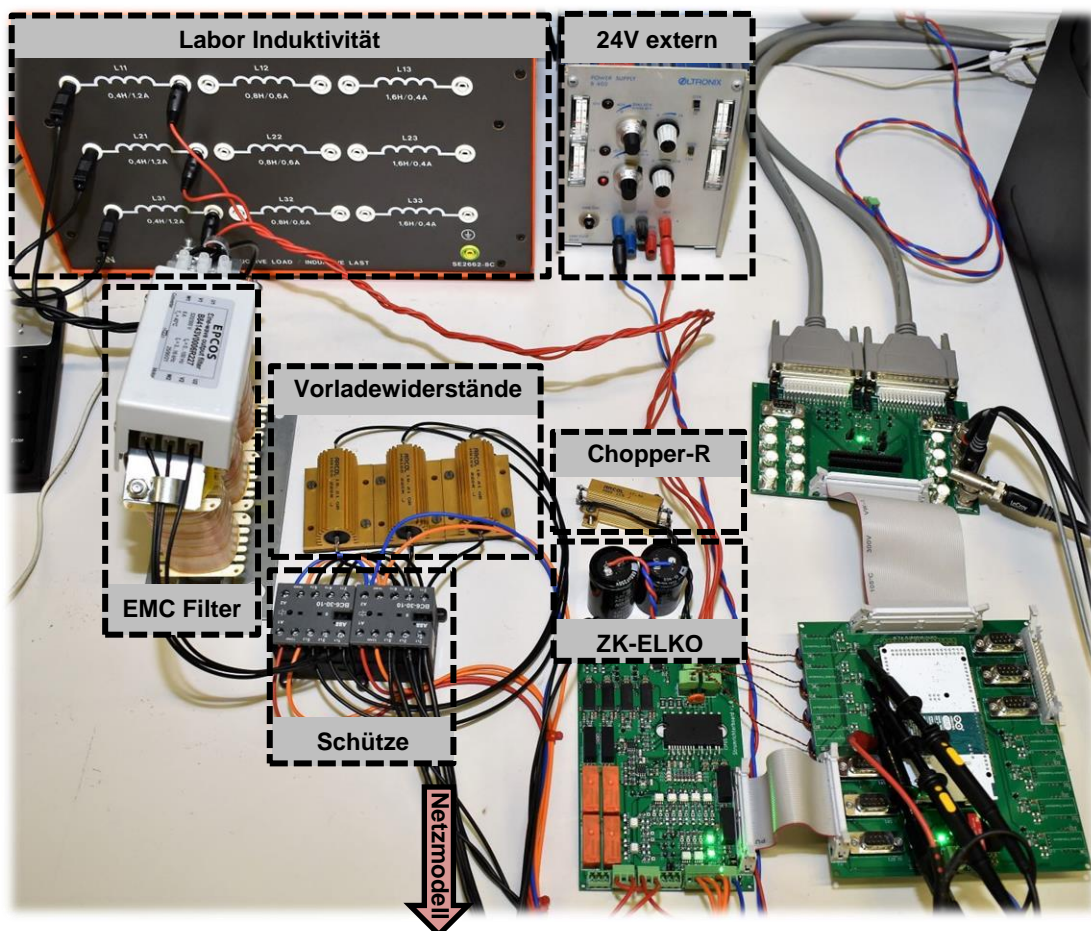


Bild 6.6: gesamter Aufbau des STATCOM am analogen Netzmodell

6.7 Verhalten der Hardware am Netzmodell

Die entworfene Logik in Abschnitt 5.5 steuert auch die Vorladesequenz des Spannungszwischenkreises. Der Spannungsverlauf durch die Vorladesequenz ist in Bild 6.7 dargestellt.

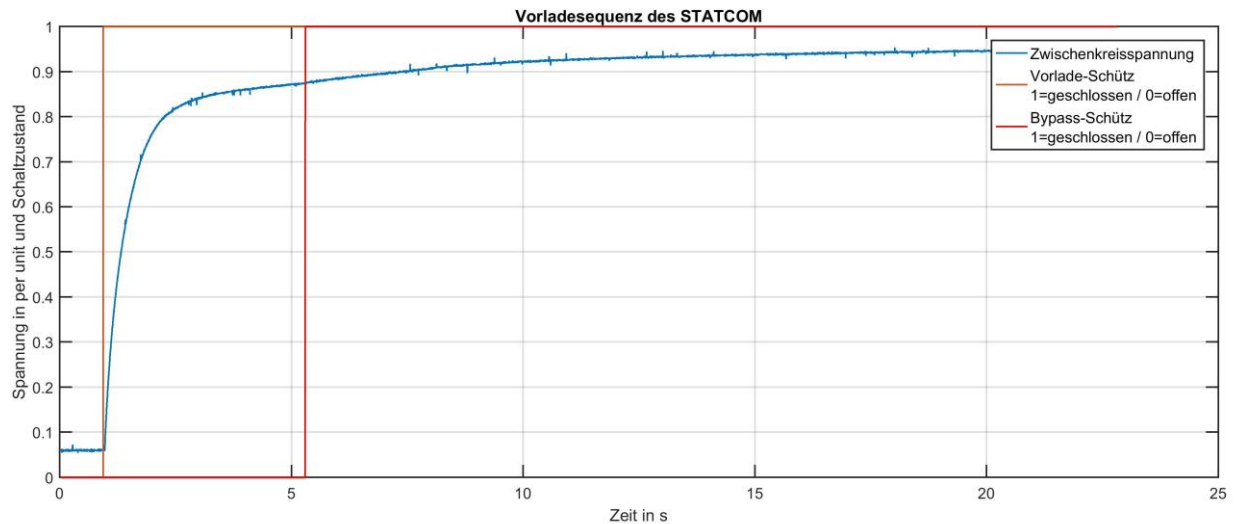


Bild 6.7: Vorladesequenz des STATCOM

Eine Kurvenform während dem Betrieb des STATCOM am Netzknoten PCC ist nicht verfügbar. Bei der Generierung des C-Codes, welcher für die Ausführung auf der Reglerkarte benötigt wird, gab es Probleme mit der verwendeten PLL. Ein Betrieb konnte nur kurzzeitig aufgenommen werden. Nach kurzer Zeit passte die Winkellage der PLL nicht mehr zur Netzspannung, wodurch die erforderliche Spannungsorientierung der Regelung verloren ging.

