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

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

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

D I P L O M A R B E I T

Modellierung eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks in SIMSEN

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung und Betreuung von

Univ. Prof. Dr. Wolfgang Gawlik
E370 – Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

eingereicht an der Technischen Universität Wien
bei der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Ademir Husanovic, Bakk
Matrikelnummer: 0527159
Tendlergasse 12/205
1090 Wien

Wien, März 2014

Danksagung

Die Diplomarbeit ist einer der letzten Schritte vor dem erfolgreichen Abschluss eines Studiums, das ich ohne Unterstützung bestimmter Personen nicht zu Ende bringen könnte. Deswegen möchte ich an dieser Stelle all jenen Menschen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik bedanken, der es mir ermöglicht hat, unter seiner Leitung und Betreuung diese Abschlussarbeit zu verfassen. Die zahlreichen Gespräche haben mir immer wertvolle Hinweise gegeben, die für das Weiterkommen sehr hilfreich waren. Außerdem bedanke ich mich bei DDI Dr. Robert Schürhuber für die freundliche und tatkräftige Unterstützung, die mich bei der Ausarbeitung der Diplomarbeit stets weitergeholfen hat.

Besonderes möchte ich meinen Eltern und meinem Bruder danken, die mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch unterstützt und mir den Rücken gestärkt haben. Ein großer und besonderer Dank gilt auch meiner Freundin, die mich während meiner Diplomarbeit und meines Studiums stets ermutigt hat.

Schließlich bedanke ich mich bei allen Freunden und Kollegen, die mir mein Studium viel leichter gemacht und es interessanter gestaltet haben.

Kurzfassung

Der steigende Ausbau erneuerbarer und fluktuierender Erzeugungsanlagen wie Wind- und PV-Anlagen im elektrischen Energiesystem bringt viele Herausforderungen mit sich. Um auch zukünftig einen stabilen Netzbetrieb gewährleisten zu können, ist es notwendig, entsprechende Maßnahmen rechtzeitig einzuleiten. Mit der Analyse derartiger Aufgaben beschäftigt sich das Projekt "GSG – Green Storage Grid", das ein Teil des COMET-Programms ist. GSG berücksichtigt dabei Klima, Umwelt, Wirtschaft sowie Ressourcen und entwickelt die dafür passenden Technologien, wie z. B. thermische, chemische und hydraulische Speicher, die in direkter Verbindung mit den Netzanforderungen betrachtet und mit fortschrittlichen Simulationsmethoden analysiert werden. Die flexiblen Einsatzmöglichkeiten der Pumpspeicherkraftwerke und die Einsatzstunden der Kraftwerke sind die wichtigen Anforderungen, die für zukünftige Entwicklungen optimiert werden sollten.

Die Diplomarbeit wurde als ein Teil des GSG-Projekts entwickelt, in der ein einfaches Modell eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks entworfen wird. Im Laufe der Projektentwicklung sollte das Modell zusammen mit einem hydraulischen und mit anderen elektrischen Systemen in Verbindung gebracht werden, um ausgewählte Szenarien zu simulieren und zu untersuchen. Für die Modellierung wird die Software SIMSEN verwendet, die eine Analyse der elektrischen und hydraulischen Komponenten in einer gemeinsamen Entwicklungsumgebung zur Verfügung stellt.

Im ersten Kapitel werden die Ziele und Herausforderungen der Diplomarbeit skizziert, im Anschluss wird der theoretische Hintergrund, der für die Diplomarbeit relevant ist, im Kapitel 2 erklärt. Da die Software SIMSEN für die Verwendung nicht üblich ist, wird ein Überblick über deren Hauptfunktionen im Kapitel 3 gegeben. Während der Diplomarbeit sind einige Möglichkeiten aufgetreten, mit denen die vorliegende Aufgabe gelöst werden könnte, diese haben jedoch ebenso Nachteile und Probleme mit sich gebracht. Die aufgetretenen Probleme werden anschließend im Kapitel 4 beschrieben. Die verfügbaren Lösungen der Aufgabe und die aufgetretene Problematik werden für die Entwicklung eines vereinfachten Modells genutzt, das mit einer Leistungsquelle realisiert wird. Die größte Herausforderung der Diplomarbeit stellt der Entwurf einer solchen Quelle in SIMSEN dar, weil sie als fertiges Element in der Software nicht verfügbar ist. Die Leistungsquelle, die den Generator bzw. Motor und die Umrichter ersetzt, wird als eine geregelte Spannungsquelle entworfen. Die Realisierung der Leistungsquelle und der Schnittstelle für das hydraulische System wird im Kapitel 5 beschrieben, in dem auch die Validierung des Modells durchgeführt wird. Abschließend werden die gewonnenen Ergebnisse resümiert und es wird ein Ausblick zu möglichen zukünftigen Weiterentwicklungen des Projekts gegeben.

Abstract

The increasing extension of renewable and fluctuating generation systems such as wind and PV systems in the electrical energy system brings along several challenges. In order to ensure stable network operation in the future , it is necessary to use the appropriate measures. The main assignment of the project " GSG - Green Storage Grid" , which is a part of the COMET program, is to analyze such tasks . GSG takes into account climate , environment, economy and resources and develops appropriate technologies, such as thermal, chemical and hydraulic storages , which also consider power requirements and which are going to be analyzed with advanced simulation techniques . The flexible application possibilities of pumped storage power plants and operation hours of the power plants are the important challenges that should be optimized in the future.

The master thesis has been developed as a part of the GSG- project , where a simple model of variable-speed pumped-storage power plant is to be designed. In the course of project development should the model be set in a connection with a hydraulic and other electrical systems to simulate some scenarios and investigate them. For modeling is used a software SIMSEN , which provides an analysis of the electrical and hydraulic components in a same development environment .

In the first chapter are the objectives and challenges of the master thesis briefly described after that is a theoretical background, which is relevant to the thesis , in the Chapter 2 explained. Since the software SIMSEN is not mainstream for use , an overview of the main functions is given in the chapter 3 . During the master thesis work some possibilities have occurred, with which the present task could be solved , but this has brought some unacceptable drawbacks and problems. Encountered problems are then in Chapter 4 described. The available solutions of the task and occurred problems are used for the development of simplified model, which is realized with a power source . The biggest challenge of the master thesis presents the design of such source in SIMSEN , because it is not available as a ready-made element in the software. The power source, which displaces the generator or the motor and inverters, is designed as a controlled voltage source. The realization of the power source and the interface for the hydraulic system is described in the section 5 , where the validation of the model is carried out . Finally, the summary of obtained results will be summarized and an outlook on possible developments for the future of the project will be given.

Inhaltverzeichnis

1. Einleitung 5

2. Das drehzahlvariable Pumpspeicherkraftwerk 6

2.1. Das Funktionsweise des drehzahlvariablen Asynchrongenerators 8

2.2. Vorteile des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerk 11

2.3. Stand der Technik 12

2.3.1. Synchronmotor/Generator mit lastgeführtem Wechselrichter LCI6/LCI12 12

2.3.2. Synchronmotor/Generator mit selbstgeführtem Wechselrichter SCI6 14

2.3.3. Asynchronmotor/Generator mit Direktumrichterkaskade 15

2.3.4. Asynchronmotor/Generator mit Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter 16

2.3.5. Asynchronmotor/Generator mit Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter 17

3. SIMSEN – Die Software für die Modellierung 19

4. Die Modelle und die begleitende Problematik 24

4.1. Das Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter 24

4.1.1. Das Regelungskonzept des Modells 25

4.1.2. Die Problematik des Modells 29

4.2. Das WT3-Modell 31

4.2.1. Das Regelungskonzept des Modells 32

4.2.2. Die Problematik des Modells 33

5. Das Modell mit der Leistungsquelle 38

5.1. Die mathematische Beschreibung des elektrischen Systems 39

5.2. Das Modell in SIMSEN 41

5.2.1. Der Reglerentwurf 45

5.2.2. Schnittstelle für das hydraulische System – Droop Regler 49

5.3. Validierung des Modells 52

6. Zusammenfassung und Ausblick 71

Literaturverzeichnis 74

Abbildungsverzeichnis 75

Tabellenverzeichnis 77

1. Einleitung

Die steigende Anzahl der erneuerbaren und fluktuierenden Erzeugungsanlagen bringt einige Anforderungen mit sich, um die Stabilität des Netzes zu gewährleisten. Das elektrische Energiesystem muss diese Anforderungen zukünftig durch die Verwendung, die Anpassung und einen eventuellen Ausbau der Speicherkapazitäten erfüllen, was flexible Einsatzmöglichkeiten und Einsatzstunden der Pumpspeicherkraftwerke und andere Kraftwerke erforderlich macht.

Auf diese Herausforderungen geht das Projekt GSG – "Green Storage Girds" ein, wobei mehrere Systeme verbunden werden, um die verschiedenen Ausgangsituationen zu analysieren. Der erste Schritt der Projektrealisierung ist die Modellbildung der entsprechenden Systeme, was mittels Software SIMSEN realisiert wird. Sie bietet die Möglichkeit, elektrische und hydraulische Systeme in einer gemeinsamen Entwicklungsumgebung zu modellieren und zu analysieren.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Modellierung eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks, das mit anderen Systemen verbunden sein könnte. Es gibt verschiedene Ausführungsmöglichkeiten, womit ein drehzahlvariables Pumpspeicherkraftwerk realisiert werden könnte. Alle Umsetzungen dieser Möglichkeiten bringen vielen Vor- aber auch einigen Nachteilen mit sich. Im ersten Schritt der Diplomarbeit wird der aktuelle Technologiestand der drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerke untersucht, um eine passende Realisierung auszuwählen, die am meisten Vorteile mit sich bringt und dem neuesten Stand der Technik entspricht.

Es wird versucht, die aufwendigen und komplexen Modelle solcher Anlagen zu vereinfachen, ohne dabei die brauchbaren Funktionen des Modells zu verlieren. Da das Modell mit anderen Systemen verbunden wird, sollten die entsprechenden Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Das realisierte System soll für verschiedene Leitungsparameter einsetzbar sein, weil einige Schwankungen der Parameter durch unterschiedliche Störungen oder Änderungen der Leitungslänge bewirkt sein könnten, vorauf das Modell resistent sein sollte. Die Festlegung der Integrationszeit ist vom hydraulischen System abhängig, weil es eine große Integrationszeit benötigt, um die plausiblen Simulationsergebnisse zu gewährleisten, was auch eine Herausforderung an die Modellbildung eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks stellt.

Schlussendlich wird das entworfene Modell durch die Simulation von verschiedenen Szenarien validiert, weil für die Verifikation des Modells keine geeigneten Messdaten vorliegen.

2. Das drehzahlvariable Pumpspeicherkraftwerk

Durch die Verwendung von Pumpspeicherkraftwerken (Abbildung 1) ist es möglich, die elektrische Energie in Zeiten der überschüssigen Stromerzeugung zu speichern. Dabei wird die elektrische Energie in die potenzielle Energie umgewandelt, indem das Wasser aus dem Unterbecken in das Oberbecken gepumpt und dort gelagert wird. In dem Fall arbeitet das Kraftwerk in dem Pump- bzw. Motorbetrieb und nutzt den überschüssigen Strom aus dem Netz, um die Pumpe anzutreiben. Die Rückgewinnung der elektrischen Energie erfolgt auf umgekehrtem Weg, indem das gelagerte Wasser aus dem Ober- in das Unterbecken fließt, sodass die Turbine und der Generator angetrieben werden. Die Pumpspeicherkraftwerke werden am häufigsten verwendet, um die Spitzenleistung bereitzustellen bzw. um das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch zu den kritischen Tageszeiten zu gewährleisten [1].

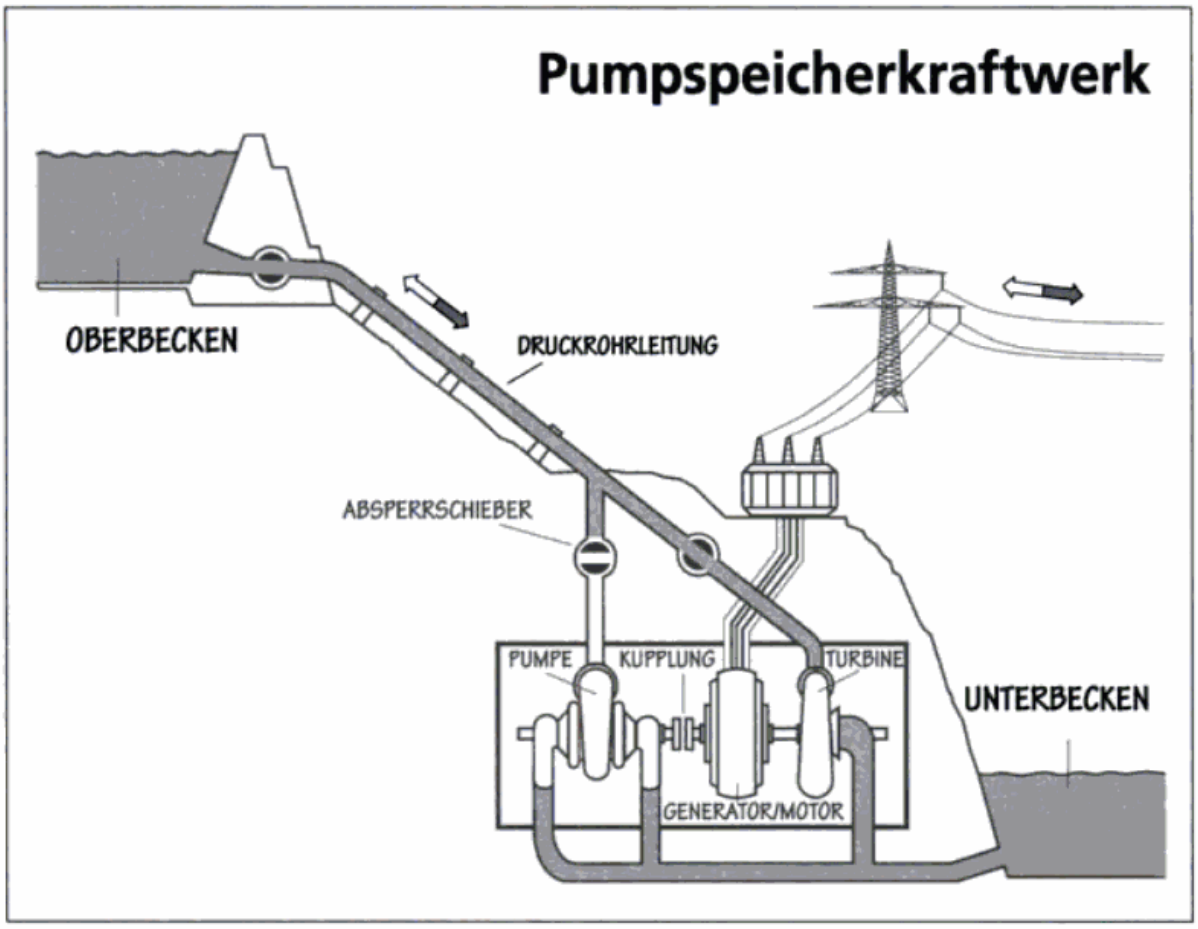

Abbildung 1: Übersicht zu einem Pumpspeicherkraftwerk [2]

Durch die spezielle Ausführung der Antriebe, die in den Pumpspeicherkraftwerken eingesetzt werden, ist es möglich, den Betrieb des Pumpspeicherkraftwerks mit der variablen Drehzahl zu realisieren. Dabei kann die Drehzahl variiert werden, ohne die

Frequenz oder die Spannung am Netzanschluss zu ändern. Für die Realisierung solcher Antriebe werden Synchron- oder Asynchronmaschinen verwendet, die in der Verbindung mit speziellen Umrichtern solchen Anforderungen entsprechen können.

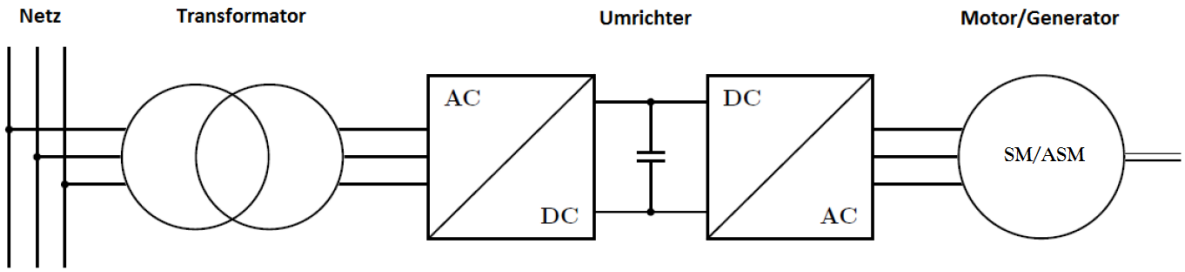

Abbildung 2: Synchron-/Asynchronmaschine mit der variablen Drehzahl [3]

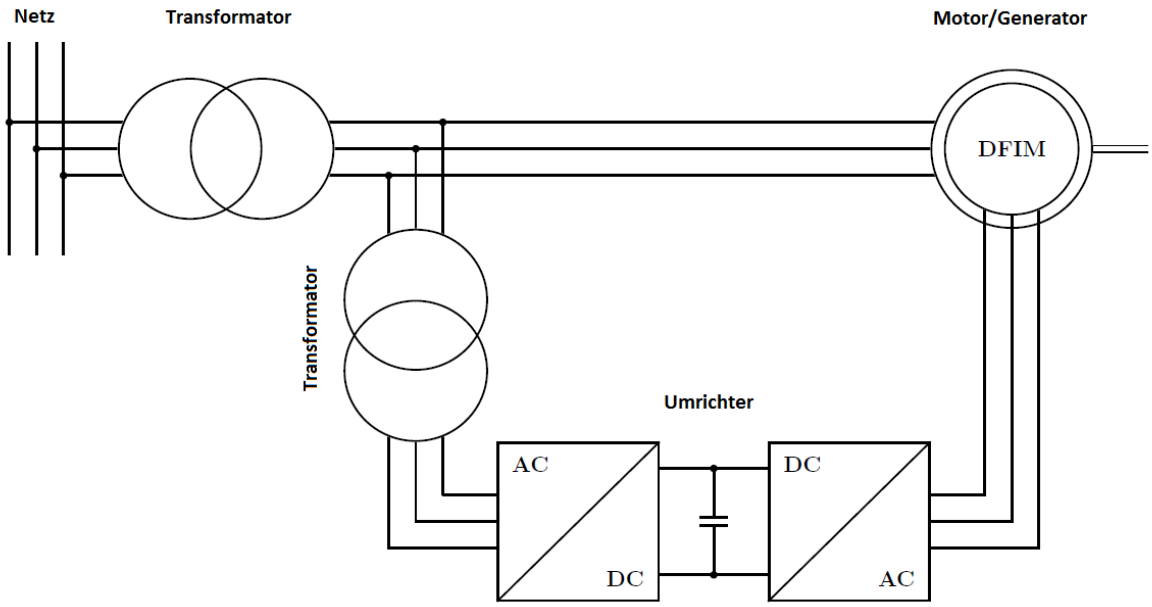

Abbildung 3: Doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit der variablen Drehzahl [3]

Für die beiden Ausführungen werden zwei Wechselrichter verwendet. Bei der Synchronmaschine werden die Wechselströme, die vom Generator erzeugt wurden, durch den Umrichter in die Gleichströme transformiert und danach wieder durch den zweiten Umrichter in die Wechselströme, die mit der Netzfrequenz synchron sind, zurücktransformiert. Dabei müssen die Umrichter so dimensioniert werden, dass sie in der Lage sind, 100 % der Maschinenleistung zu übertragen. Die Darstellung in Abbildung 2 ist auch auf die Asynchronmaschine anwendbar, jedoch wird die Synchronmaschine mit der Asynchronmaschine ersetzt.