7 Diskussion

FACTS sind heutzutage keine rein mathematischen Modelle oder theoretischen Überlegungen mehr, durch den Einzug der Leistungs-Halbleiter in die Energietechnik sind solche flexiblen Drehstromübertragungssysteme mittlerweile als Standardsysteme anzusehen.

In dieser Arbeit wird speziell die Technologie eines STATCOM betrachtet. Diese Bauform der flexiblen Drehstromübertragungssysteme wurde speziell für ein analoges Netzmodell am Institut für Elektrische Anlagen und Netze entwickelt.

Die vier verwendeten Regler, die zwei Stromregler sind ident, wurden anhand der hergeleiteten Regelstrecken dimensioniert. Dabei wurde der Zwischenkreisregler durch den Einsatz eines speziellen Tools und die anderen zwei Regler mithilfe des Frequenz-Kennlinien-Verfahrens dimensioniert. Da die Reglerstruktur eine kaskadierte Regelung mit Spannungs- überlagerter Stromregelung darstellt, wurde darauf geachtet, dass die Spannungsregler langsamer sind als die inneren Stromregler. Die geschlossenen Regelstrecken wurden durch eine Sprungantwort auf ihre Funktion überprüft. Jeder der geschlossenen Regelkreise weist eine funktionstüchtige Dimensionierung auf.

Die verwendeten Regelstrecken wurden unter diversen Annahmen hergeleitet, wie z.B. die Annahme der vollständigen Entkopplung zwischen dem d- und q-Ersatzschaltbild. Diese Annahmen vereinfachen die Streckenherleitung, führen jedoch nicht zu exakten Ergebnissen bei der Reglerauslegung. Um realistische Ergebnisse zu bekommen, wurde ein detailliertes Modell aufgesetzt. Der Detaillierungsgrad dieses Modells wurde deshalb so hoch gewählt, um die Regelung vorab so realistisch wie möglich testen zu können. Der Spannungsverlauf der Knotenspannung im Bild 5.11 entspricht dabei nicht der wirklichen Spannung, welche bei einem rein resistiven Lastsprung auftritt. Das nicht realistische Unterschwingen der Spannung ergibt sich dabei durch den verwendeten „RMS“-Block welcher eine Fourieranalyse beinhaltet und sich dazu auf die Nennfrequenz bezieht.

Abgesehen davon, ist in der Simulation zu erkennen, dass der STATCOM in der Lage ist, die Spannung am Netzknoten PCC auf den geforderten Wert anzuheben. Im Gegensatz zu üblichen regelbaren Ortsnetztransformatoren regelt der STATCOM die Knotenspannung im Bruchteil einer Sekunde wieder auf den geforderten Wert.

Die Realisierung beruht auf dem Konzept, dass mit dieser Hardware auch andere flexible Drehstromübertragungssysteme umgesetzt werden können. Dies führte zu der Realisierung mit drei separat aufgebauten Platinen, wobei die Stromrichterplatine die umfangreichste wurde. Die Signale der Reglerkarte mussten galvanisch von den Signalen auf der Stromrichterplatine getrennt werden.

Die Vorladung des Spannungszwischenkreises wurde mit großen Zeitkonstanten dimensioniert um die interne B6 Diodenbrücke nicht zu überlasten. Die Ladedauer ist für den eigentlichen Betrieb nicht relevant, da der STATCOM erst mit geladenem Zwischenkreis als Betriebsbereit angesehen wird.

Die Funktion der Spannungsstützung konnte nicht getestet werden, da bei der automatischen C-Code Generierung der PLL ein Implementierungsproblem vorliegt. Die verwendete PLL regelt am ungestörten Netz die Spannungsorientierung nicht konstant aus.

7.1 Ausblick

Der nun hardwaremäßig aufgebaute STATCOM kann unter Zuhilfenahme einer speziell designten PLL, welche für die Implementierung als C-Code geeignet ist, vollkommen in Betrieb genommen werden.

Die verwendeten Platinen sind derzeit Prototypen, an welchen, wie in den Bildern teilweise ersichtlich, manuell Modifikationen vorgenommen werden mussten. Speziell die Stromrichterplatine im Bereich der Schaltsignale sollte man verbessern um einen reibungsfreien Betrieb gewährleisten zu können.

Durch diese Entwicklung und Implementierung im analogen Netzmodell können in Zukunft Konzepte zur Blindleistungsstabilität mit den Ergebnissen vereinfachter Berechnungen verglichen werden. Bei Erweiterung um ein weiteres Stromrichtermodul können auch Untersuchungen zur Lastflussregelung durchgeführt werden

8 Literaturverzeichnis

- [1] S. Rajakaruna , A. Ghosh und S. Farad, Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems, 1. Hrsg., Springer Singapore, 2015.
- [2] A. d. E. Union, „VERORDNUNG (EU) 2017/1485 DER KOMMISSION vom 2. August 2017 zur Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb,“ 2017.
- [3] K. Krischan, „Skriptum zu den Vorlesungen Stromrichtertechnik 1 und Stromrichtertechnik 2,“ Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen.
- [4] D. Schröder, Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen, 4. Hrsg., Springer Vieweg, 2015.
- [5] S. Bernet, Selbstgeführte Stromrichter am Gleichspannungszwischenkreis, 1. Hrsg., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [6] H. Renner, Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme, Graz: Institut für Elektrische Anlagen und Netze - TU Graz, 2013.
- [7] M. Horn und N. Dourdoumas, Regelungstechnik, Pearson Studium, 2004.
- [8] V. Crastan und D. Westermann, Elektrische Energieversorgung 3, 1. Hrsg., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [9] Y. Peng, D. Vrancic und R. Hanus, Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers, IEEE Control Systems, 1996.
- [10] dSPACE GmbH, „DS1104 R&D Controller Board - Technical Details,“ Paderborn.
- [11] dSPACE, „Hardware Installation and Configuration For DS1104 and CP1104/CLP1104 Connector Panels,“ dSPACE GmbH, Paderborn, 2016.
- [12] LEM, „Datasheet Current Transducer LTSR 6-NP“.
- [13] Traco Power, „Datasheet DC/DC Converter Tel 8 Series,“ 2018.
- [14] Traco Power, „Datasheet DC/DC Converters TMH Series“.
- [15] Infineon, „Datasheet IGCM10F60GA,“ München.
- [16] Texas Instruments, „Datsheet ISO124“.
- [17] TE connectivity, „Datasheet Miniature Power PCB RYII & RYII Reflow Solderable“.
- [18] Fairchild, „Datasheet MOCD217M“.
- [19] Infineon, „Datasheet MOSFET IPD50R650CE,“ München.