Die Realisierung mit der doppelt gespeisten Asynchronmaschine ändert sich zum vorherigen Fall, weil die Einspeisung der Ströme über die Stator- und Rotorwindungen

erfolgt. Über die Rotorwindungen wird am häufigsten ca. 30 % der Leistung übertragen und dementsprechend müssen die Umrichter für diese Leistungsmenge dimensioniert werden. Aus diesen Gründen wird die doppelt gespeiste Asynchronmaschine häufiger als die Ausführung mit der drehzahlvariablen Synchron-/Asynchronmaschine eingesetzt.

2.1. Das Funktionsweise des drehzahlvariablen Asynchrongenerators

Um die Thematik der Diplomarbeit besser zu verstehen, wird in diesem Abschnitt kurz auf die Funktionsweise eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators (DFIG), der in drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerken eingesetzt wird, eingegangen.

Bei dem DFIG wird die mechanische Energie von der Generatorwelle in die elektrische Energie umgewandelt, die durch die Ströme über die Stator- und Rotorwicklungen in das Netz übertragen werden. Die Rotorwindungen sind, wie der Abbildung 3 entnommen werden kann, über die Schleifringe und Bürsten an zwei Wechselrichter angeschlossen. In Verbindung mit den Umrichtern ist es möglich, die Frequenz der Rotorströme f_{Rotor} einzustellen und dabei die Netzfrequenz f_{Netz} konstant zu halten.

Bei der Synchronmaschine, wo die Rotorwindungen an eine externe Gleichstromquelle angeschlossen sind, entsteht das magnetische Feld, das mit dem drehenden Rotor mitrotiert. Die Drehgeschwindigkeit des Feldes entspricht in diesem Fall der Drehgeschwindigkeit des Rotors n_{Rotor} . Als Ergebnis wird die Wechselspannung in die Statorwicklungen induziert, weil sich der magnetische Fluss durch die Wicklungen während der Drehung ändert. Der Zusammenhang zwischen Rotorgeschwindigkeit und Statorfrequenz ist in der Gleichung (2.1) dargestellt:

$$f_{Stator} = \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} \tag{2.1}$$

p stellt die Polpaarzahl und n_{Rotor} die Rotorgeschwindigkeit in U/min dar. Wenn in dem Fall die Rotorgeschwindigkeit gleich der Synchrongeschwindigkeit wäre, hätte die induzierte Spannung die gleiche Frequenz wie die Netzfrequenz $f_{Stator} = f_{Netz}$.

Ein ähnliches Prinzip liegt bei der Asynchronmaschine vor, jedoch ist das magnetische Feld nicht mehr stationär, sondern es rotiert mit der Geschwindigkeit $n_{\Phi,Rotor}$, die proportional zu der Frequenz des Stromes ist, der in die Rotorwindungen eingespeist wird. Daraus folgt, dass sich die Drehgeschwindigkeit des magnetischen Feldes an der Statorseite $n_{\Phi,Stator}$ aus der Rotordrehgeschwindigkeit n_{Rotor} und der Felddrehgeschwindigkeit $n_{\Phi,Rotor}$ zusammensetzt. Die Frequenz der induzierten Wechselspannung f_{Stator} ist dabei proportional zur Drehgeschwindigkeit $n_{\Phi,Stator}$.

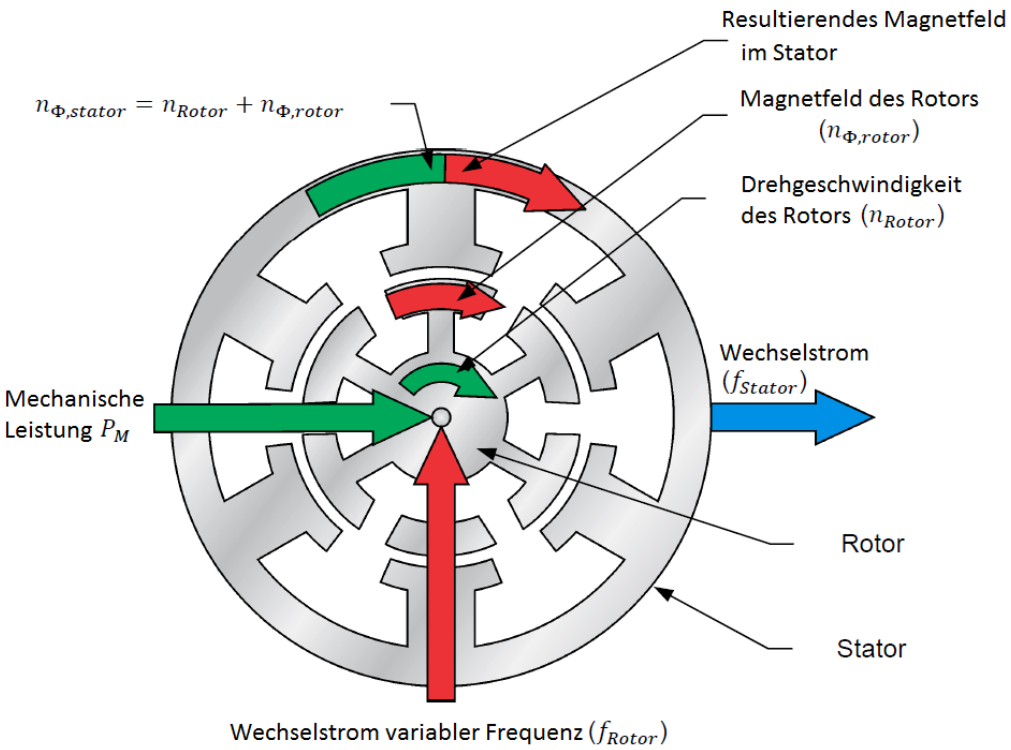

Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Rotordrehzahl und der Frequenz des rotierenden magnetischen Feldes in den Rotorwindungen, wenn diese gleichgesetzt sind [4]

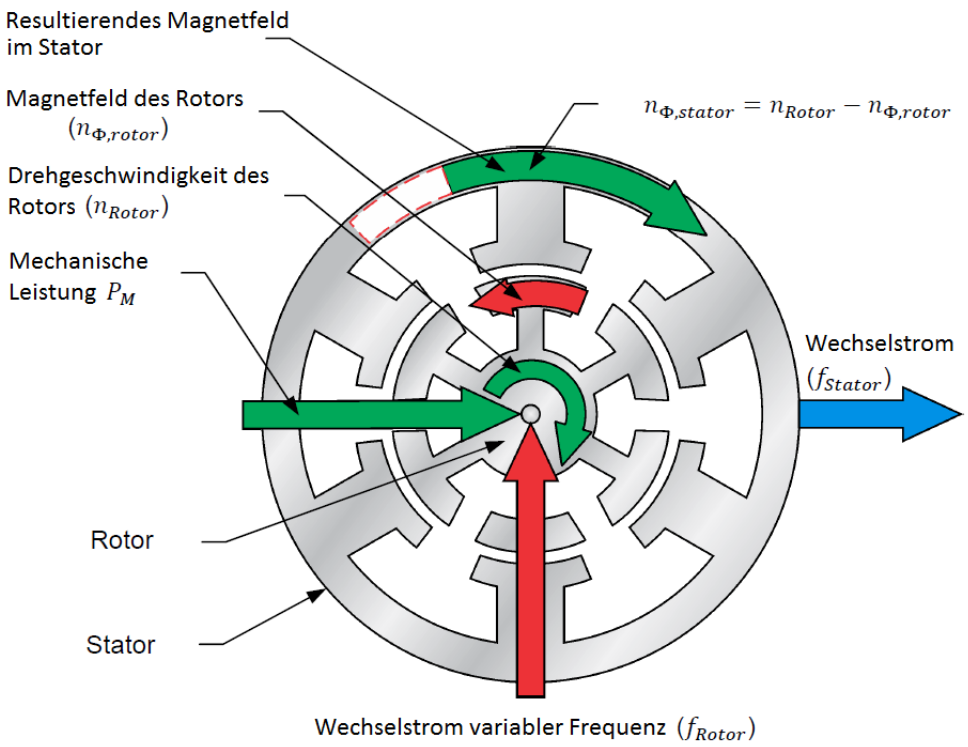

Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Rotordrehzahl und der Frequenz des rotierenden magnetischen Feldes in den Rotorwindungen, wenn diese entgegengesetzt sind [4]

Um die Frequenz der induzierten Spannung in den Statorwindungen f_{Stator} auszurechnen, ist es notwendig, zu beachten, ob die Drehgeschwindigkeit des Rotors und des magnetischen Feldes in den Rotorwicklungen richtungsmäßig gleich ist. Die Drehgeschwindigkeit des magnetischen Feldes in den Statorwindungen $n_{\Phi,Stator}$ ist die Summe der zwei Drehgeschwindigkeiten, wenn das magnetische Feld des Rotors und der Rotor selbst in die gleiche Richtung rotieren (Abbildung 4). Wenn sie sich in die entgegengesetzten Richtungen drehen, werden sie subtrahiert (Abbildung 5). Die Frequenz f_{Stator} wird nach der Gleichung (2.2), wenn die Richtungen gleich sind, bzw. nach der Gleichung (2.3), wenn die Richtungen entgegengesetzt sind, ausgerechnet. f_{Rotor} in den Gleichungen ist die Frequenz des Wechselstromes, der in die Rotorwindungen eingespeist wird.

$$f_{Stator} = \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} + f_{Rotor} \tag{2.2}$$

$$f_{Stator} = \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} - f_{Rotor} \tag{2.3}$$

Durch die ständige Regelung des Rotorstroms bzw. der Frequenz des Rotorstroms ist es möglich, den Generator mit der gewünschten Statorfequenz an das Netz anzuschließen. Die Regelung erfolgt über die zwei Wechselrichter, die mit den Rotorwindungen angeschlossen sind. Das bedeutet, dass die Drehzahlabweichung des Rotors von der Synchrondrehzahl durch die Anpassung der Frequenz des Rotorstromes f_{Rotor} kompensiert wird, wodurch die Drehgeschwindigkeit des durch die Statorwindungen durchflossenen magnetischen Feldes $n_{\Phi,Stator}$ konstant gehalten wird. Die einzustellende Frequenz ergibt sich aus der Gleichung (2.2) bzw. (2.3), wobei die konstante Netzfrequenz als Statorfrequenz zu wählen ist (2.4). Die Gleichung (2.5) stellt die Rotordrehzahl in Abhängigkeit von der Netz- und der Rotorfrequenz dar.

$$f_{Rotor} = f_{Netz} - \frac{n_{Rotor} \cdot p}{60} \tag{2.4}$$

$$n_{Rotor} = \frac{60}{p} \cdot (f_{Netz} - f_{Rotor}) \tag{2.5}$$

Nachfolgend soll ein DFIG mit einer Nenndrehzahl von 300 U/min und einer Polpaarzahl p = 10 betrachtet werden. Es wird die Annahme formuliert, dass die Rotordrehzahl auf 276 U/min sinkt. Um die Netzfrequenz in dem Fall auf 50 Hz konstant zu halten, ist es notwendig, einen Wechselstrom von 4 Hz in den Rotor einzuspeisen. Dabei ist die Drehrichtung des magnetischen Feldes $n_{\Phi,Rotor}$ entgegensetzt zur Drehrichtung des

Rotors n_{Rotor} . Falls die Rotordrehzahl über die Nenndrehzahl steigt, z. B. auf 324 U/min, dann muss der Rotorstrom mit 4 Hz über die Umrichter in das Netz eingespeist werden. Dabei dreht sich das magnetische Feld in die gleiche Richtung wie der Rotor selbst.

Die Verwendung des doppelt gespeisten Asynchrongenerators ermöglicht es auch, die induzierte Statorspannung einzustellen. Um die Statorspannung auf den Wert der Netzspannung konstant zu halten, muss ein bestimmter magnetischer Fluss durch die Statorwindungen beibehalten werden. Das ist möglich, wenn die Amplitude und die Frequenz der in die Rotorwindungen eingespeisten Spannung proportional sind, d. h., dass das Verhältnis U/f konstant ist.

2.2. Vorteile des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerk

In diesem Kapitel werden die Vorteile des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks dargelegt. Wie im Kapitel 2.1. steht, finden die Synchron- und Asynchronmaschinen ihren Einsatz in solchen Kraftwerken und bieten ähnliche Vorteile [3][4]:

- Betrieb mit der variablen Drehzahl des Rotors, wobei die Frequenz und die Amplitude der Statorspannungen konstant bleiben;
- Erhöhung des Wirkungsgrades und ein breiterer Betriebsbereich für den Generator- und den Pumpbetrieb;
- Möglichkeit, die Wirkleistung im Pumpbetrieb zu regulieren;
- Möglichkeit der aktiven Einspeisung der Blindleistung (Blindleistungskompensation);
- verbesserte Netzstabilität durch die getrennte Regelung der Blind- und der Wirkleistung;
- höhere Dynamik des Leistungsverhaltens für eine bessere Stabilität;
- einstellbarer Leistungsfaktor;
- unter einigen Voraussetzungen ist der Anlauf der Maschine ohne zusätzliche Komponenten möglich.

Neben den oben aufgelisteten Vorteilen müssen auch einige Nachteile Erwähnung finden, die im Vergleich zu den Vorteilen jedoch sehr gering sind. Solche Generator-/Motorantriebe sind nur in Verbindung mit den komplexen Umrichtern ausführbar, die eine aufwendige Regelstruktur benötigen. Der doppelt gespeiste Asynchrongenerator ist mit einem speziellen Schleifenring ausgestattet, der bei einem Asynchrongenerator mit Käfigläufer nicht nötig ist.

Die gleichen Vorteile gelten für den drehzahlvariablen Synchron-/Asynchrongenerator sowie für den doppelt gespeisten Asynchrongenerator. Die Umrichter sind aber bei der Ausführung mit dem Synchron-/Asynchrongenerator für die gesamte Leistung der Maschine dimensioniert, d. h., sie müssen in der Lage sein, die gesamte Leistung der Maschine zu übertragen. Die Umrichter bei den doppelt gespeisten

Asynchrongeneratoren müssen nur für einen Teil der Maschinenleistung entworfen werden.

2.3. Stand der Technik

Das drehzahlvariable Pumpspeicherkraftwerk ist durch den Einsatz von speziell ausgeführten Synchron- oder Asynchronmaschinen realisierbar. Die Maschine wird zusammen mit den verschiedenen Umrichtern in das Kraftwerk eingebaut.

Die erste Gruppe der Einheiten ist die drehzahlvariable Synchronmaschine, bei der die Rotorwindungen an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen sind. Der Generator bzw. Motor ist über einen Stufentransformator mit dem Netz verbunden. Die Verbindung zwischen dem Transformator und dem Stator erfolgt über zwei Umrichter. Für das Pumpspeicherkraftwerk, in dem die Synchronmaschine eingebaut wird, werden lastgeführte Wechselrichter (LCI) und selbstgeführte Wechselrichter (SCI) eingesetzt.

Die zweite Gruppe der Generatoren/Motoren besteht aus Einheiten, die mit der doppelt gespeisten Asynchronmaschine ausgeführt werden. In diesem Fall sind die Rotorwindungen an eine frequenzvariable Spannungsquelle angeschlossen, die über einen Frequenzumrichter oder einen Wechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis (VSI) realisierbar ist. Für den Aufbau der Umrichter können die normalen Thyristoren, GTO-Thyristoren oder IGCT-Thyristoren genutzt werden [5].

Im Folgenden werden einige Realisierungen des drehvariablen Pumpspeicherkraftwerks mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen vorgestellt [5].

2.3.1. Synchronmotor/Generator mit lastgeführtem Wechselrichter LCI6/LCI12

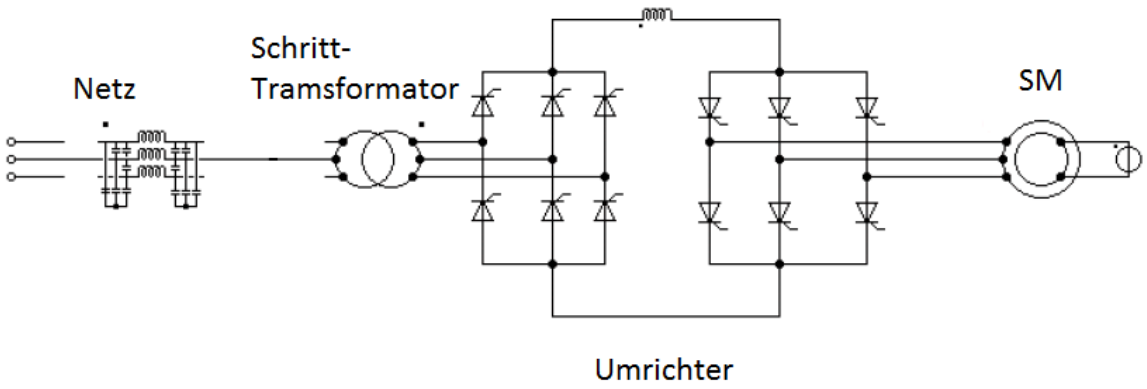

Abbildung 6: Synchronmotor/Generator mit LCI6-Umrichter [5]

Die Realisierung von Synchronmotor/Generator mit einem lastgeführten Wechselrichter ist in der Abbildung 6 dargestellt. In diesem Fall wurden die normalen Thyristoren ohne Ausschaltmöglichkeit eingesetzt.

Die Vorteile des Synchronmotors/Generators mit einem lastgeführten Wechselrichter sind:

- einfache Umrichter-Technologie mit geringer Anzahl an Komponenten;
- Verwendung der normalen Thyristoren, einfache Regelung, direkter Einfluss auf die Zündung der Thyristoren;
- verwendbar für den Anlauf des Synchrongenerators.

Die Nachteile des Synchronmotors/Generators mit lastgeführtem Wechselrichter lauten:

- Der Wechselrichter muss für die gesamte Maschine/Generatorscheinleistung dimensioniert werden;
- hohe gesamte harmonische Verzerrung (THD) an der Stator-/Netzseite, weswegen die zusätzlichen Filter nötig sind;
- der Blindleistungsfluss zwischen dem Motor/Generator und dem Netz kann nicht reguliert werden;
- der Motor/Generator muss den Blindleistungsbedarf von dem maschinenseitigen Wechselrichter liefern, wodurch der Scheinleistungsbedarf steigt.

Einige Nachteile können durch die Erweiterung des LCI6-Wechselrichters auf LCI12-Wechselrichter (Abbildung 7) kompensiert werden, was aber ebenso einige Nachteile mit sich bringt. Dadurch wird die Anzahl der Harmonischen reduziert, aber die Kosten und die Verluste steigen, weil 12 statt sechs Thyristoren für jede Seite nötig sind. Es muss auch ein 3x3 Transformator und/oder zusätzliche Statorwindungen eingebaut werden.

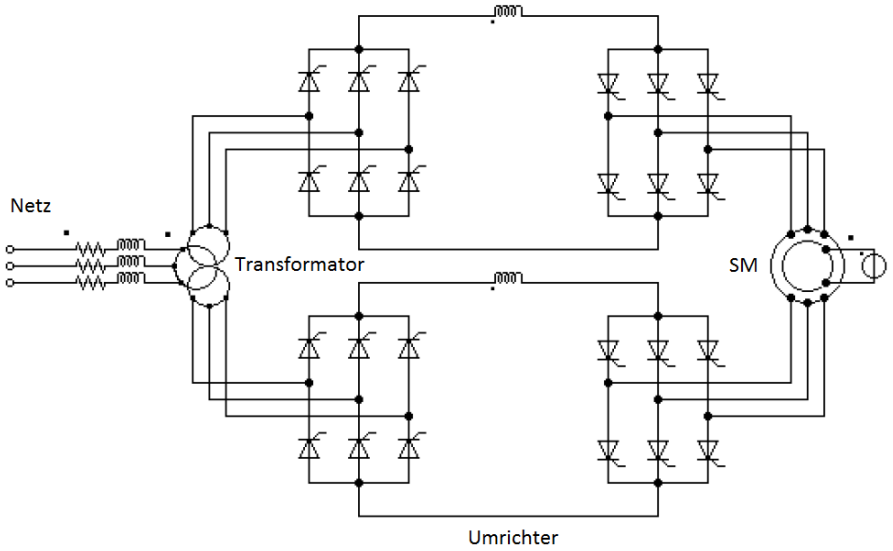

Abbildung 7: Synchronmotor/Generator mit LCI12-Umrichter [6]

2.3.2. Synchronmotor/Generator mit selbstgeführtem Wechselrichter SCI6

Der Synchronmotor/Generator mit selbstgeführtem Wechselrichter (Abbildung 8) verwendet die IGCT-Thyristoren für die sechs Ventile. Die IGCT-Thyristoren können im Gegensatz zu den normalen Thyristoren bei LCI6/LCI12 ausgeschaltet werden und es kann die Pulse Width Modulation (PWM) mit bis zur 1,5 kHz Trägersignalfrequenz realisiert werden. Durch eine passende Regelung ist es besser möglich, sinusförmige Ströme/Spannungen an der Transformatorseite als bei LCI6/LCI12 zu erzeugen.

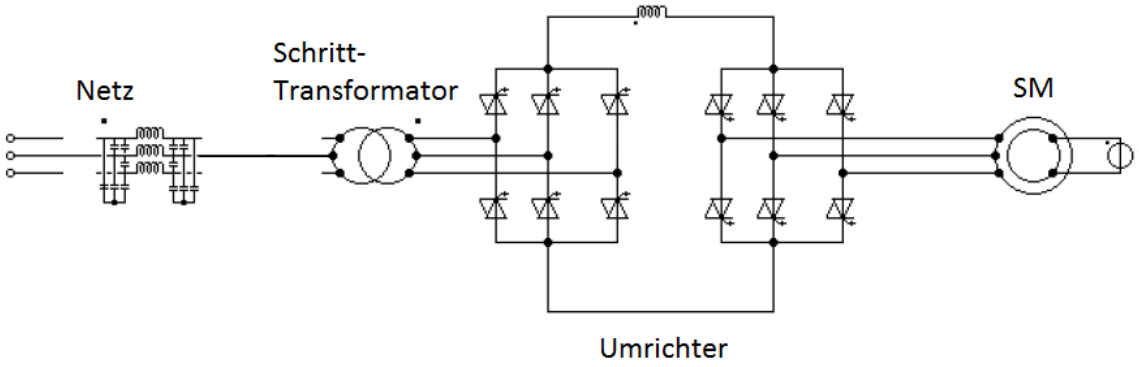

Abbildung 8: Synchronmotor/Generator mit SCI6-Umrichter [5]

Die Vorteile des Synchronmotors/Generators mit selbstgeführtem Wechselrichter SCI6 sind:

- niedrigere gesamte harmonische Verzerrung der Spannung (THD_U);
- Regelung des Blindleistungsflusses zwischen dem Wechselrichter und dem Netz;
- niedrigere Kommutierungsverluste im Vergleich zu LCI;
- einsetzbar für den gesamten Mittelspannungsbereich, minimale Anzahl der Elemente für die gegebene Leistung.

Die Nachteile des Synchronmotors/Generators mit selbstgeführtem Wechselrichter SCI6 sind:

- der Wechselrichter muss für die gesamte Maschinen-/Generatorscheinleistung dimensioniert werden;
- komplexe Regelungsstruktur für die Zündkreise für die IGCT im Vergleich zu LCI;
- höhere Kosten der IGCT-Thyristoren im Vergleich zu den normalen Thyristoren.

2.3.3. Asynchronmotor/Generator mit Direktumrichterkaskade

Diese Technologie entspricht nicht dem neuesten Stand der Technik, wird aber noch immer in einigen Pumpspeicherkraftwerken eingebaut oder für den Einbau vorgesehen. Die Ventile in den Umrichtern werden mit den normalen Thyristoren realisiert.

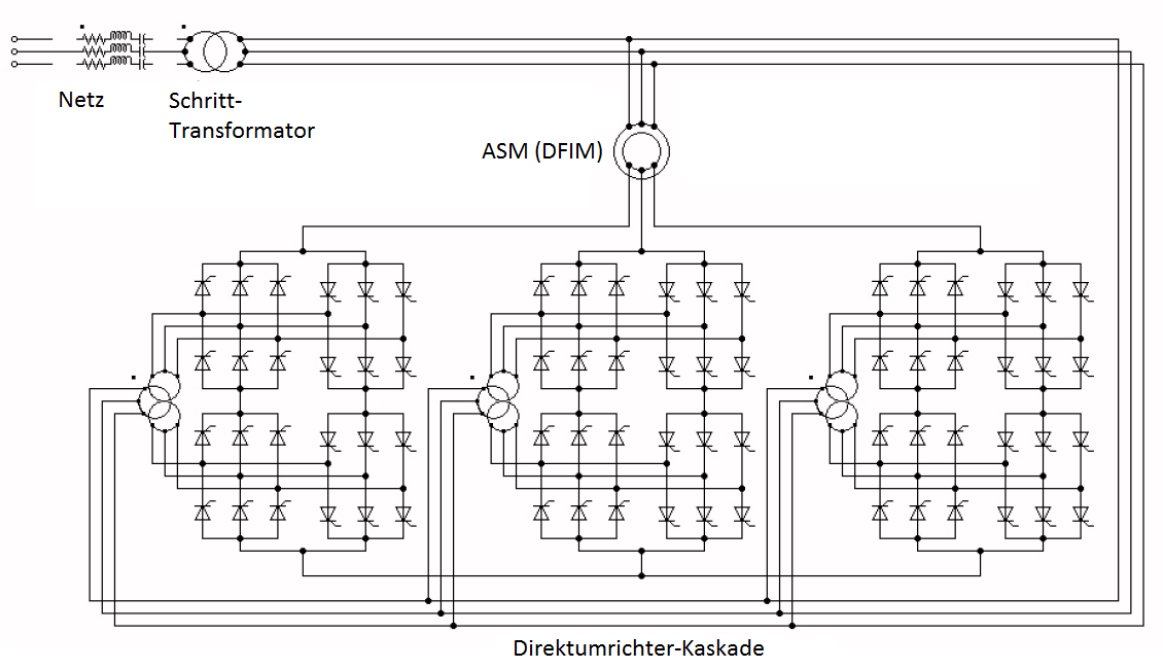

Abbildung 9: Asynchronmotor/Generator mit der Direktumrichterkaskade [5]

Die Vorteile des Asynchronmotors/Generator mit Direktumrichterkaskade sind:

- Regelung des Wirk- und Blindleistungsflusses zwischen der Einheit und dem Netz;
- niedrigere gesamte harmonische Verzerrung (THD) an der Netzseite;
- die Umrichter sind nur für einen Teil der gesamten Scheinleistung der Maschine zu dimensionieren.

Die Nachteile des Asynchronmotors/Generator mit Direktumrichterkaskade sind:

- es sind drei zusätzlichen Hilfstransformatoren einzubauen;
- komplexe Regelungsstruktur, Bestimmung und Ansteuerung des Zündungswinkels für 72 Thyristoren;
- hohe Anzahl an Elementen, wodurch die Ausfallwahrscheinlichkeit der Elemente steigt;
- zusätzliche Filter im Rotorkreis könnten nötig sein;
- für den Anlaufmechanismus müssen zusätzliche Elemente eingebaut werden;
- die 11te und 13te Harmonische werden ins Netz eingespeist.

2.3.4. Asynchronmotor/Generator mit Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter

Der Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter bietet mehrere Vorteile im Vergleich zu der Variante mit Direktumrichterkaskade, was durch die Verwendung der IGCT-Thyristoren für höhere Leistung ermöglicht wird. Der Einsatz der IGCT-Thyristoren reduziert die Kommutierungsverluste und bietet die Gelegenheit, die Pulse Width Modulation (PWM) mit über 1 kHz Trägerfrequenz zu realisieren. Solche Möglichkeiten führen zur Reduktion der höheren Harmonischen im Rotor und im Netz. Mit dem Umrichter kann keine Gleichspannung in den Rotor eingespeist werden und deswegen stellt sich ein Totzeitbereich um die Synchrongeschwindigkeit ein.

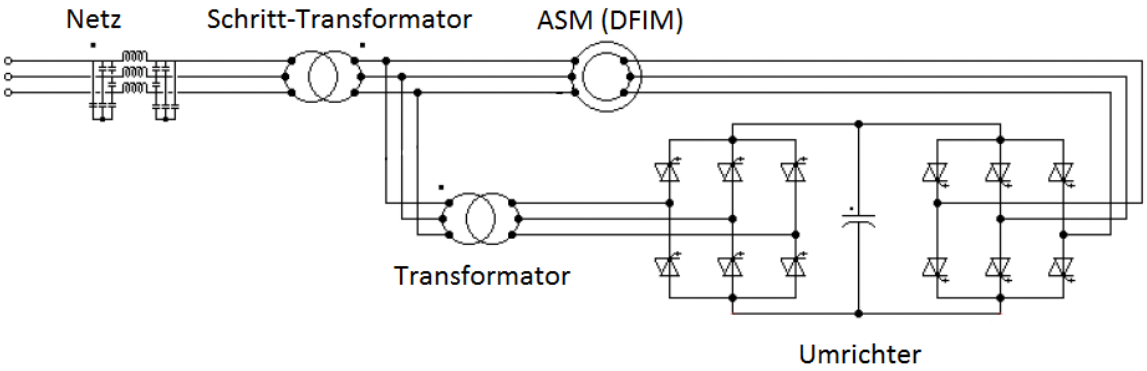

Abbildung 10: Asynchronmotor/Generator mit Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [5]

Die Vorteile des Asynchronmotors/Generators mit Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter sind:

- die Umrichter sind nur für einen Teil der gesamten Scheinleistung der Maschine zu dimensionieren;
- Regelung des Wirk- und des Blindleistungsflusses zwischen der Einheit und dem Netz;
- entkoppelte Regelungsstruktur für den transformatorseitigen und maschinenseitigen Umrichter;
- niedrige Anzahl an Elementen und modularer Aufbau durch einfache PWM-Entwürfe;
- es sind keine zusätzlichen Elemente für den Anlauf im Pumpbetrieb nötig;
- es ist nur ein Hilfstransformator nötig.

Die Nachteile des Asynchronmotors/Generators mit Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter sind:

- es ist eine Mehrgrößenregelung für die beiden Umrichter nötig, um die d- und die q-Komponente zu entkoppeln;
- hohe THD_I, wobei die dominante Harmonische im Netz von der PWM-Trägerfrequenz abhängig ist;
- es sind zusätzliche Filter im Rotorkreis nötig;
- Totzeitbereich um die Synchrongeschwindigkeit (ca. +/- 2 %).

2.3.5. Asynchronmotor/Generator mit Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter

Der Einsatz des Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichters mit den Neutralleiterklemmen (Abbildung 11) kompensiert einige Nachteile des Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichters.

Die Weiterentwicklung bei dieser Technologie ergibt sich durch die verbesserte Quantisierung der Rotorspannungen, wofür in diesem Fall drei Stufen (0, U/2, U) verfügbar sind. Dadurch sind glatterer Sinusverläufe der Rotorspannung realisierbar (Abbildung 12). Auch das Problem mit dem Totzeitband, das bei der Verwendung des Zwei-Punkt-Umrichters auftritt, wird durch diese Technologie gelöst. Neben den Vorteilen der Zwei-Punkt-Umrichter ist in diesem Fall die THD_I reduziert und die zusätzlichen Filter für den Rotorkreis sind kleiner.

Aus der Abbildung 11 wird deutlich, dass für eine solche Realisierung im Gegensatz zu der vorherigen Realisierung zusätzliche Elemente eingesetzt werden müssen, wodurch die Kosten steigen. Auch ein Mehrgrößenregler muss realisiert werden, um die Entkopplung zwischen d- und q-Komponente zu gewährleisten.

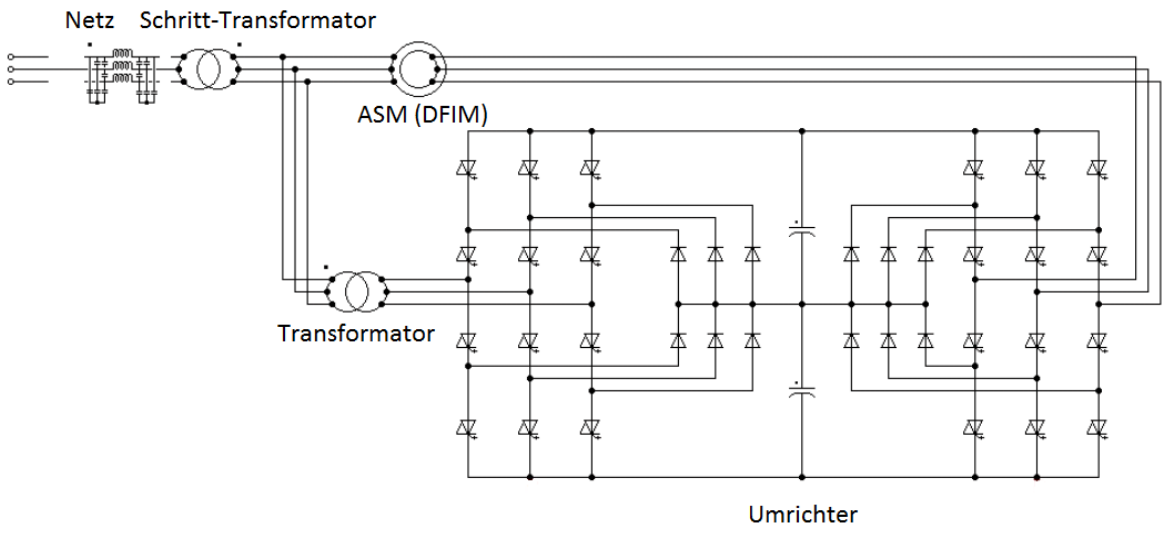

Abbildung 11: Asynchronmotor/Generator mit Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [5]

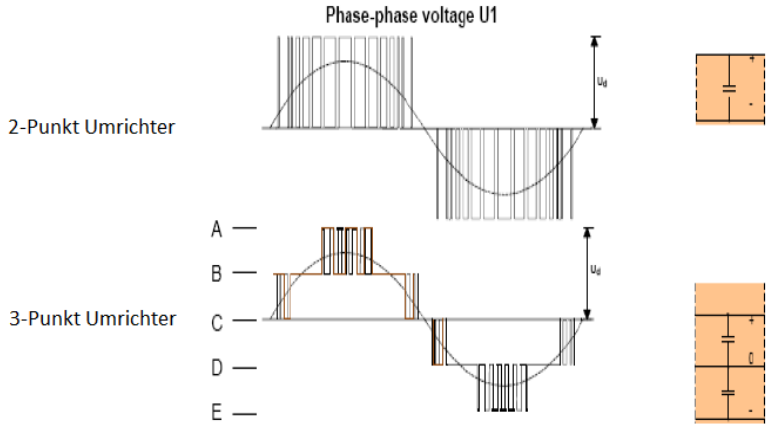

Abbildung 12: Vergleich zwischen Zwei- und Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [5]

3. SIMSEN – Die Software für die Modellierung

"*M*odular *SI*mulation software for the analysis of *EN*ergy conversion *S*ystems" (SIMSEN) ist eine Software, mit der die Modellierung und die Analyse der elektrischen und hydraulischen Systeme in einer gemeinsamen Entwicklungsumgebung möglich sind. Die gezielten Einsatzgebiete der Software sind die elektrischen Netze, die drehzahlvariablen Einheiten und die hydraulischen Systeme. Die Modellierung erfolgt in einem grafischen Interface (Abbildung 13) unter Einsatz von verfügbaren Elementen, die auch grafisch eingegeben werden. Mit der Software ist es möglich, die komplexen Systeme im stationären oder dynamischen Betrieb zu simulieren und zu analysieren.

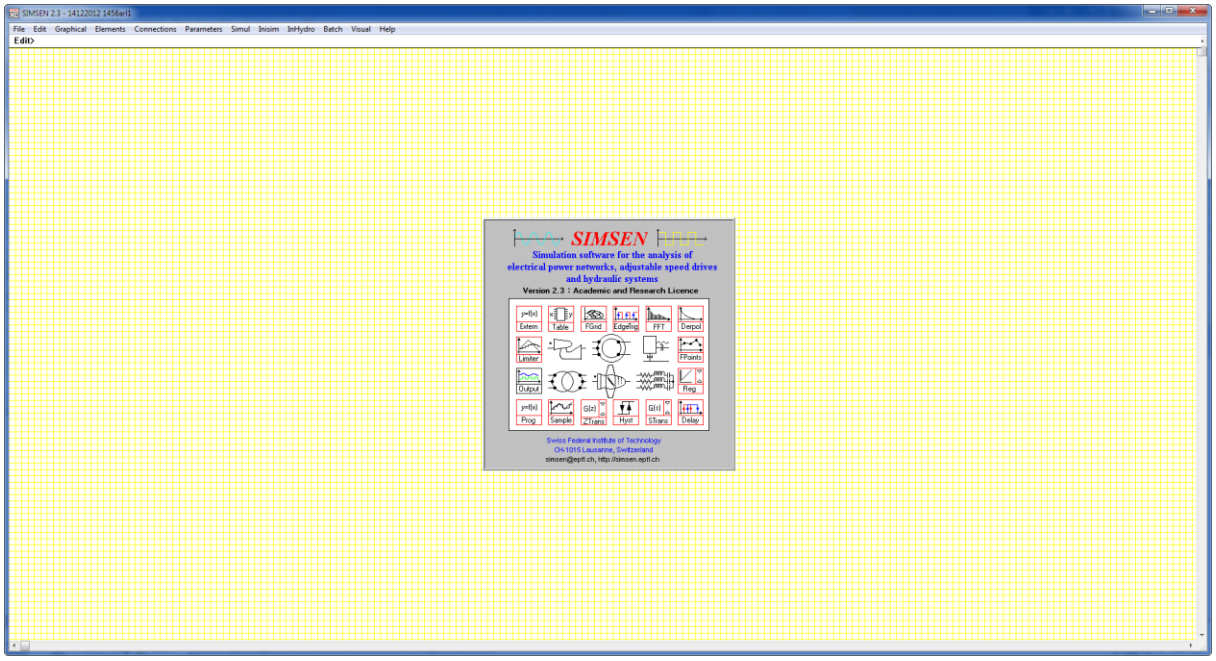

Abbildung 13: SIMSEN – Die Entwicklungsumgebung

Alle verfügbaren Elemente können aus dem Menü "*Elements*" ausgewählt und eingesetzt werden. Die implementierten elektrischen Elemente müssen mit dem "*Wire*" verbunden werden, um das System simulieren zu können. Die Verbindung erfolgt ebenfalls grafisch, wodurch die Übersicht des Systems verbessert wird. Die Verknüpfung mehrerer Elemente wird über die Knoten unter Verwendung von "*Crossing*" realisiert. Diese Optionen befinden sich im Menü "*Connections*".