- [20] Infineon, „AN2016-10 Application Note CIPOS,“ München.
- [21] Infineon, „AN2017-18 EVAL-M1-099M-C User Manual,“ München.
- [22] RS pro, „Datasheet Aluminium Electrolytic Capacitor“.
- [23] ARCOL, „Datasheet HS Aluminium Housed Resistors,“ Truro Cornwall UK.
- [24] TDK, „Datasheet EMC Filter“.
- [25] ABB, Datasheet 3pole Contactor BC6-30-10-01.ABB, Hrsg.
- [26] R. Adapa, M. Baker, L. Bohmann, K. Clark, K. Habashi, L. Gyugyi, J. Lemay, S. Mehraban, K. Myers, J. Reeve, F. Sener, R. Torgerson und R. Wood, „Proposed terms and definitions for flexible AC transmission systems(FACTS),“ *Transactions on Power Delivery*, Bd. 4, Nr. 12, pp. 1848-1853, October 1997.

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer STATCOM Anwendung | 14 |
| Abbildung 2.2: Gewählte Netztopologie für den Einsatz eines STATCOM | 19 |
| Abbildung 3.1: Detaildarstellung des Umrichters mit Zwischenkreiskondensator | 20 |
| Abbildung 3.2: Schaltzustände der Raumzeigermodulation | 22 |
| Abbildung 3.3: Vereinfachtes Netz mit Filterkreis zwischen STATCOM und PCC | 23 |
| Abbildung 3.4: ESB des netzseitigen elektrischen Modelles. Links im d- und rechts im q-System | 24 |
| Abbildung 4.1: Regelungskonzept eines STATCOM | 27 |
| Abbildung 4.2: Stromregelung - Regler und Regelstrecke | 29 |
| Abbildung 4.3: Spannungszwischenkreisregelung - Regler und Regelstrecke | 30 |
| Abbildung 4.4: Netzspannungsregelung - Regler und Regelstrecke | 31 |
| Abbildung 4.5: Signalfussplan zeitkontinuierlicher Regler mit Anti-Windup | 32 |
| Abbildung 6.1: Konzept zur Realisierung eines STATCOM in einem analogen Netzmodell .. | 45 |

9.2 Bilderverzeichnis

| | |
|--|----|
| Bild 2.1: Stabilisierte Spannungsquelle | 16 |
| Bild 2.2: Steckbarer Transformator in Dyn5 | 17 |
| Bild 2.3: Freileitungsmodul | 18 |
| Bild 2.4: Last am Netzmodell | 18 |
| Bild 4.1: Sprungantwort des geschlossenen Stromregelkreises | 33 |
| Bild 4.2: Sprungantwort des geschlossenen Zwischenkreisregelkreises | 33 |
| Bild 4.3: Sprungantwort des geschlossenen Netzspannungsregelkreises | 34 |
| Bild 5.1: Gesamtdarstellung des Simulationsmodelles | 36 |
| Bild 5.2: Vorladeschaltung für den Spannungszwischenkreis | 37 |
| Bild 5.3: Regelungssystem des STATCOM | 38 |
| Bild 5.4: Block Filter und Umwandlung | 39 |
| Bild 5.5: Stromregelung - Übersicht | 40 |
| Bild 5.6: Kompensation der Störgrößen und Kopplungsterme | 40 |
| Bild 5.7: Struktur PI-Regler mit Anti-Windup | 41 |
| Bild 5.8: Strombegrenzung des Regelungssystems | 42 |
| Bild 5.9: Aufbau des Blocks - Modulation | 42 |
| Bild 5.10: Aufbau des Logik Blocks | 43 |
| Bild 5.11: Verlauf der gemittelten RMS-Spannung am Netzknoten PCC – mit und ohne STATCOM | 44 |
| Bild 6.1: Implementierung des Regelungssystems für dSpace | 46 |
| Bild 6.2: Steuerungsoberfläche des STATCOM in der Software ControlDesk | 47 |
| Bild 6.3: Verbindungsplatine | 48 |

| | |
|--|----|
| Bild 6.4: Kommunikationsplatine | 50 |
| Bild 6.5: Stromrichterplatine | 52 |
| Bild 6.6: gesamter Aufbau des STATCOM am analogen Netzmodell | 53 |
| Bild 6.7: Vorladesequenz des STATCOM | 54 |

9.3 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 2.1: Maßstäbe des analogen Netzmodells..... | 16 |
| Tabelle 2.2: Leitungsparameter des Freileitungsmoduls | 17 |
| Tabelle 2.3: Werte der Belastungswiderstände | 18 |
| Tabelle 2.4: Beschreibung der Kurzbezeichnungen aus Abbildung 2.2..... | 19 |
| Tabelle 3.1: Schaltzustände und zugehörige Ausgangsspannungen der Raumzeigermodulation | 22 |
| Tabelle 4.1: Parameter der berechneten PI-Regler im Frequenzbereich..... | 32 |
| Tabelle 4.2: Parameter der verwendeten PI-Regler für zeitdiskrete Implementierung | 32 |
| Tabelle 5.1: Einstellungen der Simulationsblöcke | 37 |
| Tabelle 5.2: Einstellungen im Modulationsblock..... | 43 |
| Tabelle 6.1: Rahmenbedingung für die Realisierung eines STATCOM-Moduls..... | 45 |
| Tabelle 6.2: Elementare Bauteile der Kommunikationsplatine..... | 49 |
| Tabelle 6.3: Elementare Bauteile der Stromrichterplatine | 51 |
| Tabelle 6.4: Multiplikationsfaktoren zur Berechnung der realen Spannungen | 52 |
| Tabelle 6.5: Externe Komponenten des STATCOM Moduls..... | 53 |

10Anhang

10.1 Initialisierung der Simulation

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Initialisierungsfile für die STATCOM Simulation
%
% Erstellt von: Manuel Galler
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% clc
% close all;
% clearvars

%Netzmodell - Daten
% Spannungsmaßstab 1:1000      1V --> 1kV
% Strommaßstab      1:1000      1A --> 1kA
% Leistungsmaßstab 1:10^6       1VA --> 1MVA
% Impedanzmaßstab  1:1         1Ohm --> 10hm

%Parameter
%Netz
    fn = 50;           %Nennfrequenz in Hz
    Un = 115;          %Spannung ph-ph in Vrms
    Rn = 3.1*2;        %Widerstand in Ohm
    Rlast = 220;       %Standartlast am Netz in Ohm
    Rspr = 680;        %Zusätzliche Last am Netz in Ohm
    w = fn *2*pi;     %Nennkreisfrequenz in rad

%STATCOM
%Vorladung
    Rpre = 220;        %Vorladewiderstand in Ohm
%CIPOS-Modul
    fswi = 5650;       %Schaltfrequenz IGBTs
    Cdc = 680e-6/2;    %DC Zwischenkreiskondensator in F
    Udc_ini = Un*2*sqrt(2/3); %Vorladung im Cdc in V
%Limits
    Udc_max = 350;     %Max. DC-ZK Spannung in V
    Udc_min = 50;     %Min. DC-ZK Spannung in V
    Imax = 0.2*sqrt(2); %Max. Spitzenstrom in Am
    Umax = Un*2*sqrt(2/3)*1.1; %Maximale Modulationsspannung STATCOM
    DC_on = Un*2*sqrt(2/3)*0.8; %Zuschaltspannung Schütz in V
    DC_off = Un*2*sqrt(2/3)*0.6; %Abschaltspannung Schütz in V
%Reglerwerte
    Uabc_soll = 63*sqrt(2); %Sollstrangspannung am PCC in V
    Udc_soll = Un*2*sqrt(2/3)*1.1; %DC Sollspannung Zwischenkreis in V
%Tiefpassfilter der Messungen
    Ts = 1/(17*fswi); %Abtastintervall in s
    Freq_filter=10000; %in Hz %derzeit 100kHz auf Platine
    Zeta_filter=0.707;
%Filter STATCOM
    Llsc = 0.4+8.5e-3; %Induktivität Filter in H
    Rlsc = 4+290e-3; %Widerstand Filter in Ohm
    Clsc = 2.2e-6; %Kapazität Filter in F
    RClsc = 680e3;

```



```
% Leitung 1 - Transformator zur Sammelschiene
% PI-Ersatzschaltbild - 100km
C0_L1 = 440*10^-9;      %Nullkapazität
C1_L1 = 1040*10^-9;    %Mitkapazität
Z0_L1 = 11.8+j*69.4;   %Nullinduktivität
Z1_L1 = 3.1+j*29.8;    %Mitinduktivität
% Leitung 2 - Sammelschiene zur Last
% PI-Ersatzschaltbild - 100km
C0_L2 = 440*10^-9;      %Nullkapazität
C1_L2 = 1040*10^-9;    %Mitkapazität
Z0_L2 = 11.8+j*69.4;   %Nullinduktivität
Z1_L2 = 3.1+j*29.8;    %Mitinduktivität
%Werte einer Leitung, nicht transformiert:
%Erdkapazität in F (Am Leitungsende und -anfang)
%   C1e_L1 = 220*10^-9;
%Koppelkapazität in F (Am Leitungsende und -anfang)
%   C12_L1 = 100*10^-9;
%Freileitungsinduktivität
%   Z123 = [5.6+j*43.0, 2.7+j*13.2, 3.2+j*13.2;
%           2.8+j*13.2, 5.7+j*43.3, 3.3+j*13.3;
%           2.7+j*13.3, 2.6+j*13.4, 6.8+j*42.7];
```

10.2 Reglerauslegung

```

%*****
% Reglerauslegung für die Simulation 'FACT_discret_PWM.slx'
%
% Erstellt von: Manuel Galler
%
%*****

%clc;
%clearvars;
%close all

% Berechnung der Regelparameter für die Stromregler
s = tf('s');
Td = 1/(fswi); %PWM Verzögerung - fswi in Hz
Gd = 1/(1+Td*s); %Übertragungsfunktion der PWM-Verzögerung
Tlsc = Llsc/Rlsc; %Filterzeitkonstante
Gui = (Tlsc/Llsc)/(1+s*Tlsc); %Übertragungsfunktion des Filters
Pi = Gd*Gui; %Regelstrecke für Stromregler
%Ri mit Polkürzung
[~,den]=tfdata(Pi,'v');
pole_Pi = roots(den); %Pole, gekürzt
Ri = zp(pole_Pi(2),0, 1);
tci = 0.001; %Anstiegszeit in s
wci = 1.2/tci; %Durchtrittsfrequenz in rad/s
[betr_wci, ~] = bode(Ri*Pi, wci);
Vi = 1/betr_wci;
Ri = minreal(Vi * Ri);
%Setze P und I Verstärkungsfaktoren
[num_Ri,den_Ri]=tfdata(Ri,'v');
%Übertragungsfunktion - geschlossener Stromregelkreis
Ri = (Ri*Pi)/(1+Ri*Pi);
Ri = minreal(Ri); %geschlossene Strecke
Ri_ers = 1/(1+s*2*Td); %Ersatz der geschlossenen Strecke
%Bilineratransformation s --> z
[A,B,C,D] = tf2ss(num_Ri,den_Ri);
[Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(A,B,C,D,1,'Tustin',Ts);
[nume,dene] = ss2tf(Aq,Bq,Cq,Dq);
Ri_z = tf(nume, dene, Ts);
% Berechnung der Regelparameter - für id und iq die selben Parameter
KP_id = nume(1);
ki_id = nume(2);
T_id = Ts*KP_id/(KP_id+ki_id);
Caw_id = Ts/(KP_id*T_id); %Caw Antiwindup-Gain nach Hanus
KI_id = Ts/T_id;
%Für isq - just copy paste!
KP_iq = KP_id;
Caw_iq = Caw_id;
KI_iq = KI_id;
%Übertragungsfunktion Closed-Loop in z
[num_RPi,den_RPi]=tfdata(RPi,'v');
[A,B,C,D] = tf2ss(num_RPi,den_RPi);
[Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(A,B,C,D,1,'Tustin',Ts);
[nume,dene] = ss2tf(Aq,Bq,Cq,Dq);
Ri_z = tf(nume, dene, Ts);

```