Nachdem die elektrischen Elemente eingesetzt wurden, müssen sie auch mit den relevanten Parametern definiert werden (Abbildung 14). Unter "*Name*" kann das Element beschriftet werden, wobei es wichtig ist, dass die Elemente unterschiedlich benannt werden, um die Simulation durchführen zu können. Mit "*Writing*" ist es möglich, einzustellen, ob die Ergebnisse für die grafische Darstellung in SI-Einheiten oder in p.u.-

Werten gespeichert werden. Die bezogenen Werte werden in Abhängigkeit zu den Nenndaten ("*Rated Values*") ausgerechnet. Mit der Option "*Initial Conditions*" können die Anfangswerte vor der Simulation eingegeben werden, um einen bestimmten Arbeitspunkt zu analysieren.

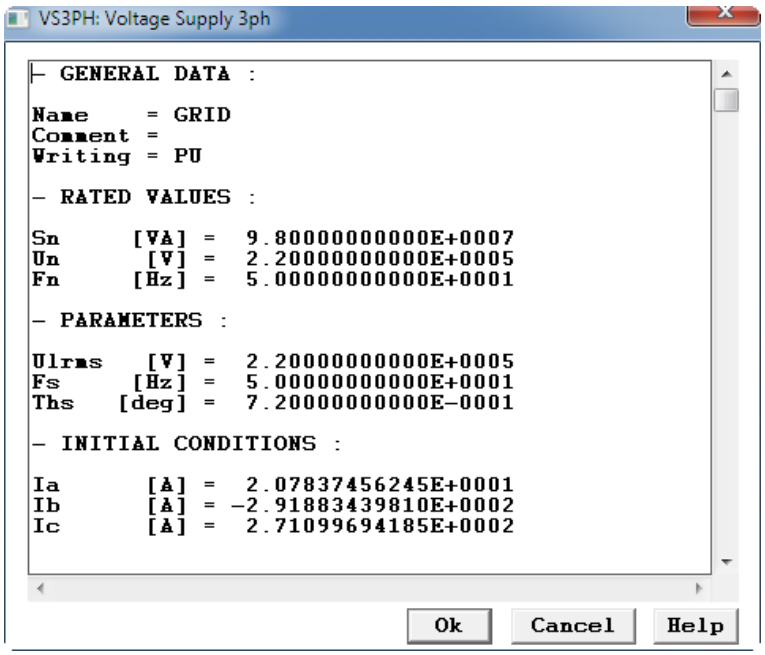

Abbildung 14: SIMSEN – Parametrisierung der Elemente

Die verschiedenen Funktionen, Regler und nicht-elektrischen Elemente werden anders verbunden. Die Verknüpfung mit den anderen Objekten wird über "*References X*" und "*References Y*" realisiert. In "*References X*" werden die Daten aus den anderen Elementen eingelesen und unter der Variable x_i gespeichert, die beim Einlesen auch modifiziert werden können (Abbildung 15). In Abhängigkeit von der Reihe und der Abfolge setzt sich die Variable x_i zusammen:

$$x_i = Parameter \cdot Koeffizient1 + Koeffizient2$$

Schreibt man z. B. in die erste Reihe "$Netz\ Ulrms\ 1\ 2$", wird der Effektivwert der Netzspannung mit 1 multipliziert und mit 2 addiert, was unter x_1 gespeichert wird.

In einigen Elementen ist es möglich, die gespeicherten Daten im Teil "*Data*" für die weitere Berechnung und Bearbeitung zu verwenden, wobei die Ergebnisse in die Variable y gespeichert werden. Für die Speicherung der verarbeitenden Daten stehen 20 y-Variablen zur Verfügung.

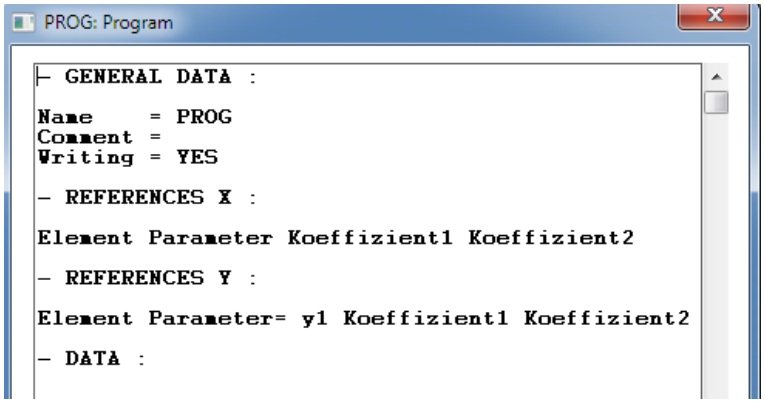

Abbildung 15: SIMSEN – Elementenverbindung

Mit "*References Y*" werden die Daten aus dem entsprechenden Element an die anderen übergeben. Geschrieben werden das Element und die Parameter, an dem die Daten übergeben werden, und nach dem Gleichheitszeichen gibt man die Daten ein, die zu übergeben sind (Abbildung 15). Dabei wird unter dem Parameter des Elements ein Wert gespeichert, der sich aus y, $Koeffizient1$ und $Koefizzient2$ zusammensetzt:

$$Element\ Parameter = y_k \cdot Koeffizient1 + Koeffizient2$$

Bei dem Element "*Regulator*" ist die Übergabe ähnlich wie in der Abbildung 15 gestaltet, wobei das Gleichheitszeichen wegfällt. Sollten die Daten aus dem Element in einem Diagramm abgebildet werden, wird "*Writing*" auf "*YES*" gesetzt. Um die Simulationsdauer zu beschleunigen, können die Daten nur gespeichert und nicht dargestellt werden, hierzu setzt man "*Writing=NO*" ein.

Die Verbindung bei solchen Elementen erfolgt nur innerhalb von Elementen und nicht mit der Option "*Wire*", wodurch die Übersicht des Systems reduziert ist. Um das zu verbessern, stehen einige grafische Elemente (Linie, Kreis, Pfeile usw.) zur Verfügung.

Alle Elemente können auch im Simulationsfenster (Abbildung 16) parametrisiert werden. In dem Teil "*Constant Data*" können die verschiedenen Werte eingegeben und ausgerechnet werden, die eventuell über die Teile "Parameters" und "*Initial Conditions*" an die gezielten Elemente weiter übergeben können, wodurch die Parameter und die Anfangswerte der Elemente am Anfang der Simulation festgelegt werden. Soll ein Parameter über das Simulationsfenster definiert sein, wird Folgendes geschrieben:

$$Element.Parameter = Wert$$

Der Wert kann direkt als eine Zahl oder als eine Variable aus "*Constant Data*" eingegeben werden. Die Variablen aus "*Constant Data*" können auch in jedem Element aufgegriffen und verwendet werden. Wenn die Anfangswerte der Elemente mit "*Initial Conditions*" über das Simulationsfenster definiert werden, dann muss "*Initial conditions from = M*"

eingesetzt werden. Steht E statt M, so werden die Anfangswerte aus den Elementen eingelesen und eingestellt.

Wenn die Störung aktiviert ist ("*Disturbances activated = YES*"), können die Parameter der Elemente über "*Disturbances*" während der Simulation geändert werden.

Im Fenster sind zudem Parameter für den Simulationsablauf einzustellen. Mit "*Time min*" und "*Time max*" werden der Anfang und das Ende der Simulation definiert. Die Integrationszeit wird mit "*Integration step*" eingestellt. Sofern die Integrationszeit sehr klein ist, wird auch die Simulation langsam sein, wobei jedoch die Ergebnisse präziser sein werden. Es bietet sich auch die Option, auszuwählen, ob alle Simulationsschritte oder nur einige (z. B. alle 10 Schritte) gespeichert werden sollen, wodurch die Simulationsgeschwindigkeit beeinflusst wird.

Für die Ergebnisberechnung stehen drei Integrationsalgorithmen zur Verfügung. Es kann zwischen Runge-Kutta 45 (RK45), Runge-Kutta 23 (RK23) und EULER ausgewählt werden.

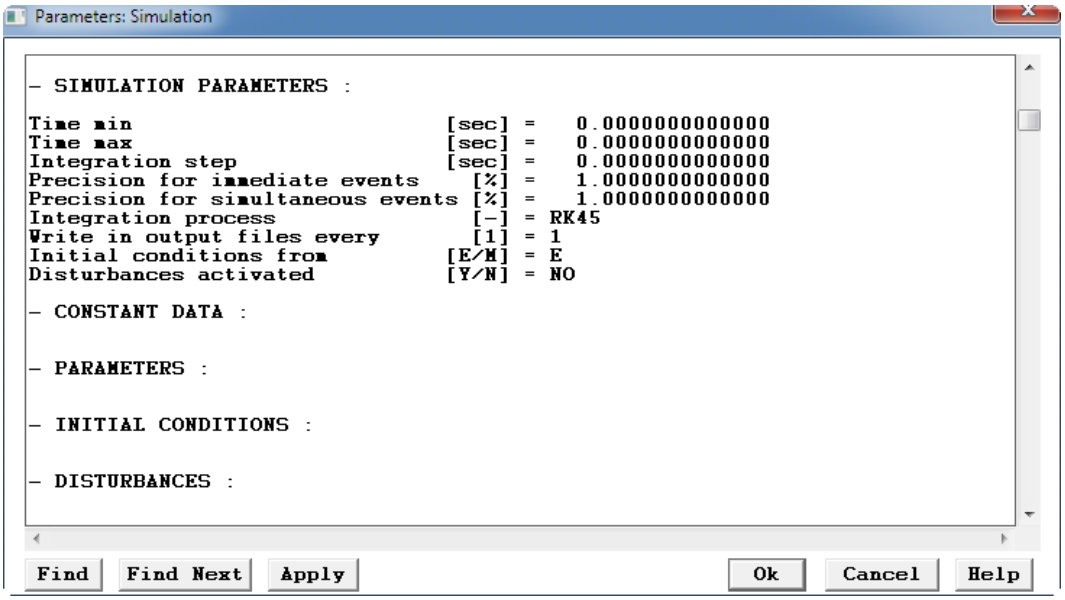

Abbildung 16: SIMSEN – Simulationsparameter

Nachdem die Simulationsparameter eingestellt und alle Elemente richtig verbunden sind, kann die Durchführung der Simulation erfolgen. Die Simulationsergebnisse können in einem XY-Diagramm abgebildet werden. Es gibt die Möglichkeit, die Ergebnisse über die Zeit oder über die anderen Größen darzustellen. Das Programm ermöglicht es auch, die Diagramme grafisch zu bearbeiten, um eine bessere Übersicht der Ergebnisse zu erhalten.

Die Ergebnisse der Simulation können danach ebenso bearbeitet werden. Die Verwendung der Fast-Fourier-Transformation an den Simulationsergebnissen bietet eine Postprocessing-Analyse, wo z. B. die Harmonischen untersucht werden können.

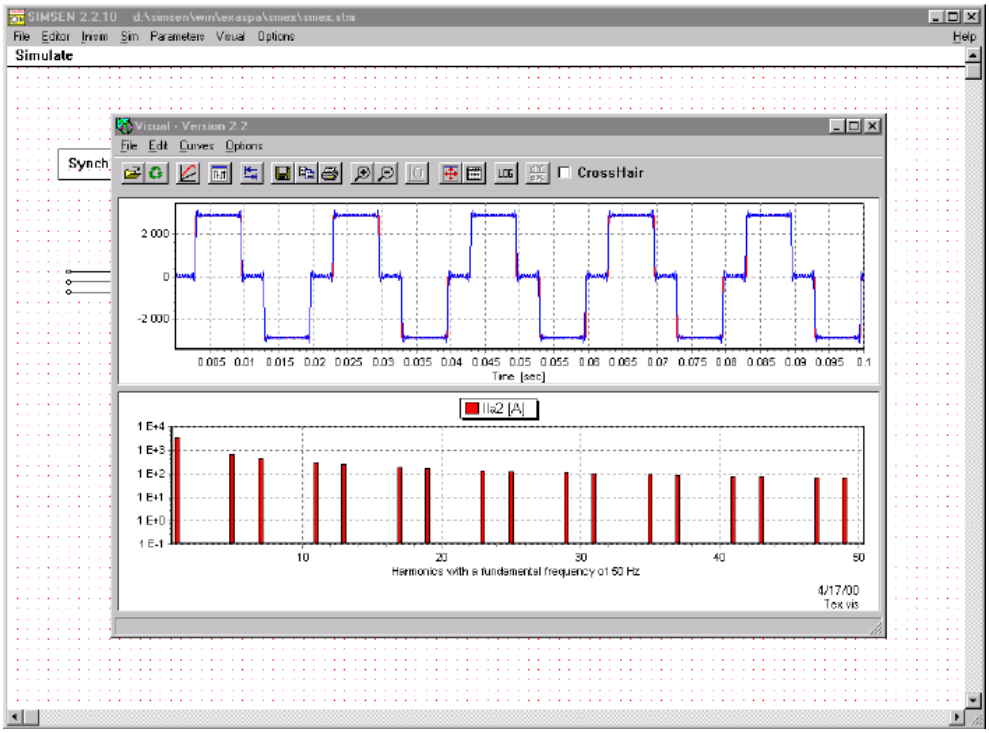

Abbildung 17: SIMSEN – Post-Processing-Analyse

Ein weiterer Vorteil von SIMSEN ist das Unterprogramm INSIMI, das entwickelt wurde, um die Anfangswerte der Elemente vor der Simulation ausrechnen zu können. Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit von der aufgestellten Wirk- oder Blindleistung, womit die Lastflussberechnung ermöglicht wird. Als nachteilig zeigt sich, dass die Anfangswerte nur für die elektrischen Elemente und nicht für die Regler ausgerechnet werden können.

Im SIMSEN stehen viele Elemente zur Verfügung, die durch die unterschiedlichen und einzigartigen Funktionen und Einstellungen charakterisiert sind. Die für die Diplomarbeit eingesetzten Elemente werden im Verlauf der Arbeit näher erklärt.

4. Die Modelle und die begleitende Problematik

Der Modellentwurf des variablen Pumpspeicherkraftwerks brachte währen der Realisierung einige Probleme mit sich, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Ausgehend von dem Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter sind weitere vereinfachte Modelle entwickelt geworden.

4.1. Das Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter

Der Asynchronmotor/-Generator mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter wurde im Kapitel 2.3.5. mit seinen Vor- und Nachteilen dargestellt. Da er viele Vorteile vereint und dem aktuellen Stand der Technik entspricht, wurde versucht, ein solches Modell in SIMSEN zu entwerfen. SIMSEN bietet viele Möglichkeiten bei der Modellierung von elektrischen, aber auch hydraulischen Systemen. Viele elektrische Elemente sind in der Software vorhanden und müssen nicht einzeln modelliert werden.

Das Modell aus der Abbildung 18 stellt eine Möglichkeit nach [7] dar, wie das System realisiert werden könnte. Es besteht aus zwei Teilen, die ständig geregelt werden müssen, um plausible Ergebnisse zu erreichen.

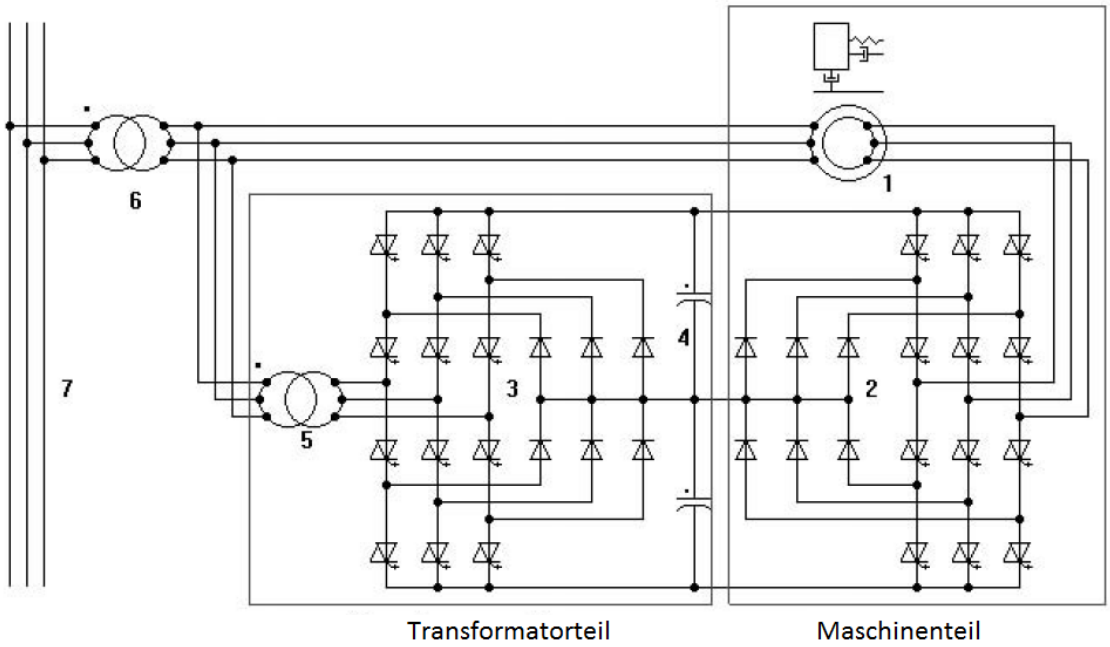

Abbildung 18: Das Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter in SIMSEN [7]

Der linke Teil aus der Abbildung 18 ist der sogenannte Transformatorteil. Er besteht aus dem Hilfstransformator (5 in der Abbildung 18), dem Umrichter (3 in der Abbildung 18) und Zwischenkreiskondensatoren (4 aus der Abbildung 18). Die elektrischen Elemente müssen in SIMSEN miteinander verbunden und parametrisiert werden, um die Simulation starten zu können. Oberhalb der Asynchronmaschine befindet sich die Schnittstelle zu dem hydraulischen System. Sie wird mit der rotierenden Masse, die mit der Maschine verbunden ist, realisiert.

Der Transformatorteil dient in diesem Fall für den Transport der Blindleistung zwischen dem Netz und den Rotorwindungen, wobei die Zwischenkreisspannung unabhängig von der Wirkleistung konstant sein muss. Einfluss auf die entsprechenden Größen erfolgt über die richtige Ventilsteuerung des Umrichters. In Abhängigkeit davon setzten sich die passenden Transformatorströme an die Primärseite des Transformators.

Der zweite Teil des Systems ist der Maschinenteil, wo der Umrichter (2 in der Abbildung 18) mit den Rotorwindungen der Asynchronmaschine (1 in der Abbildung 18) angeschlossen ist. Die Aufgabe des Maschinenteils besteht in der Regelung der Asynchronmaschine im Motor- und Generatorbetrieb. Wenn die Maschine im Pumpenbetrieb läuft, werden die Blindleistung und die Drehzahl geregelt. Im Generatorbetrieb wird die Drehzahlregelung durch die Wirkleistungsregelung ersetzt. Diese Größen werden durch die Rotorströme geregelt, wobei sie durch die passende Ventilsteuerung beeinflusst werden.

4.1.1. Das Regelungskonzept des Modells

Wie bereits erwähnt wurde, setzt sich das gesamte System aus zwei Teilen zusammen. Dementsprechend ist ein komplexes Regelungskonzept erforderlich, um die Ventile der beiden Umrichter ordnungsgemäß zu steuern und die gewünschten Werte einzustellen. Das Konzept besteht auch aus zwei Teilen: dem Regelungskonzept für die Transformatorseite und für die Maschinenseite. Zuerst ist es notwendig, die Strangströme in die d- und q-Komponente mit der richtigen Koordinatentransformation umzuwandeln, weil die Regelungen der Kondensatorspannung, der Drehzahl und der Wirkleistung über die d-Komponente des Stromes und die Regelung der Blindleistung über die q-Komponente des Stromes beeinflusst werden.

In der Abbildung 19 ist das Konzept für die Transformatorseite dargestellt. In diesem Teil wird die Kondensatorspannung mit der d-Komponente und die Blindleistung wird mit der q-Komponente des Stromes geregelt. Das bedeutet, dass der Ausgang des Kondensatorspannungsreglers (I_{d_soll}) die Führungsgröße des Stromreglers ist. Dies gilt auch für den Blindleistungsregler (I_{q_soll} als die Führungsgröße des Stromreglers).

Der Stromregler muss in diesem Fall als ein Mehrgrößenregler ausgeführt werden, um die d- und die q-Komponente des Stromes zu entkoppeln. Er liefert die Spannungen (d-

und q-Komponente), die in die Drehspannungen mit der inversen Park-Transformation umgewandelt und an den Umrichter übergeben werden. Ein Steuerungskonzept der Ventile muss auch implementiert werden, weil in SIMSEN kein Drei-Punkt-Umrichter vorhanden ist, bei dem die Zündung der Ventile automatisch erfolgt.

Eine große Herausforderung des Regelungskonzepts in diesem Teil ist es, die Kondensatorspannung konstant zu halten bzw. dass die zwei Kondensatorspannungen gleich und symmetrisch sind, sodass dabei keine Oszillationen zwischen den Kondensatoren auftreten. Die Kondensatoroszillationen sind immer anwesend und umgekehrt proportional zur Kondensatorgroße und vom Arbeitspunkt abhängig. Der unsymmetrische Gleichanteil wird oft durch die transienten Belastungsschritte, die Transienten und die gradzahligen Harmonischen in den Leitungswechselspannungen, die Ungenauigkeiten und Asymmetrien der Umschaltung verursacht. Bei den Einheiten mit der niedrigen Leistung werden diese Erscheinungen selbst kompensiert. Für die größeren Leistungen ist es notwendig, zusätzlichen Filter einzubauen. Für die Lösung der Oszillationen zwischen den Kondensatoren bieten sich unter anderem Notch-, Chebyshev-, Butterworth-Filter oder ähnliche und aufwendige Filter an.

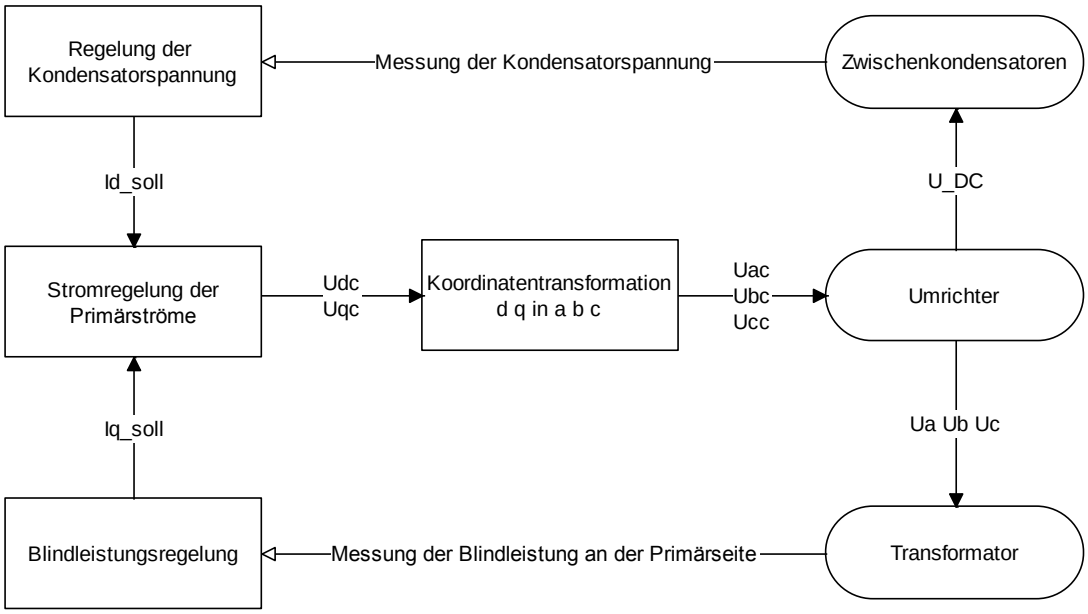

Abbildung 19: Regelungskonzept des Transformatorteils nach [8]

Die Aufgaben der Regelung des Maschinenteils (Abbildung 20) und die Komponenten, über denen die Regelung erfolgt, wurden am Anfang des Kapitels erwähnt. Die Stromregelung muss nicht über einen Mehrgrößenregler ausgeführt werden, weil die Kopplung zwischen d- und q-Komponente nicht so stark ausgeprägt ist, aber es müssen die Stator- und die Rotorströme in Aussicht genommen werden. Zuerst müssen sie in die entsprechenden Komponenten (d- und q-Komponente) transformiert werden, wobei die

Informationen über den Drehwinkel, der für die Transformation verwendet wird, erforderlich sind. Es bieten sich einige komplexe Verfahren (PLL – Phase-Locked Loop) an, mit denen es möglich ist, den Winkel richtig und präzise zu bestimmen. Da die beiden Ströme (Stator- und Rotorstrom) in die Regelung eingesetzt werden, erfolgt auch die Verwendung verschiedener Bezugssysteme für die Winkelberechnung.

Analog zum Transformatorteil werden die d- und q-Komponente der Spannungen, die aus dem Rotorstromregler folgen, in die Drehspannungen mit der inversen Park-Transformation umgewandelt. Die Rücktransformation der Spannungen erfolgt mit dem gleichen Drehwinkel, der durch die komplexen Verfahren bestimmt wird. Das gleiche Prinzip der Ventilsteuerung kann auch für das Maschinenteil eingesetzt werden, wodurch die passenden Rotorströme aufgestellt werden.

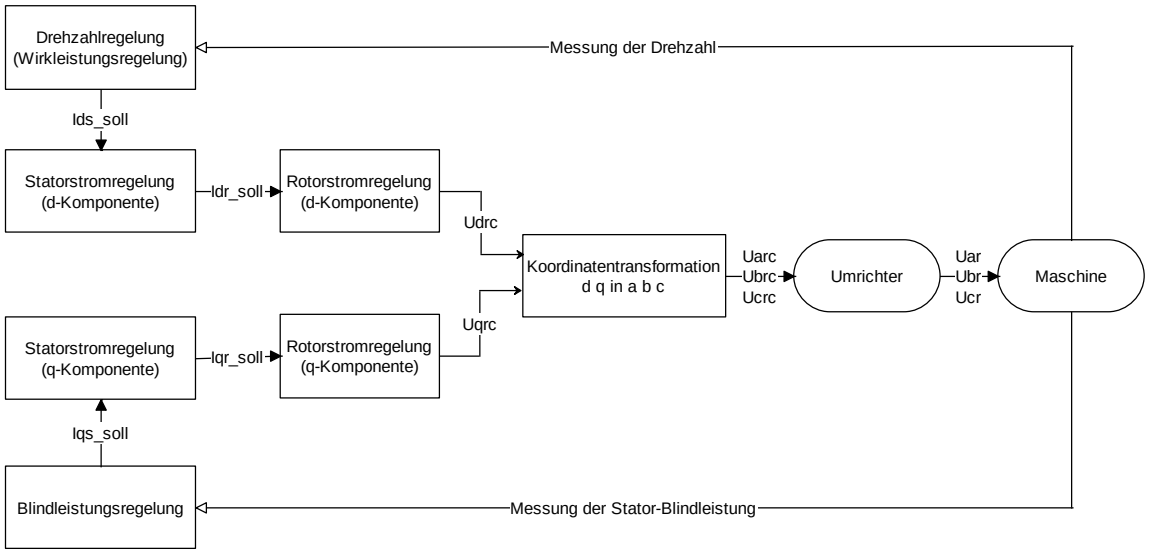

Abbildung 20: Regelungskonzept des Maschinenteils nach [8]

In der Abbildung 21 ist die ganze Realisierung der Regelung für das Modell dargestellt, wobei ein Schwerpunkt auf den oben erwähnten Teilen liegt, um eine bessere Übersicht zu bekommen, wo die bestimmte Teile eingesetzt wurden. Der Block 10 liefert die Informationen über den Statordrehwinkel, der für die Park-Transformation der Transformatorprimärströme verwendet wird. Daraus gewonnene Resultate werden auch für die Berechnung des Rotordrehwinkels benutzt. Der Mehrgrößenregler (Blöcke 2, 3, 4 und 5) wird durch den Einsatz der P- und der PI-Regler realisiert. Da die Zündung der Ventile nicht automatisch erfolgt, werden sie mit der gewünschten Trägerfrequenz in Abhängigkeit von den rücktransformierten Spannungen gesteuert (links: Blöcke 16, 7, 8 und 9; rechts: Blöcke 7, 8, 9 und 10). Die Problematik mit den Oszillationen zwischen den Kondensatoren wurde durch die Blöcke 13 und 14 gelöst. [7]

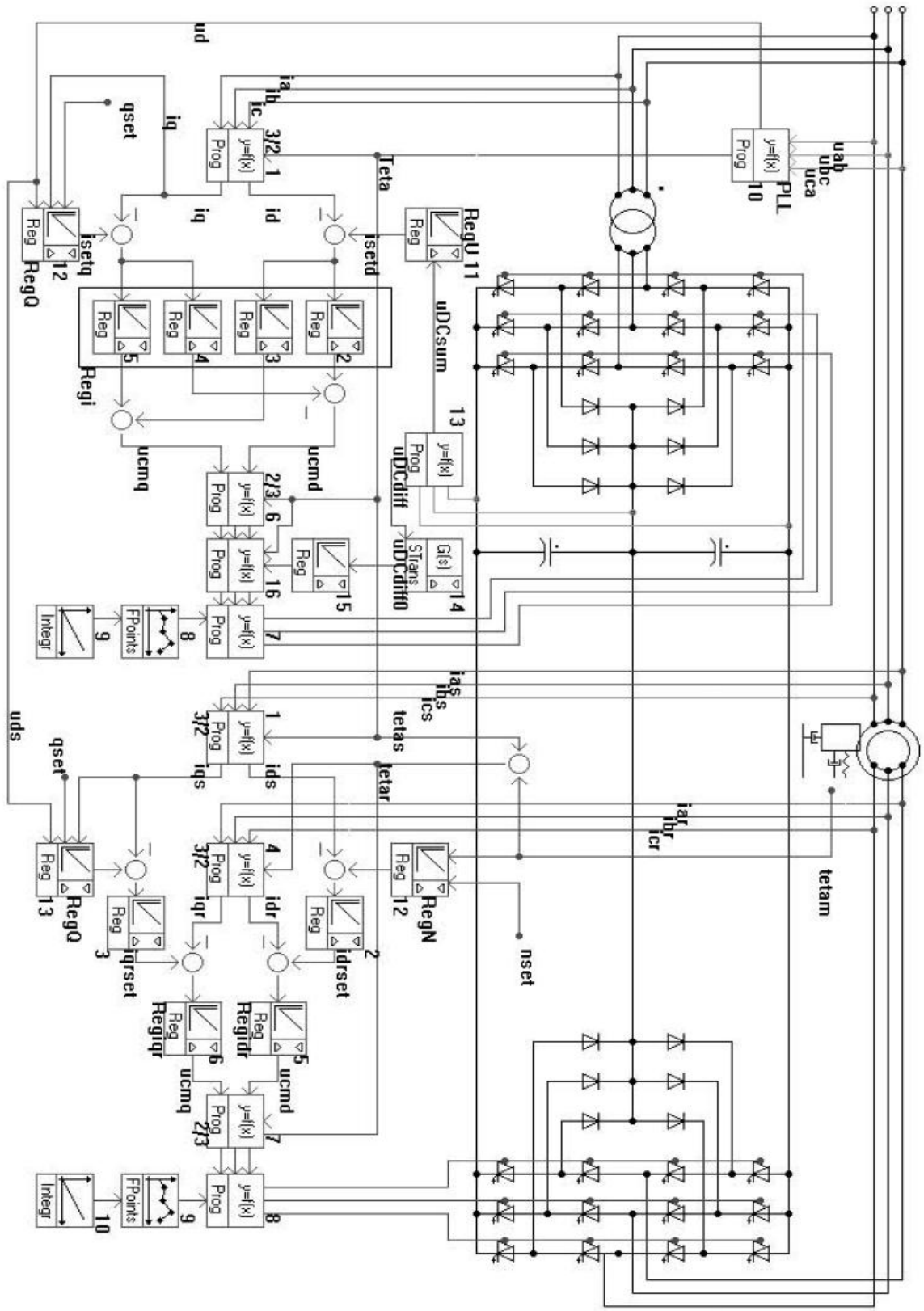

Abbildung 21: Das Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [7]

4.1.2. Die Problematik des Modells

Die Realisierung des Modells des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichters hat einige unerwünschte und komplexe Anforderungen, die in kurzer Zeit und ohne notwendige Nenndaten schwer lösbar wären.

Die erste Aufgabe ist die Größentransformation aus dem Dreiphasensystem in die Raumzeigerdarstellung, was durch die Implementierung von aufwendigen Verfahren ausführbar ist. Solche Verfahren fordern vergleichsweise kleine Integrationszeiten, wodurch die Simulationsdauer verlängert wird. Damit das Modell mit dem hydraulischen Modell verbunden wird, soll die Simulationsdauer jedoch so klein wie möglich sein.

Die Regelung des Modells besteht aus zwei Kaskadenreglern, die für die Regulierung der zwei Seiten verwendet werden. Um eine solche Regelung erfolgreich zu realisieren, müssen sechs Regler für jede Kaskade entworfen werden. Die Bestimmung der Parameter für die Regler sowie der Filterentwurf für die Zwischenkreiskondensatoren setzen einen großen Aufwand voraus, was die Rahmen der Diplomarbeit überschreitet.

Zusätzlich zur vorher erwähnten Problematik schließt sich die Zündung der Ventile der Umrichter an. Es ist wichtig, ein präzises und richtiges Verfahren zu entwerfen, womit die Zündung der Ventile reibungslos erfolgt. Im Fall des Modells des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichters sind es insgesamt 24 Thyristoren, die manuell gesteuert werden müssen. Die Verwendung der elektrischen Halbleiter in SIMSEN erhöht die Simulationszeit und der Einsatz von 36 solchen Elementen führt zu einer unannehmbar langen Simulationsdauer.

Die Simulationsdauer kann durch den Einsatz des pseudo-kontinuierlichen Modells (Abbildung 22) um den Faktor 60 beschleunigt werden. Dabei werden die Umrichter durch die gesteuerten Spannungsquellen ersetzt, wodurch der Zwischenkreisspannungsregler und der Filter für die Oszillationen zwischen den Kondensatoren ausfallen, weil die Kondensatoren auch durch die gesteuerten Quellen ersetzt werden [9].

Weitere Vorteile dieser Vereinfachung sind bei der Steuerung der Zündung der Ventile sichtbar. Da sie im Modell nicht präsent sind, wird die PWM-Modulation durch die folgende Übertragungsfunktion (4.1) realisiert:

$$G_{(s)} = \frac{U_{DC}/2}{1 + s \cdot T_E/3} \tag{4.1}$$

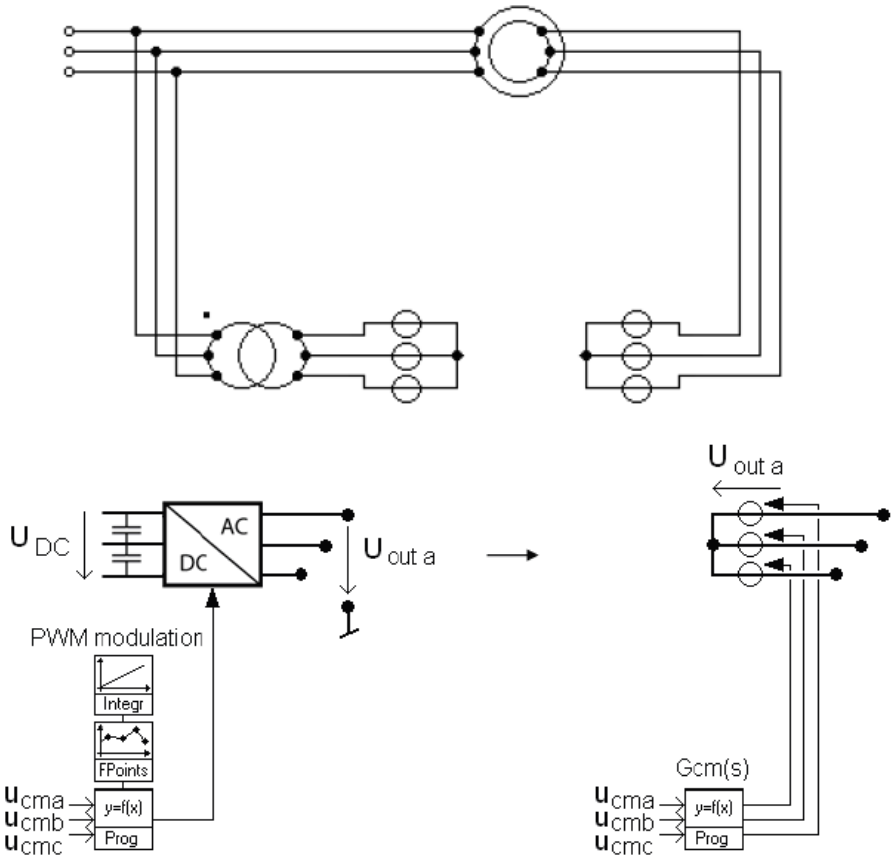

Abbildung 22: Pseudo-kontinuierliches Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [9]

Obwohl die Simulation mit diesem Modell beschleunigt wird, bleibt es eine komplexe Regelung, die durch aufwendige Kaskadenregler realisiert wird. Der einzige Unterschied manifestiert sich im Ersatz des Kondensatorspannungsreglers durch den Wirkleistungsregler im Transformatorteil. Deswegen wurde versucht, ein vereinfachtes Modell zu entwerfen, in dem die Schnittstellen für die Verbindung mit den anderen Systemen gewährleisten werden. Für die Verbindung mit den elektrischen Systemen werden die Blind- und die Wirkleistung benutzt, die als die Führungsgrößen des Reglers dienen. Die Verknüpfung mit dem hydraulischen System erfolgt über die rotierende Masse in Form der mechanischen Leistung.