```
% ZK - Regler mit quadratischer DC-Spannung
%Übertragungsfunktion des DC-Zwischenkreises
Pdc = -3*Un/(sqrt(3/2)*2*Cdc*s); %Pdc = Udc^2/Id
Pdc_i = minreal(RPi_ers*Pdc);
%
%Auslegung mit pidTuner
%
%pidTuner(Pdc_i)
Rdc = -0.000421-0.00128/s; %Rdc_tuner.Kp+Rdc_tuner.Ki/s
%Setze P und I Verstärkungsfaktoren
[num_Rdc,den_Rdc]=tfdata(Rdc,'v');
%Bilineratransformation s --> z
[A,B,C,D] = tf2ss(num_Rdc,den_Rdc);
[Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(A,B,C,D,1,'Tustin',Ts);
[nume,dene] = ss2tf(Aq,Bq,Cq,Dq);
%
Rdc_z = tf(nume, dene, Ts);
%Berechnung der DC-Regelparameter - für id_ref
KP_dc = nume(1);
ki_dc = nume(2);
T_dc = Ts*KP_dc/(KP_dc+ki_dc);
Caw_dc = Ts/(KP_dc*T_dc); %Caw Antiwindup-Gain nach Hanus
KI_dc = Ts/T_dc;
%Übertragungsfunktion geschlossener Kreis in z
RPdc = Rdc*Pdc_i/(1+Rdc*Pdc_i);
[num_RPdc,den_RPdc]=tfdata(RPdc,'v');
[A,B,C,D] = tf2ss(num_RPdc,den_RPdc);
[Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(A,B,C,D,1,'Tustin',Ts);
[nume,dene] = ss2tf(Aq,Bq,Cq,Dq);
RPdc_z = tf(nume, dene, Ts);
%%
% Spannungsregler für den Netzknoten PCC
% Rabc mit Polkürzung
Pabc = abs(Zl_L1*2);
RPIabc = minreal(RPi_ers*Pabc);
[~,den]=tfdata(RPIabc,'v');
pole_RPabc = roots(den); %Pole gekürzt
Rabc = zpk(pole_RPabc(1),0, 1);
tci = 0.01; %Anstiegszeit in s
wci = 1.2/tci; %Durchtrittsfrequenz in rad/s
uRi = 0; %Erlaubtes überschwingen in %
phi_r_i = 70-uRi; %benötigte Phasenreserve in °
[betr_wci, phase_wci] = bode(Rabc*RPIabc, wci);
Vi = 1/betr_wci;
Rabc = minreal(Vi * Rabc);
%Setze P und I Verstärkungsfaktoren
[num_Rabc,den_Rabc]=tfdata(Rabc,'v');
%Bilineratransformation s --> z
[A,B,C,D] = tf2ss(num_Rabc,den_Rabc);
[Aq,Bq,Cq,Dq] = bilin(A,B,C,D,1,'Tustin',Ts);
[nume,dene] = ss2tf(Aq,Bq,Cq,Dq);
Ru_z = tf(nume, dene, Ts);
% Berechnung der Regelparameter - für id und iq die selben
KP_abc = nume(1);
ki_abc = nume(2);
T_abc = Ts*KP_abc/(KP_abc+ki_abc);
Caw_abc = Ts/(KP_abc*T_abc); %Caw Anti-Windup-Gain nach Hanus
KI_abc = Ts/T_abc;
%Closed-Loop Übertragungsfunktion
RPabc = Rabc*RPIabc/(1+Rabc*RPIabc);
```


10.3 Diverse Berechnungen

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Verschiedene Berechnungen zur STATCOM-Entwicklung
%
% Erstellt von: Manuel Galler
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% init
clc
% close all;
clearvars

% Spannungsteiler Messung-Netzspannung
Umax = 220/sqrt(3); %zu messende RMS Spannung in V - Strangspannung
c = 1.1; %Maximale Abweichung in pu
Umes = 10; %Maximale erfassbare Messspannung +/- in V
R1 = 5.4*10^6 %Widerstand in Ohm
%Berechnung des benötigten Widerstandes R2
U1 = Umax*c*sqrt(2);
U2 = Umes;
syms R2
R2 = round(solve((U1/(R1+R2))==U2/R2,R2));
fprintf('Strangspannungsmessung:\n')
fprintf('Wert für Messwiderstand R2 = %d Ohm\n',R2)
R2 = 0.2*10^6; %Der Innenwiderstand des Trennverstärkers wird verwendet
U2 = round((U1/(R1+R2))*R2)

%%
% Spannungsteiler Messung-DC-Spannung
Umax = 220/sqrt(3); %zu messende DC Spannung in V - Strangspannung
c = 1.1; %Maximale Abweichung in pu
Umes = 10; %Maximale erfassbare Messspannung +/- in V
R1 = 5.4*10^6 %Widerstand in Ohm
%Berechnung des benötigten Widerstandes R2
U1 = 450; %gewählter Maximalwert für DC-Zwischenkreis
U2 = Umes;
syms R2
R2 = round(solve((U1/(R1+R2))==U2/R2,R2));
fprintf('Zwischenkreisspannungsmessung:\n')
fprintf('Wert für Messwiderstand R2 = %d Ohm\n',R2)
R2 = 261000
R2 = (R2*200000)/(R2+200000) %|| mit R2 und Innenwiderstand ISO
U2 = round((U1/(R1+R2))*R2)

%Filter - Spannungsmessung - Stromrichter
%Hochpass wird nicht installiert!
%Bei AC Messung mit Hochpass, bei DC Messung nur der Tiefpass
R1 = 1*10^6; %Widerstand Hochpass in Ohm
C1 = 680*10^-9; %Kondensator Hochpass in F
R2 = 1200; %Widerstand Tiefpass in Ohm
fg_h = 120*10^3; %gewählte Grenzfrequenz vom Tiefpass in Hz
C2 = 1.2*10^-9 %berechneter Wert von C2 in F
s = tf('s');
Gh = R1/(R1+(1/(s*C1))); %Übertragungsfunktion Hochpass
Gt = (1/(s*C2))/(R2+(1/(s*C2))); %Übertragungsfunktion Tiefpass
G = Gh*Gt; %Übertragungsfunktion gesamt

% bode(G)
fprintf('\nFilter - Spannungsmessung:\n')
fprintf('Hochpass R in kOhm: %d\n',R1*10^-3)
fprintf('Hochpass C in nF: %d\n',C1*10^9)
fprintf('Tiefpass R in kOhm: %d\n',R2*10^-3)
fprintf('Tiefpass C in nF: %d\n',C2*10^9)