4.2. Das WT3-Modell

Eine alternative Lösung des oben erwähnten Problems bietet das WT3-Modell, das für die PTI – Power System Simulation for Engineering (PSSE), GE – Positive Sequence Load Flow (PSLF) und ähnliche Simulationssoftware implementierbar ist. Das Modell besteht aus vier Teilen:

- Generator/Umrichter-Modell (WT3G),
- Umrichter-Regelung-Modell (WT3E),
- Turbinenmodell (WT3T) sowie
- Pitch-Regelung-Modell (WT3P).

Der Generator/Umrichter-Teil (WT3G) stellt die Wechselwirkung zwischen dem Generator und dem Netz dar, wobei der Wirk- und der Blindleistungsbedarf über die Stromeinspeisung aus einer Stromquelle gedeckt werden. Das WT3G1-Modell ist in der Abbildung 23 dargestellt.

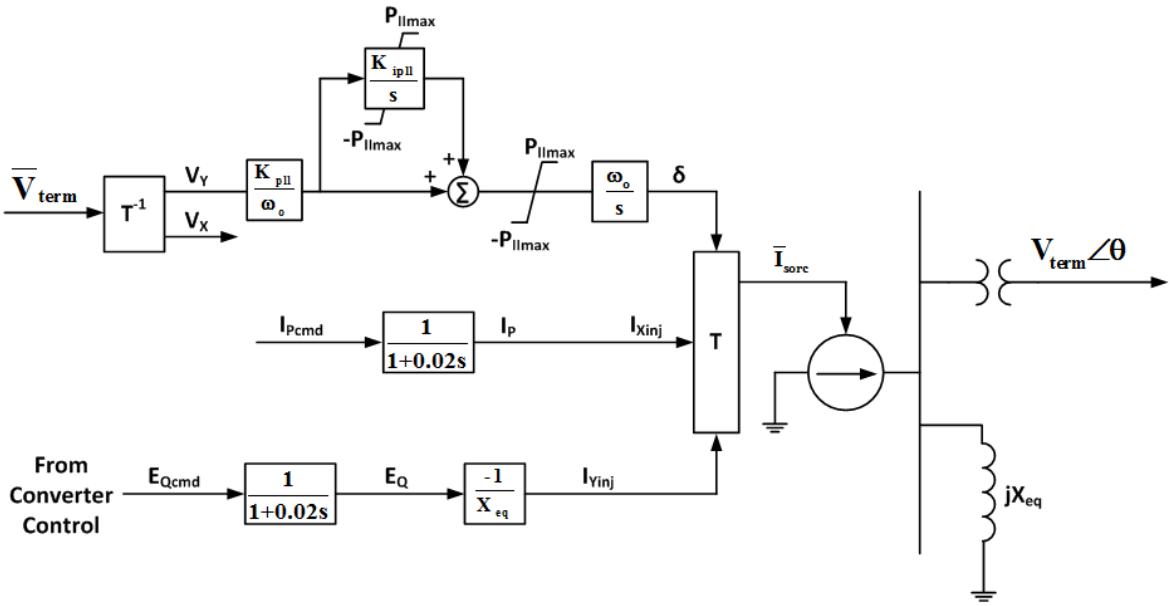

Abbildung 23: Generator/Umrichter-Modell (WT3G1) [10]

Die oberste Strecke aus der Abbildung 23 ist ein PLL (Phase-Locked Loop), womit der Winkel für die Transformation (T) bestimmt wird. Durch die Transformation werden die zwei Stromkomponenten (reale und imaginäre) in eine komplexe Größe (Betrag und Winkel) umgewandelt und an die Stromquelle übergeben. Die Quelle liefert dann die aufgestellte Wirk- und Blindleistung ins Netz. Die Parameter der Stromquelle werden dann in Abhängigkeit zur Leistung geregelt. Die reale Komponente des Stromes (I_{xinj}) wäre für die Wirkleistung und die imaginäre Komponente (I_{Yinj}) für die Blindleistung zuständig [10].

4.2.1. Das Regelungskonzept des Modells

Damit das Modell des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks in SIMSEN implementiert werden kann, muss das WT3G1-Modell etwas angepasst werden. Wie schon erwähnt, wird die Schnittstelle für die weiteren elektrischen Systeme über die Wirk- und Blindleistung realisiert. Die zwei Größen werden als Führungsgrößen der Leistungsregelung benutzt, wodurch das WT3G1-Modell erweitert werden soll. Eine Vorstellung, wie das Modell in SIMSEN aufgebaut sein soll, ist der Abbildung 24 zu entnehmen.

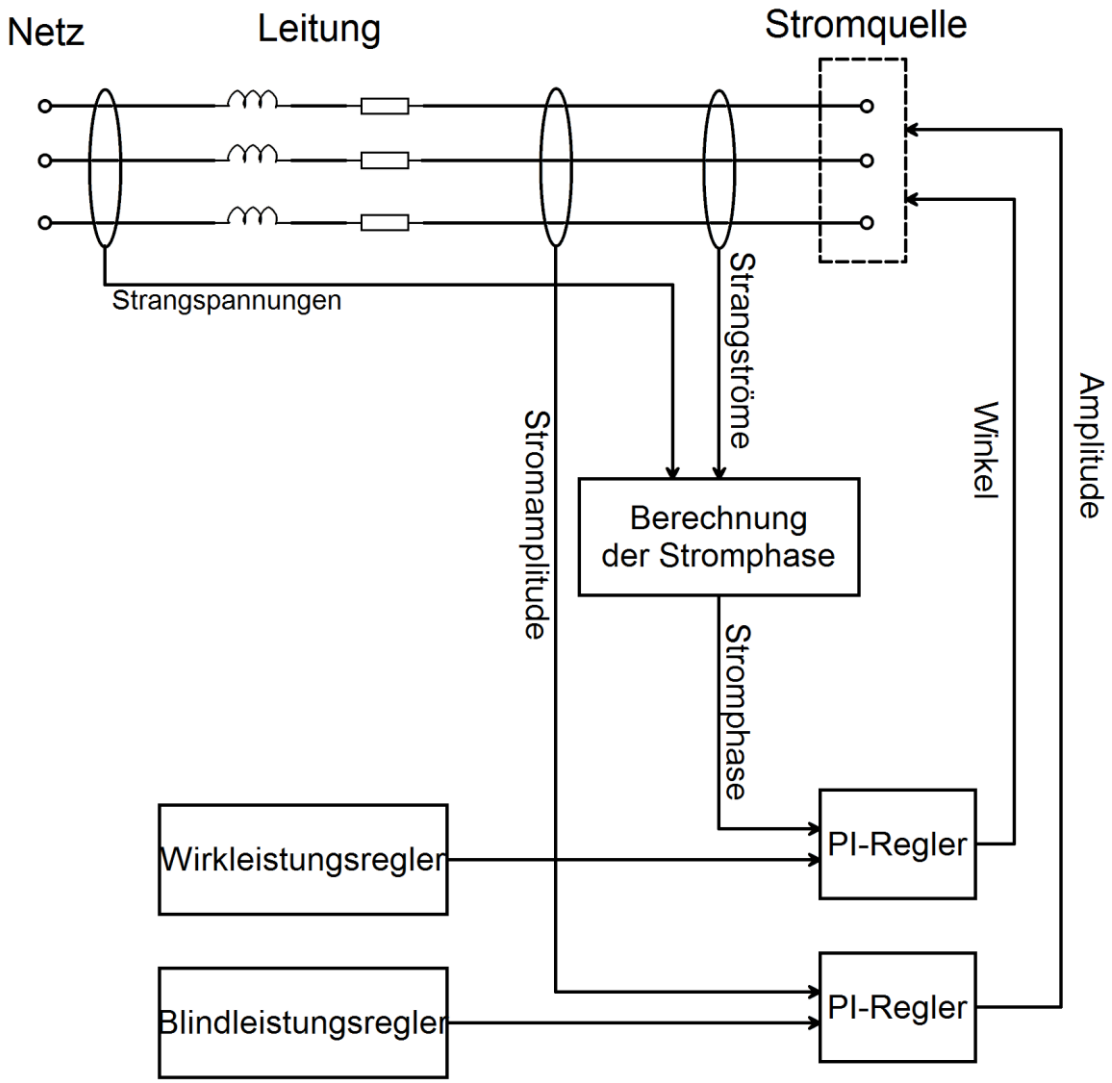

Abbildung 24: Das Modell mit der Stromquelle

Da in SIMSEN keine Stromquelle zur Verfügung steht, muss sie durch eine Spannungsquelle mit einer passenden Regelung realisiert werden. In der Software ist es möglich, die Amplitude der Spannung und den Phasenwinkel der Leiterspannung

anzupassen. Die Leistungsregler geben diese Parameter aus, die für die weitere Regelung als Führungsgrößen verwendet werden.

Der erste Schritt des Modellentwurfs ist der Aufbau der Stromquelle in SIMSEN. Hier ist eine Spannungsquelle über die Leitung an das Netz angeschlossen, bei der die Spannungsamplitude und die Phase aufzustellen sind, um sie in eine Stromquelle zu transformieren. In der Software besteht die Möglichkeit, die Amplitude des Stromes direkt aus der Spannungsquelle zu messen, aber die Phase des Stromes muss mit einer Verfahrung bestimmt werden. Zuerst werden die Strangspannungen in einen Vektor transformiert und aus den sich ergebenden Ergebnissen wird die Phase der Spannung als die Arcustangens-Funktion der imaginären und realen Komponenten ausgerechnet. Danach kann die Park-Transformation für die Strangströme eingesetzt werden, um die d- und die q-Komponente des Stromes zu bestimmen. Dabei wird der Winkel aus der Spannungstransformation verwendet. Die zwei Stromkomponenten werden in die Arcustangens-Funktion eingesetzt, woraus die Daten über die Phasendifferenz zwischen Stromzeiger und Spannungszeiger ermittelt werden, die dann mit der Spannungsphase addiert werden, um die Stromphase auszurechnen.

Es wurde versucht, mit den verfügbaren Daten die Stromamplitude und die Stromphase über die geregelte Spannungsquelle zu erzeugen. Zuerst sollten die gewünschten Werte als einen Verlauf an den Regler übergeben werden und im zweiten Schritt sollten die Werte von der Leistungsregelung übernommen werden.

Das System besteht aus zwei Spannungsquellen, die über eine Leitung, die ohmsch-induktiv ist, verbunden sind. Eine Spannungsquelle stellt das Netz dar und die andere Quelle wird durch die Regelung in eine Stromquelle umgewandelt, die den Motor/Generator und die Umrichter ersetzen soll. Wie die Abbildung 24 es visualisiert,, wird die Regelung mit zwei PI-Reglern realisiert. Mit einem PI-Regler wird versucht, die gewünschte Phase und mit dem anderen die Amplitude des Stromes einzustellen.

4.2.2. Die Problematik des Modells

Mit dem oben dargestellten Konzept war es möglich, die gewünschten Werte einzustellen, wenn nur ein Regler aktiv war. Die Amplitude des Stromes konnte eingerichtet werden, wenn der Amplitudenregler eingeschaltet und der Phasenregler ausgeschaltet war. Die Phase war mit dem eingeschalteten Phasenregler und dem ausgeschalteten Amplitudenregler ebenso einstellbar. Wenn aber die beiden Regler aktiv waren, konnte die Phase zwar auf den gewünschten Wert gebracht werden, aber die Amplitude wurde unkontrolliert erhöht.

Damit das Problem der Realisierung von Stromquelle besser erklärt wird, soll das System aus der Abbildung 25 vereinfacht dargestellt und mit den Gleichungen beschrieben

werden. Die Spannungen und die Ströme werden als komplexe Größen bzw. Vektoren gestaltet, die durch einen Betrag und die Phase beschrieben sind. Der Netzspannungszeiger $\underline{U}_N$ wurde in SIMSEN mit einem festen Wert der Amplitude und einer festen Frequenz eingestellt. Das bedeutet, dass sich die Amplitude und die Frequenz während der Simulation nicht ändern, weil das Netz als ein "Infinite Bus" ausgeführt wird. Durch die Änderung des Spannungszeigers $\underline{U}$ wird der Stromzeiger $\underline{I}$ auf den gewünschten Wert gebracht.

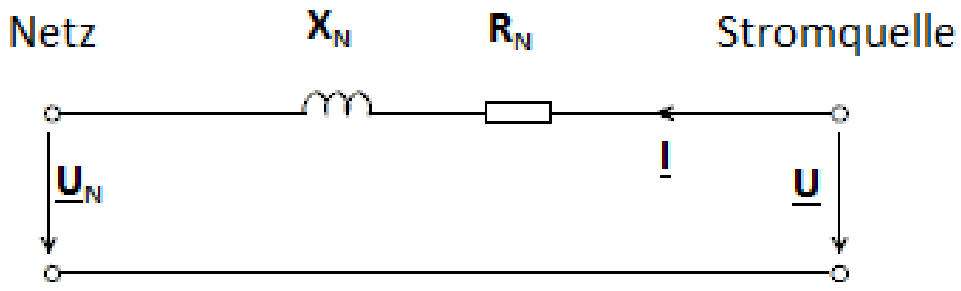

Abbildung 25: Das Netz mit der Leitung und der Stromquelle

Die drei Zeiger können durch die Amplitude und durch die Phase wie in den folgenden Gleichungen dargestellt werden:

$$\underline{U}_N = U_N \cdot e^{j\varphi_{U_N}} \tag{4.2}$$

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\varphi_U} \tag{4.3}$$

$$\underline{I} = I \cdot e^{j\varphi_I} \tag{4.4}$$

Wenn die Quelle den Strom in das Netz einspeisen würde, könnte das gesamte System durch die Gleichung (4.5) beschrieben werden, sodass der Stromzeiger durch die Gleichung (4.6) in Anhängigkeit der Netzspannung, der Quellenspannung und der Leitung dargestellt wird.

$$\underline{U} = \underline{U}_N + R_N \cdot \underline{I} + jX_N \cdot \underline{I} \tag{4.5}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U} - \underline{U}_N}{R_N + jX_N} \tag{4.6}$$

Wenn die Gleichungen (4.2) bis (4.4) in die Gleichung (4.6) eingesetzt werden, zeigt sich Folgendes:

$$I \cdot e^{j\varphi_I} = \frac{U \cdot e^{j\varphi_U} - U_N \cdot e^{j\varphi_{U_N}}}{R_N + jX_N} \tag{4.7}$$

Aus der Gleichung (4.7) ist es möglich, die Amplitude und die Phase des Stromes in Abhängigkeit von den Parametern, die mit der Regelung einstellbar sind, auszurechnen.

$$|\underline{I}| = \frac{1}{{R_N}^2 - {X_N}^2} \cdot \sqrt{\left({R_N}^2 + {X_N}^2\right) \cdot \left(U^2 + {U_N}^2 - U \cdot U_N \cdot \cos\left(\varphi_U - \varphi_{U_N}\right)\right)} \tag{4.8}$$

Es zeigt sich, dass die Amplitude des Stromes mit den beiden Parametern beeinflusst wird, die aber nicht so stark gekoppelt sind. Die Phase des Stromes ergibt sich durch die Gleichung (4.9),

$$arg(\underline{I}) = arctan\left(\frac{R_N \cdot U \cdot \sin(\varphi_U) - a - X_N \cdot U \cdot \cos(\varphi_U) + b}{R_N \cdot U \cdot \cos(\varphi_U) - c + X_N \cdot U \cdot \sin(\varphi_U) - d}\right) \tag{4.9}$$

wobei die Konstanten a, b, c und d nur von den Netzgrößen abhängig sind und während der Simulation konstant bleiben:

$$\begin{aligned} a &= R_N \cdot U_N \cdot \sin\left(\varphi_{U_N}\right) \\ b &= X_N \cdot U_N \cdot \cos\left(\varphi_{U_N}\right) \\ c &= R_N \cdot U_N \cdot \cos\left(\varphi_{U_N}\right) \\ d &= X_N \cdot U_N \cdot \sin\left(\varphi_{U_N}\right) \end{aligned}$$

Aus der Gleichung (4.9) lässt sich erkennen, dass die Phase des Stromes auch von den beiden Parametern einstellbar ist, die aber stark miteinander gekoppelt sind. Sie treten immer gemeinsam auf, was die Realisierung der Stromquelle mit einer geregelten Spannungsquelle erschwert.

Das System aus der Abbildung 25 kann ebenso durch ein Zeigerdiagramm (Abbildung 26) erklärt werden, in dem die Größen aus der Gleichung (4.5) dargestellt sind. Der Netzspannungszeiger $\underline{U}_N$ kann während der Simulation nicht beeinflusst werden, wobei der Stromzeiger $\underline{I}$ in Abhängigkeit vom Spannungszeiger $\underline{U}$ aufgestellt wird. Der Stromzeiger wird zudem durch die Leitungsparameter R_N und X_N beeinflusst, die aber während der Simulation konstant bleiben.

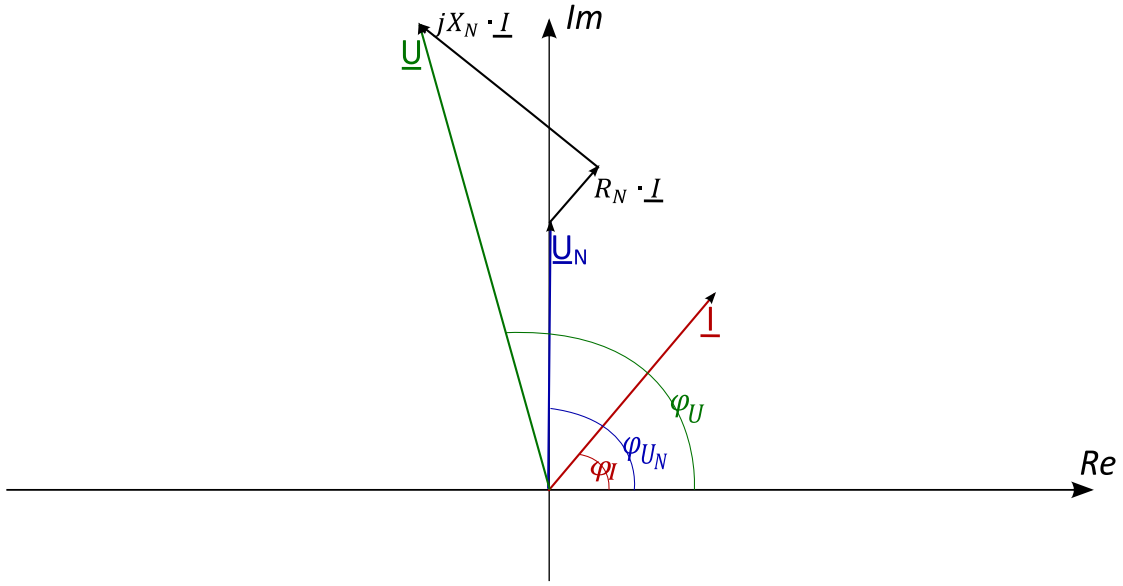

Abbildung 26: Das Zeigerdiagramm des Netzmodells

In der Abbildung 27 wird die Amplitude bzw. der Betrag des Stromes reduziert, ohne dabei den Stromwinkel φ_I zu ändern. Die Stromamplitude wird mit der Spannungsamplitude geregelt, die in dem Fall auch reduziert wird. Aus der Gleichung (4.5) wird deutlich, dass sich der Spannungszeiger $\underline{U}$ aus dem Netzspannungszeiger $\underline{U}_N$ und die Leitungszeiger ($R_N \cdot \underline{I}$ und $jX_N \cdot \underline{I}$) zusammensetzt. Da der Netzspannungszeiger gleich bleibt, stellen sich die Leitungszeiger auf, wodurch der Spannungswinkel φ_U geändert wird. Diese Änderung wirkt sich auch auf den Stromwinkel aus, was aus der Gleichung (4.9) sichtbar wird. Das bedeutet, dass es nicht möglich ist, die Stromamplitude einzustellen, ohne dabei den Stromwinkel zu ändern.