```

```

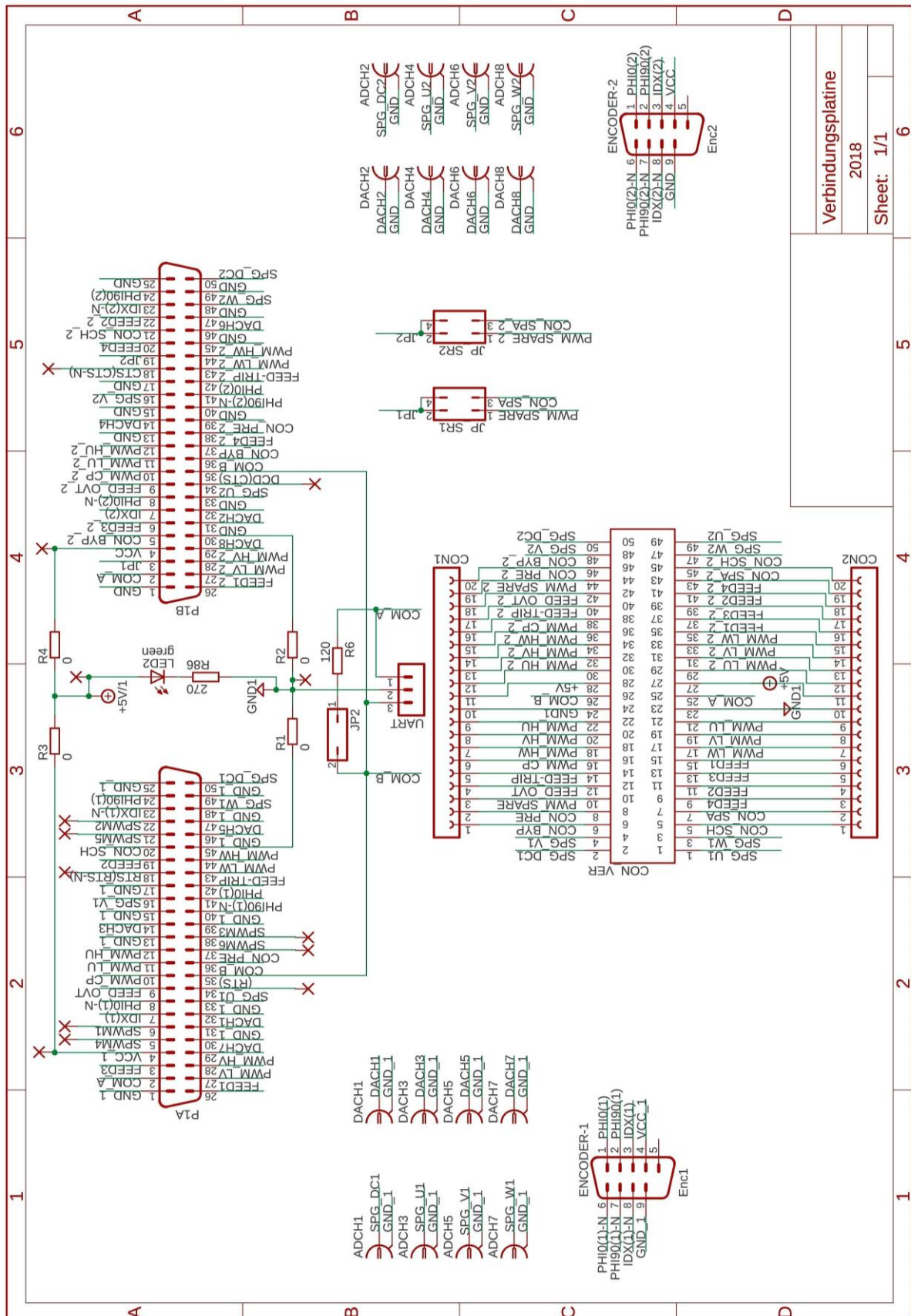
%%
%Schutzbeschaltung - CIPOS-Modul
%Die Komparatoren ziehen das potential im normalbetrieb auf GND, im Fehler
%geht der Wert wegen der Pull-Up Widerstände auf U_high!
%Überstromschutz
    %Spannungsteiler für Auswertung des Komparators. Der Shunt ist mit
    %100mOhm gewählt, der maximale Strom wird mit 5A gewählt, somit muss
    %der Referenzwert Uref = 5A*0.1Ohm = 0.5V sein!
    Uhigh = 5;           %Versorgungsspannung Komparator in V
    Uref = 0.5;         %Referenzwert für Komparator in V
    R1 = 24300;        %Widerstand 1 in Ohm
    %Berechnung des benötigten Widerstandes R2
    syms R2
    R2 = round(solve((Uhigh/(R1+R2))==Uref/R2,R2));
    fprintf('Überstromschutz:\n')
    fprintf('Wert für Spannungsteiler R2 = %d Ohm\n',R2)
%Übertemperaturschutz
    %Der Setpoint ist mit ca. 100°C NTC-Temperatur gewählt um eine
    %Sicherheitsmarge zur wahren Kerntemperatur zu haben.
    Uhigh = 5;
    R1 = 5600;         %Widerstand Spannungsteiler in Ohm
    R2 = 5600;         %Widerstand Spannungsteiler in Ohm
    Rntc = 5600;      %R bei ca. 100°C NTC in Ohm
    Rup = 5600;       %gewählter Pull-Up Widerstand in Ohm
    Uref = Uhigh/(R1+R2)*R2; %Referenzspannung
    Uov = Uhigh/(5600+Rntc)*Rntc; %Spannung bei ca. 100°C
    fprintf('Übertemperaturschutz:\n')
    fprintf('Wert für V-Ref = %d V\n',Uref)
    fprintf('Wert für V-OVT = %d V\n',Uov)
%%