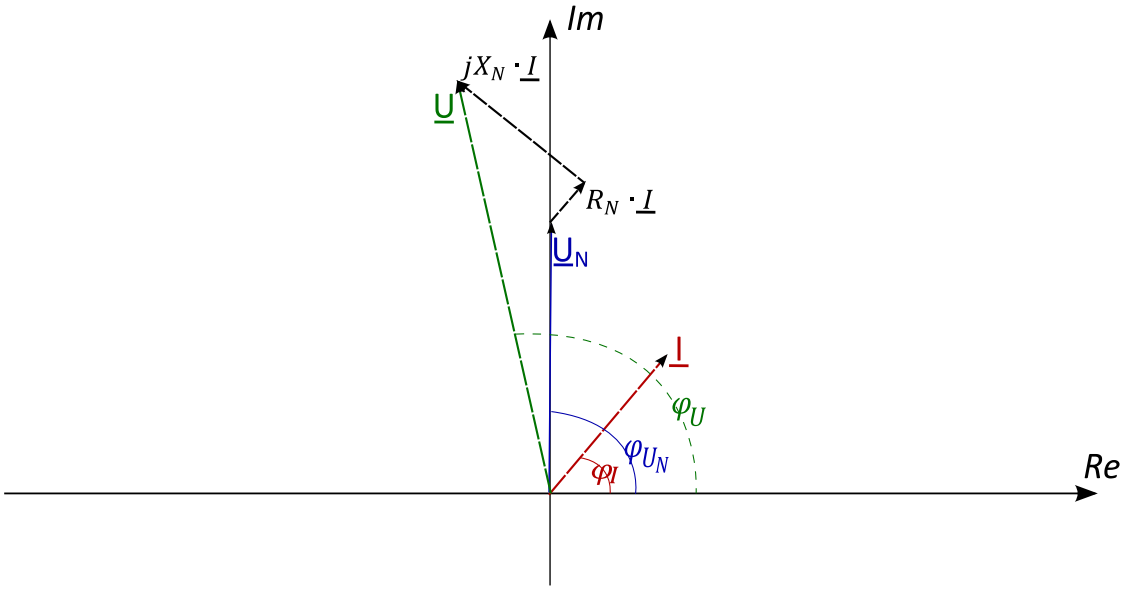

Abbildung 27: Änderung der Stromamplitude bei dem Netzmodell

Wenn angenommen wird, dass sich der Stromwinkel φ_I ändert und die Stromamplitude dabei konstant bleibt (Abbildung 28), drehen sich die Leitungszeiger ($R_N \cdot \underline{I}$ und $jX_N \cdot \underline{I}$), weil sie von der Richtung und dem Betrag des Stromzeigers abhängig sind. Um das zu erreichen, muss der Spannungswinkel φ_U eingestellt werden, weil der Stromwinkel dadurch geregelt wird. Der Spannungszeiger $\underline{U}$ setzt sich, auch nach der Gleichung (4.5), aus dem Netzspannungszeiger und dem Leistungszeiger zusammen, was die Erhöhung der Spannungsamplitude verursacht. Dadurch wird aber die Stromamplitude beeinflusst, wie die Gleichung (4.8) abbildet. Die Amplitudenänderung des Stromes führt zur weiteren Aufstellung der Leitungszeiger und damit auch zu einer weiteren Umformung des Spannungszeigers.

Aufgrund dieser starken Kopplung zwischen der Amplitude und der Phase der Quellenspannung war es nicht möglich, in SIMSEN die Stromquelle durch eine gesteuerte Spannungsquelle zu realisieren. Daraus entstand die Idee, ein Modell mit der Leistungsquelle zu entwerfen, wobei die Wirk- und die Blindleistung geregelt werden. Das Modell mit der Leistungsquelle wird im Kapitel 5 beschrieben.

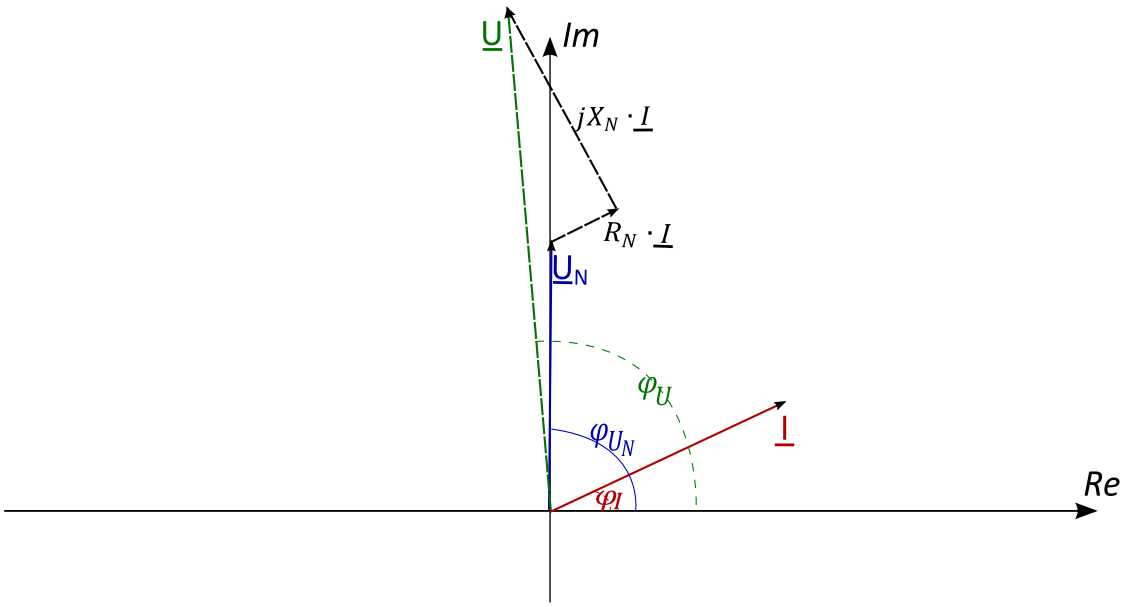

Abbildung 28: Änderung des Stromwinkels bei dem Netzmodell

5. Das Modell mit der Leistungsquelle

Im Kapitel 4 wurden die ersten Versuche der Realisierung des Modells eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks beschrieben. Daraus sind Modelle entwickelt geworden, die verschiedene Hindernisse mit sich gebracht haben. Die Modelle wurden systematisch vereinfacht, um die gewünschte Lösung des Problems zu finden.

Damit das Modell des Kraftwerks in das gesamte System, das auch aus anderen elektrischen und hydraulischen Systemen besteht, nutzbringend zum Einsatz kommen kann, ist es wichtig, die richtigen Schnittstellen und relevanten Größen zu bestimmen. Aus den vorher beschriebenen Modellen und in Abhängigkeit von den festgelegten Schnittstellen wird das Modell mit der Leistungsquelle realisiert, die den Generator mit den Umrichtern ersetzten soll.

Mit der drehenden Masse wird die Schnittstelle für das hydraulische System ausgeführt, wo die Wechselwirkung zwischen den zwei Systemen über das mechanische Moment erfolgt. Die Kopplung mit den anderen elektrischen Systemen findet über die Wirk- und die Blindleistung statt, die an die Leistungsquelle übergeben werden. Abhängig davon, ob die elektrischen Systeme die Leistung fördern oder zur Verfügung stellen, wird der Strom über die Leitung und den Transformator in das Netz eingespeist oder aus dem Netz entnommen. Dementsprechend liefert die Leistungsquelle ein elektrisches Moment, das für die drehende Masse als Bremsmoment verwendet wird.

Die Leistungsquelle selbst ist in SIMSEN als fertiges Element nicht verfügbar. Sie wird durch die geregelte Spannungsquelle realisiert, worauf nachträglich noch eingegangen wird.

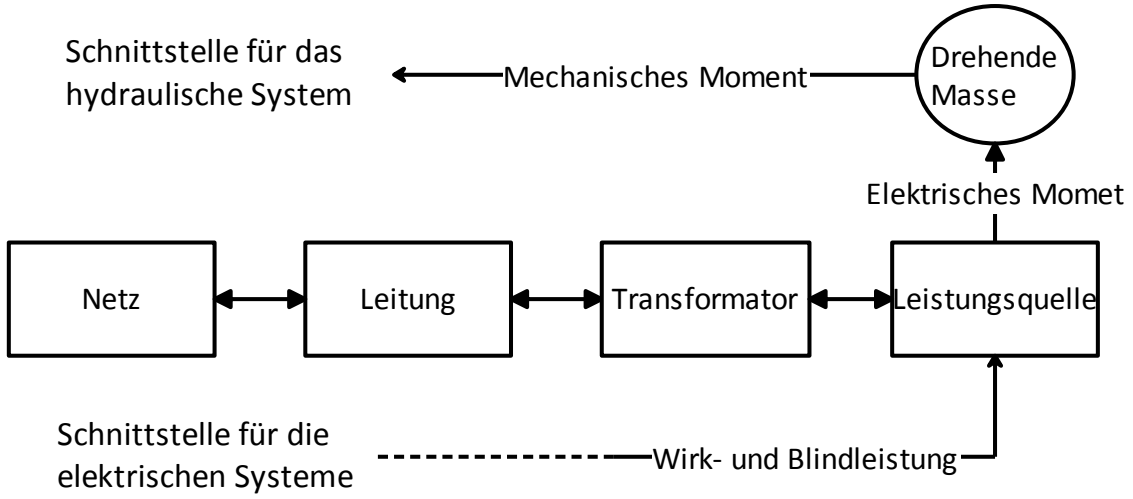

Abbildung 29: Das Prinzip des Modells mit der Leistungsquelle

5.1. Die mathematische Beschreibung des elektrischen Systems

Um das Modell besser zu verstehen und die Regelung präzis zu realisieren, wird das elektrische System im weiteren Vorgang durch die Gleichungen näher beschrieben. Anschließend an das Kapitel 4.2.2. wird das System aus der Abbildung 25 durch das Netzmodell mit der Leistungsquelle ersetzt (Abbildung 30), wo die Spannungen und die Scheinleistungen eingetragen sind. Die Parameter R_N und X_N setzen sich aus dem Leistungsparameter und dem Transformatorparameter zusammen, weil ein Transformator zwischen der Leitung und der Leistungsquelle eingesetzt wird.

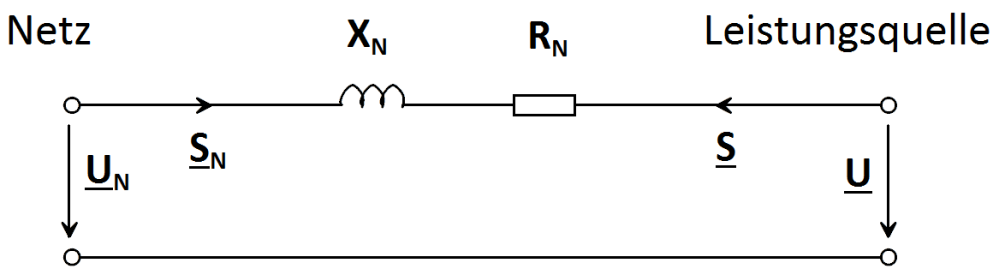

Abbildung 30: Das Netz mit den Parametern und der Leistungsquelle

Die Leistungsausgabe der Quelle errechnet sich mit der Gleichung (5.1). Bei den Drehstromnetzen wird als Spannung der verkettete Wert und als Strom der Wert des Leiters eingesetzt und dann gilt $\underline{S} = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}^*$. Da es in p.u.-Größen gerechnet wird, entfällt der Faktor $\sqrt{3}$.

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* \tag{5.1}$$

Aus der Gleichung (4.6) kann der konjugiert komplexe Wert des Stromes $\underline{I}^*$ errechnet werden, in der die Spannungen $\underline{U}_N$ und $\underline{U}$ durch die Gleichungen (4.2) und (4.3) ersetzt werden.

$$\underline{I}^* = \frac{U \cdot e^{-j\varphi_U} - U_N \cdot e^{-j\varphi_{U_N}}}{R_N - jX_N} \tag{5.2}$$

Wenn die Gleichung (5.2) in die Gleichung (5.1) eingesetzt wird, ergibt sich die komplexe Scheinleistung, die die Leistungsquelle in den Transformator und die Leitung einspeist.

$$\begin{aligned}\underline{S} &= \frac{1}{{R_N}^2 - {X_N}^2} \cdot \left(U \cdot e^{-j\varphi_U} - U_N \cdot e^{j\varphi_{U_N}}\right) \cdot U \cdot e^{j\varphi_U} \\ &= \frac{1}{{R_N}^2 - {X_N}^2} \cdot \left(U^2 - U_N \cdot U \cdot e^{j(\varphi_U - \varphi_{U_N})}\right)\end{aligned} \tag{5.3}$$

Die Phasendifferenz zwischen der Netzspannung und der Quellenspannung in den Gleichungen kann durch δ ersetzt werden, was auch in der Abbildung 31 eingezeichnet ist.

$$\delta = \varphi_U - \varphi_{U_N} \tag{5.4}$$

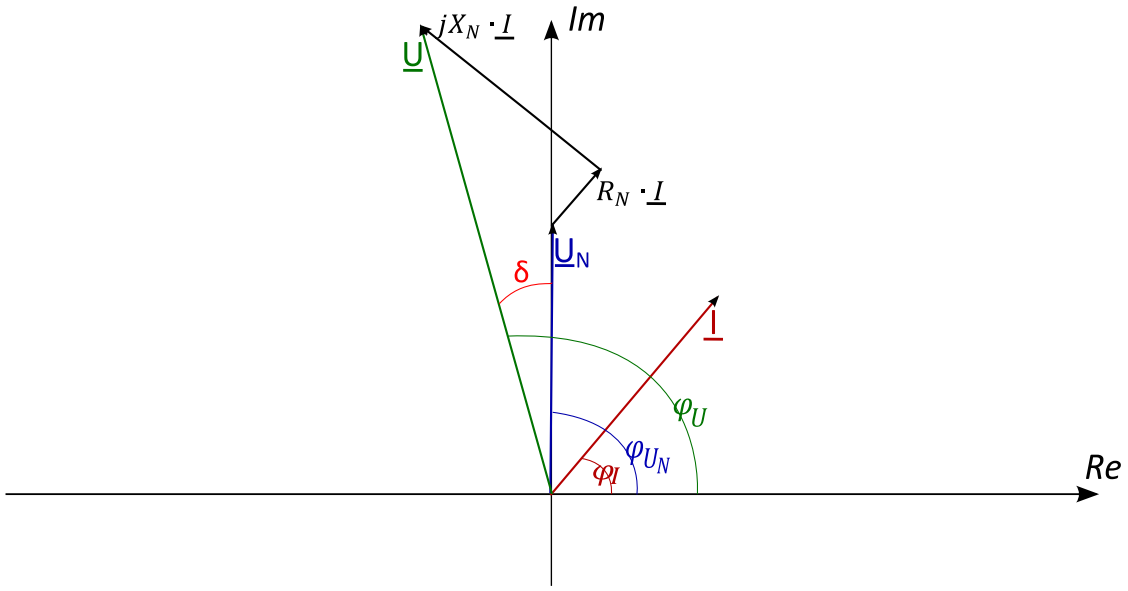

Abbildung 31: Phasendifferenz zwischen den Spannungen

Aus dem komplexen Wert der Scheinleistung werden die Wirk- und die Blindleistung bestimmt. Damit dies erreicht werden kann, ist es notwendig, den komplexen Wert in die reale und die imaginäre Komponente zu zerlegen. Der Realteil der Scheinleistung entspricht der Wirkleistung und der Imaginärteil der Blindleistung.

$$\underline{S} = P + jQ = \frac{R_N + jX_N}{{R_N}^2 + {X_N}^2} \cdot U_N \cdot U \cdot \left(\frac{U}{U_N} - \cos\delta - j\sin\delta\right) \tag{5.5}$$

$$P = \frac{U \cdot U_N}{{R_N}^2 + {X_N}^2} \cdot \left(R_N \cdot \frac{U}{U_N} - R_N \cdot \cos\delta + X_N \cdot \sin\delta\right) \tag{5.6}$$

$$Q = \frac{U \cdot U_N}{{R_N}^2 + {X_N}^2} \cdot \left(X_N \cdot \frac{U}{U_N} - X_N \cdot \cos\delta - R_N \cdot \sin\delta \right) \tag{5.7}$$

Wie aus den Gleichungen (5.6) und (5.7) ersichtlich wird, sind die Leistungen durch die Amplitude der Quellenspannung und die Phasendifferenz gekoppelt. Trotzdem ergibt sich ein günstiger Ausgangspunkt, um eine Leistungsquelle durch die geregelte Spannungsquelle in SIMSEN zu realisieren, weil die Kopplung nicht so stark ausgeprägt wie bei dem Modell mit der Stromquelle ist. Durch den Einsatz der richtigen Regelung ist es möglich, die Entkopplung der Leistungen zu gewährleisten.

5.2. Das Modell in SIMSEN

Das fertige Modell eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks in SIMSEN ist in der Abbildung 32 dargestellt. Es setzt sich aus folgenden sechs Teilen zusammen:

- das Netz,
- die Leitung und der Transformator,
- die Leistungsquelle,
- die Schnittstelle für die elektrischen Systeme,
- die Regelung sowie
- die Schnittstelle für das hydraulische System.

Ganz links in der Abbildung 32 (Block 1) ist das Netz dargestellt, das als eine Spannungsquelle implementiert wird. Die Quelle selbst ist ein "Infinite Bus", was bedeutet, dass die Frequenz und die Spannungen während der Simulation konstant bleiben. In der Software kann das Element durch den Effektivwert der Spannungsamplitude (*Ulrms*), der Frequenz (*Fs*) und des Spannungswinkels (*Ths*) parametrisiert werden, woraus die Außen- und Leitungswechselspannungen bestimmt werden.

Mit dem Parameter *Ths* wird die Phasenverschiebung der Spannung bei der Phase *a* definiert, wobei die Spannungen der restlichen Phasen um 120 Grad bzw. 240 Grad verschoben werden. Der Parameter gibt also den Anfangspunkt an, von dem aus die Drehung des Spannungszeigers anfängt. Die Software bietet ebenso die Möglichkeit, die Größen während der Simulation zu lesen und nach der Simulation in einem Diagramm darzustellen. Für das Modell ist die Lage des Spannungszeigers relevant, damit die Wirkleistung aufgestellt werden kann. Beim Auslesen des Winkels ergibt sich ein Sägezahnsignal, das den Winkelverlauf über 360 Grad darstellt. Sind die Ergebnisse in p.u.-Werten auszugeben, so müssen auch die Nennwerte eingetragen werden, die für die Berechnung der bezogenen Werte verwendet werden.

Für das Netz wird das Höchstspannungsnetz von 220 kV mit 50 Hz ausgewählt, das die gleiche Scheinleistung wie die Leistungsquelle hat. Die Netzparameter sind in der Tabelle 1 dargestellt. Der Parameter S_N wird verwendet, um die bezogenen Werte darzustellen und er stellt keine Kurzschlussleistung dar.