%Filter - Strommessung - Stromrichter
%Hochpass wird nicht installiert!
    R1 = 1*10^6;       %Widerstand Hochpass in Ohm
    C1 = 680*10^-9;   %Kondensator Hochpass in F
    R2 = 1200;        %Widerstand Tiefpass in Ohm
    fg_h = 120*10^3;  %gewählte Grenzfrequenz vom Tiefpass in Hz
    C2 = 1.2*10^-9;%1/(2*pi*R2*fg_h) %berechneter Wert von C2 in F
    s = tf('s');
    Gh = R1/(R1+(1/(s*C1))); %Übertragungsfunktion Hochpass
    Gt = (1/(s*C2))/(R2+(1/(s*C2)));%Übertragungsfunktion Tiefpass
    G = Gh*Gt;        %Übertragungsfunktion gesamt
    %bode(G)
    fprintf('\nFilter - Strommessung:\n')
    fprintf('Hochpass R in kOhm: %d\n',R1*10^-3)
    fprintf('Hochpass C in nF: %d\n',C1*10^9)
    fprintf('Tiefpass R in kOhm: %d\n',R2*10^-3)
    fprintf('Tiefpass C in nF: %d\n',C2*10^9)
%Spannungsteiler Strommessung - ADC
    %Der verwendete ADC hat eine maximale Eingangsspannung von 3.6V, der
    %Spannungsteiler soll so dimensioniert werden das 3.3V den 5V vom LEM
    %Stromwandler entsprechen
    U1 = 5;           %Max. Spannung LEM-Wandler in V
    U2 = 3.3;        %Max. gemessene Eingangsspannung in V
    R1 = 130000;     %gewählter Vorwiderstand in Ohm
    syms R2
    R2 = round(solve((U1/(R1+R2))==U2/R2,R2));
    fprintf('Spannungsteiler - ADC:\n')
    fprintf('Wert für Spannungsteiler R2 = %d Ohm\n',R2)

    R2 = 261000; %gewählt nach Verfügbarkeit
    U2 = round((U1/(R1+R2)*R2),2)

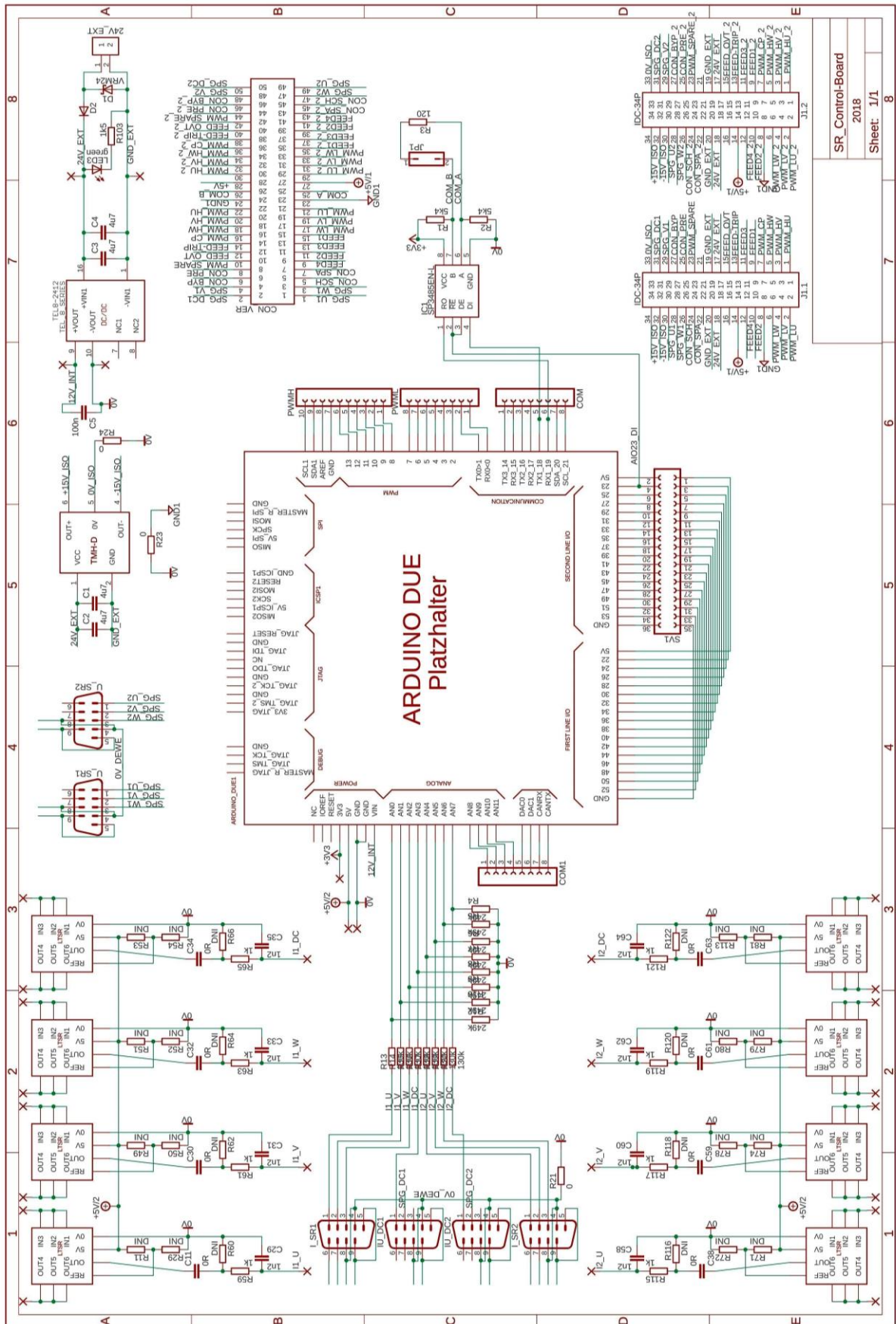
```

10.4 Schaltpläne

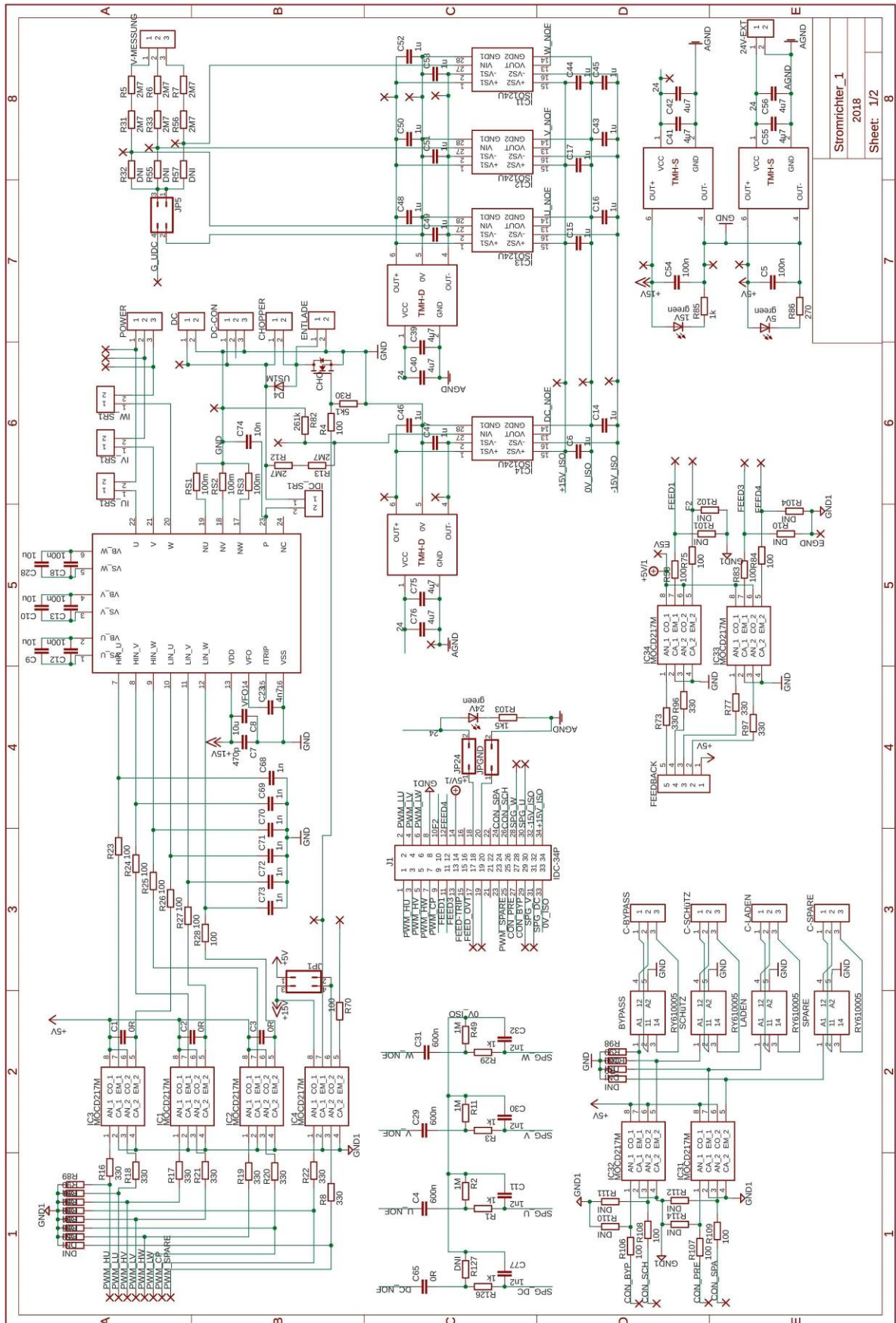
10.4.1 Verbindungsplatine



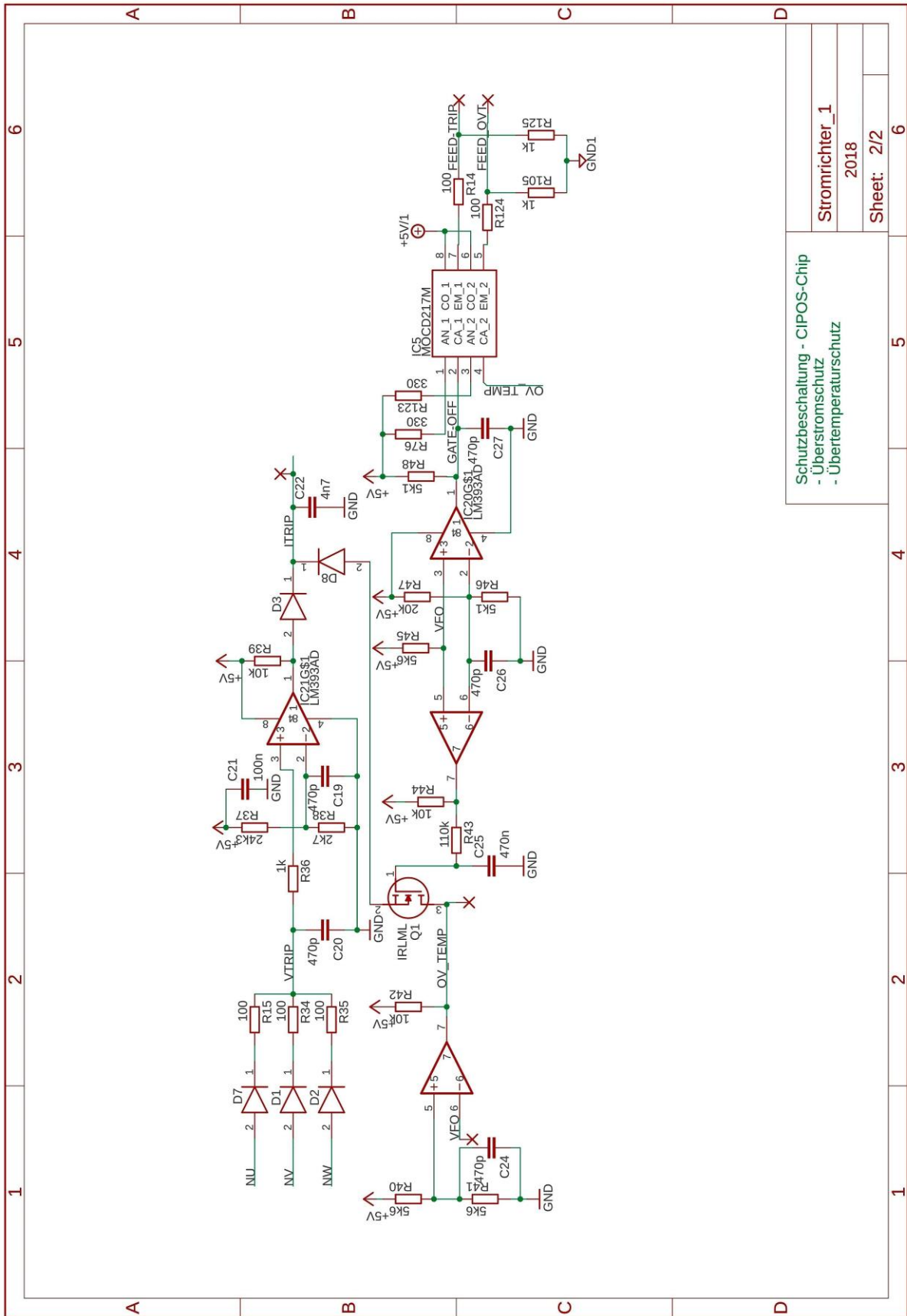
10.4.2 Kommunikationsplatine



10.4.3 Stromrichterplatte



Stromrichter_1
2018
Sheet: 1/2



| | |
|----------------|--|
| Stromrichter_1 | |
| 2018 | |
| Sheet: 2/2 | |

Schutzbeschaltung - CIPOS-Chip
- Überstromschutz
- Übertemperaturschutz