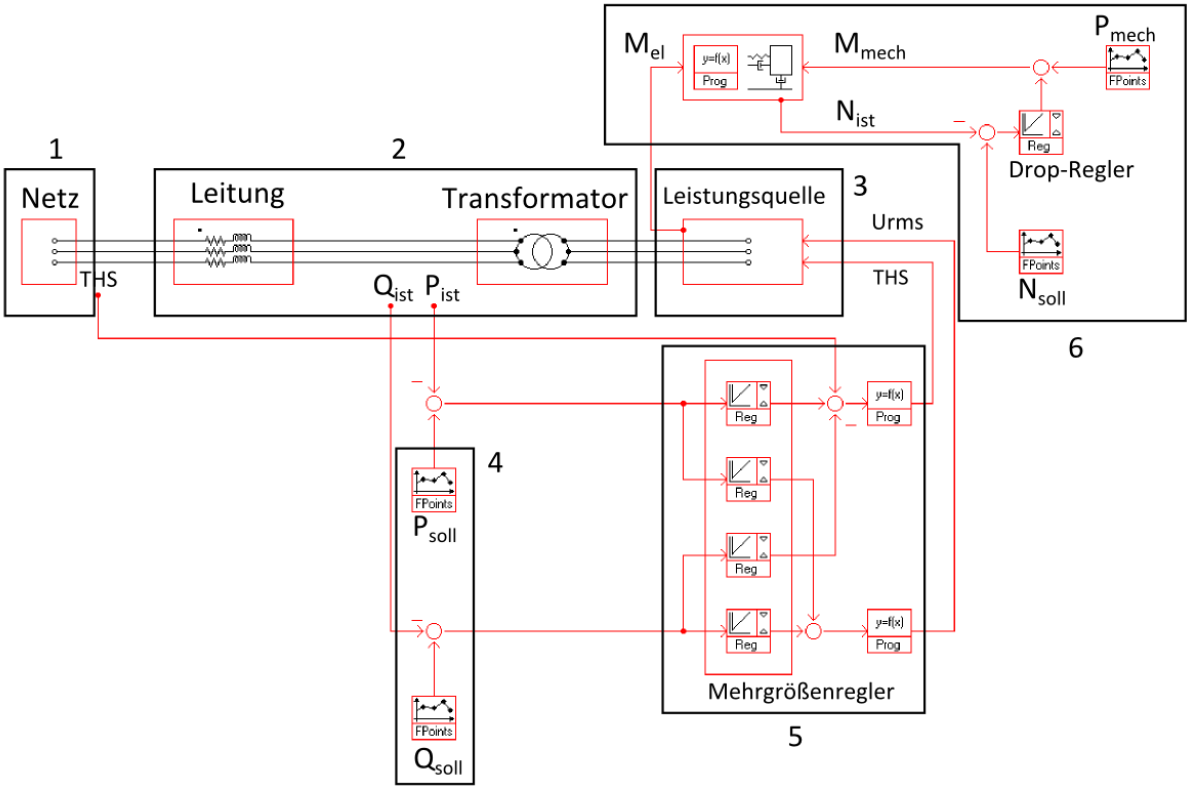

Abbildung 32: Das Modell des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks in SIMSEN

Tabelle 1: Die Netzparameter

Parameter	Wert
S_N	*98 MVA*
U_N	*220 kV*
F_N	*50 Hz*
Ulrms	*220 kV*
Fs	*50 Hz*
Ths	*0 Grad*

Das zweite Teil des Modells ist die Leitung zusammen mit dem Transformator (Block 2 in der Abbildung 32), worüber das Netz und die Leistungsquelle verbunden sind. Das Leitungselement wird mit dem Widerstand, der Kapazität und der Induktivität definiert. Es besteht auch die Möglichkeit, die gegenseitige Induktivität zwischen den Phasen einzugeben, was für das Modell zu diesem Zeitpunkt nicht relevant ist. Wenn die Leitung symmetrisch ist, sind nur die Werte der Parameter für eine Phase einzugeben. Bei der

unsymmetrischen Leitung muss der Parameter *unsym* auf 1 gestellt und die Werte der Leitungsparameter müssen dann für alle Phasen einzeln eingegeben werden, sonst ist der Parameter *unsym* auf 0 zu halten.

Für das Modell wurde angenommen, dass die Verbindung mit dem Netz über eine Freileitung erfolgt, die 70 km lang ist. Für die Berechnung der Leitungsparameter gilt, dass der längenbezogene Widerstand $R' = 0{,}05\ \Omega/km$ und der Längsinduktivitätsbelag $X_L{}' = 0{,}407\ \Omega/km$ ist [11]. Daraus und mit der Abhängigkeit der Freileitungslänge setzten sich die Leitungsparameter aus, die in der Tabelle 2 dargestellt sind.

Die Leistung und die anderen Größen werden über die beiden Leitungsseiten übertragen. Die Ergebnisse können während der Simulation auf beiden Seiten gemessen und nach der Simulation in Diagrammform dargestellt werden. Damit die Ergebnisse in p.u.-Werte ausgegeben werden, müssen die Nenndaten definiert werden, die denen des Netzes entsprechen.

Tabelle 2: Die Leitungsparameter

Parameter	**Wert**
S_N	*98 MVA*
U_N	*220 kV*
F_N	*50 Hz*
R	*3,5 Ω*
L	*0,09 H*

Der Transformator in SIMSEN wird durch den Kurzschlusswiderstand rcc, die Kurzschlussreaktanz xcc und die Hauptreaktanz xh1 definiert. Durch das Einstellen von Primär- und Sekundärspannungen kann auch das Übersetzungsverhältnis eingegeben werden. Die Transformatorparameter sind in der Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Die Transformatorparameter

Parameter	**Wert**
S_N	*98 MVA*
U_N	*220 kV*
F_N	*50 Hz*
rcc [p.u]	$2{,}67 \cdot 10^{-3}$
xcc [p.u]	*0,12*
xh1 [p.u]	*3000*

Die Leistungsquelle (Block 3 in der Abbildung 32) wird als eine geregelte Spannungsquelle realisiert, weil in SIMSEN keine Leistungsquelle als Element zur Verfügung steht. Da für das Modell die Wirk- und die Blindleistung relevant sind, ersetzt die Leistungsquelle den

Generator mit den Umrichtern eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks, wodurch das WT3-Modell weiter vereinfacht wird. Die Größen, die für die Validierung des Modells wichtig sind, können aus dem Element aufgenommen und dargestellt werden.

Bei der Quelle werden die Amplitude bzw. der Effektivwert der Spannung und der Winkel während der Simulation geändert, um die entsprechenden Werte der Blind- und Wirkleistung einzustellen, was durch die passenden Regler erfolgt. Die resultierende Wirkleistung der Quelle wird zudem für die Schnittstelle des hydraulischen Systems eingesetzt, woraus das elektrische Moment errechnet wird. Die Quelle kann die Leistung ab- und annehmen, was dem Generator- und dem Pumpbetrieb entspricht.

Für das Element werden die gleichen Nenndaten wie bei dem Netz und der Leitung angenommen, damit die Ausgabe in p.u.-Werte erfolgen kann.

Der vierte Teil des Modells ist die Schnittstelle für die weiteren elektrischen Systeme (Block 4 in der Abbildung 32), die mit dem Pumpspeicherkraftwerk während der Projektentwicklung verbunden werden sollten. Die Schnittstelle wird in diesem Teil der Arbeit mit einer Point-Funktion entworfen. Dieses Element bietet die Möglichkeit, verschiedene Verläufe zu realisieren. Damit werden die Wirk- und die Blindleistungsverläufe abgebildet, mit denen die Regelung und das Modell getestet werden. Die Point-Funktion fällt dann ab, wenn das Modell direkt mit den anderen Systemen verbunden wird. In dem Fall können die Leistungen direkt an die Regelung übergeben werden.

Die Ergebnisse der Simulationen können in SI-Einheiten und in p.u.-Werten ausgegeben werden, aber sie werden während der Simulation immer in SI-Einheiten gespeichert. Damit die Rechnung und die Übergabe zwischen den Elementen in p.u.-Werten erfolgt, müssen die Ergebnisse richtig bezogen werden. Die für die Normierung relevanten Daten sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Die Werte für die Normierung

Parameter	**Wert**
$S_N = 98\,MVA$	$S_N = 98\,MVA$
$U_N = 220\ kV$	$U_B = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_N$
$f_N = 50\,Hz$	$I_B = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{S_N}{U_N}$

Da die restlichen Teile des Modells einen höheren Aufwand erfordert haben, werden diese in den folgenden Kapiteln präziser erklärt.

5.2.1. Der Reglerentwurf

Der aufwendigste Teil des Modells ist die Regelung der Spannungsquelle (Block 5 in der Abbildung 32), weil die Größen, die geregelt werden, relativ stark gekoppelt sind. Das Ziel ist es, ein Regelungskonzept zu realisieren, das auch für die variablen Leitungsparameter anwendbar ist. Natürlich sind diese Schwankungen gering und setzten sich aus verschiedenen Störungen in der Leitung zusammen. Mit dem Reglereinsatz wird aus einer Spannungsquelle eine Leistungsquelle erzeugt, die den Generator mit den Umrichtern im Modell eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks ersetzt.

Aus den Gleichungen (5.6) und (5.7) wurde die Annahme abgeleitet, dass die Wirkleistung über den Spannungswinkel und die Blindleistung über die Spannungsamplitude geregelt wird. Dabei wird der Spannungswinkel mit dem Netzspannungswinkel, der sich dreht, addiert, um einen Winkelverlauf zwischen 0 und 2π zu erzeugen. Daraus ergibt sich die Phasendifferenz δ zwischen den zwei Spannungszeigern. Im Kapitel 5.1. wurde deutlich, dass die Leistungen über diesen zwei Größen relativ stark gekoppelt sind, was ein komplexes Regelungskonzept erfordert. Der Einsatz eines Mehrgrößenreglers (Abbildung 33) ermöglicht es, dass die Leistungen entkoppelt eingestellt werden.

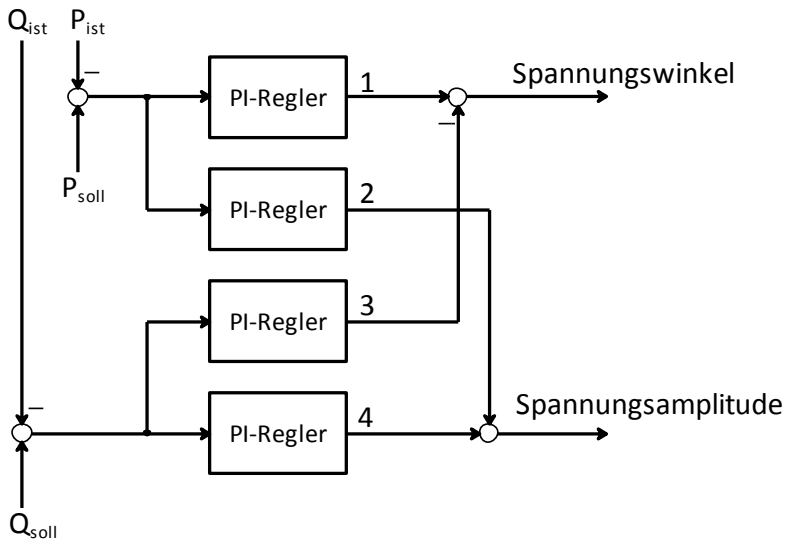

Abbildung 33: Der Mehrgrößenregler

Der Mehrgrößenregler wurde mit vier PI-Reglern realisiert, wobei zwei für die Wirkleistung und zwei für die Blindleistung eingesetzt werden. Die Abbildung 33 stellt dar, dass die Ausgänge 1 und 3 subtrahiert und die Ausgänge 2 und 4 addiert werden. Dadurch wird die gegenseitige Auswirkung der Winkel- und Amplitudenänderung auf die Wirk- und Blindleistung kompensiert.

Der PI-Regler setzt sich aus dem Proportional- und dem Integralglied zusammen. In SIMSEN sind sechs verschiedene Regler verfügbar, die einfach implementiert werden können. Um den gewünschten Regler einzusetzen, ist es notwendig, nur den Parameter *type* im Element *Reg* einzustellen. Typ 3 entspricht dem PI-Regler, der durch die Verstärkung *k* und die Zeitkonstante *T1* definiert ist. Die Übertragungsfunktion des Reglers ist in der Gleichung (5.8) umschrieben.

$$G(s) = k \cdot \frac{1 + s \cdot T1}{s \cdot T1} \tag{5.8}$$

Die Parameter wurden empirisch bestimmt, wobei ein Sprung am Eingang der Regler vorgegeben wurde. Es wurde versucht, die Parameter auf eine Weise einzustellen, dass der Ist-Wert den Soll-Wert so genau wie möglich folgt. Die Sprünge wurden für die beiden Größen eingesetzt, wobei alle vier Quadranten durchgegangen wurden. Das beste Ergebnis ist in der Abbildung 34 und die entsprechenden Parameter in der Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Die Parameter für den Mehrgrößenregler

PI-Regler 1	
k	4,35
T1	$2 \cdot 10^{-3}$
PI-Regler 2	
k	0,135
T1	0,12
PI-Regler 3	
k	6
T1	$5{,}3 \cdot 10^{-2}$
PI-Regler 4	
k	$7{,}4 \cdot 10^{-2}$
T1	$3 \cdot 10^{-3}$

Die Ist-Werte der Leistungen wurden zwischen dem Transformator und der Leitung gemessen und sie stellen die Leistungen dar, die der Generator eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks über den Transformator ausgibt oder annimmt. Aus der Abbildung 34 werden die Abweichungen der Ist-Werte ersichtlich, die aber schnell mit dem Integralanteil des Reglers kompensiert werden. Die Abweichungen treten bei den Sprüngen auf, was sich auf die beiden Leistungen manifestiert, weil die beiden von der Spannung und dem Winkel abhängig sind. Durch den Einsatz des Mehrgrößenreglers mit den Parametern aus der Tabelle 5 ist es möglich, die gewünschten Werte schnell und präzise zu erreichen. Die kurzfristigen und vergleichsweise kleinen Abweichungen verweisen darauf, dass die vollständige Entkopplung nicht möglich ist. Da die Änderung der Leistungen in der Wirklichkeit nicht sprungartig erfolgt, kann angenommen werden, dass der Regler für das Modell einsetzbar ist, was später noch validiert wird.

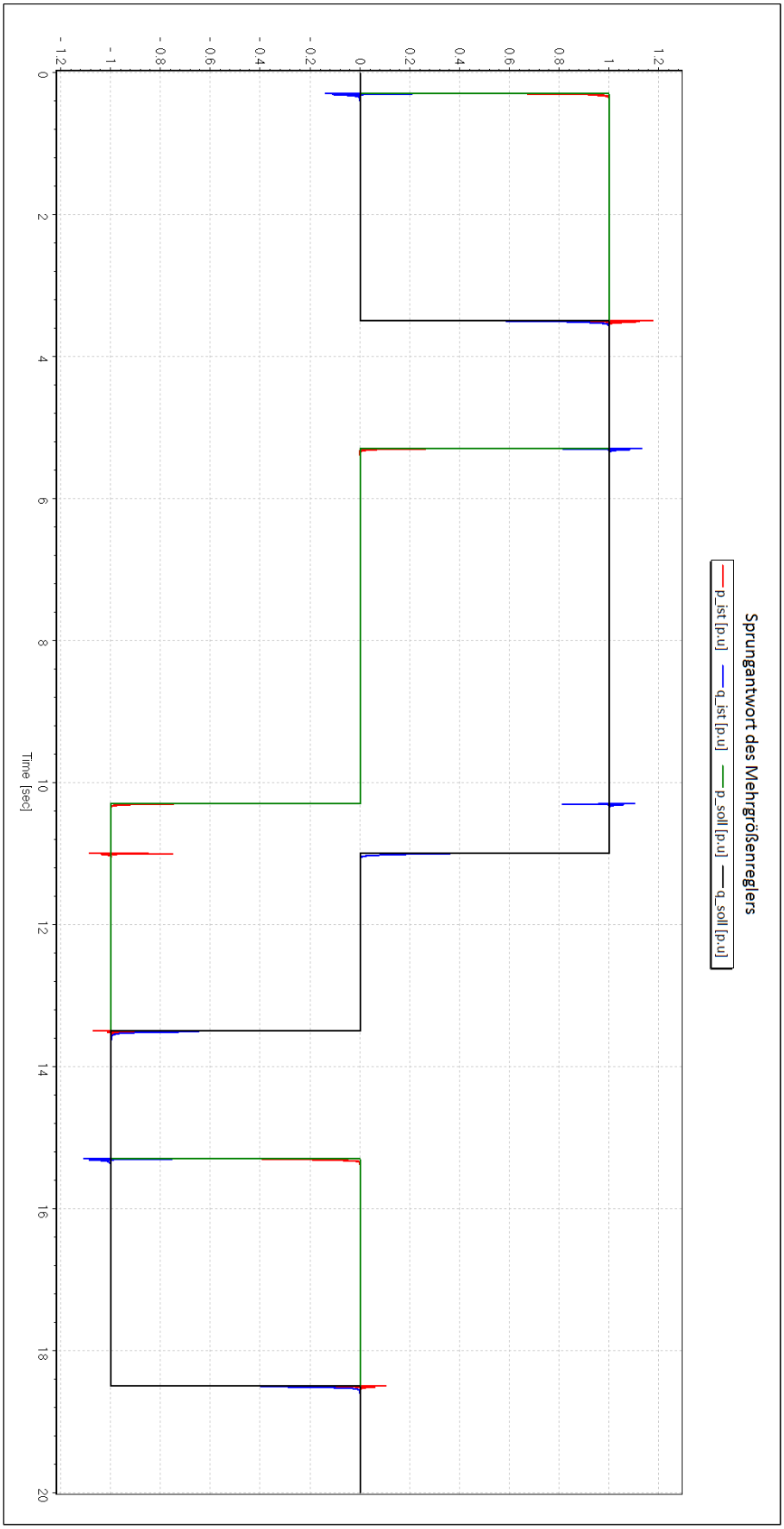

Abbildung 34: Sprungantwort des Mehrgrößenreglers

Als es angenommen wurde, sollte der Regler auch für einige Änderungen in die Leitung wirksam sein. Sie können durch die verschiedenen Störungen im Netz oder durch die Änderung der Freileitungslänge hervorgerufen werden. Deswegen wurde der Regler mit den Parametern aus der Tabelle 5 für die verschiedenen Werte des Widerstands und der Induktivität getestet, um den Arbeitsbereich des Reglers zu bestimmen. In diesem Fall wurden keine Sprünge am Eingang der Regler aufgelegt, weil die Dynamik des Pumpspeicherkraftwerks in der Wirklichkeit nicht derart schnell ist. Es wurde angenommen, dass eine Änderung der Wirkleistung von 0 bis 1 p.u. innerhalb von 60 s erfolgt. Die Änderung der Blindleistung ist im Vergleich zum Wirkleistungsgradienten etwas schneller. In der Realität erreicht die Blindleistung eine Änderung von 0 bis 1 p.u. in 1 bis 5 s. Mit dem Variieren der Leistungsparameter wurde der Arbeitsbereich aus der Abbildung 35 festgelegt. Der Einsatz des Reglers für die Leitungsparameter aus dem blauen Bereich liefert präzise und vernünftige Ergebnisse. Für die Leitungsparameter außerhalb des blauen Bereichs ist der Regler nicht einsetzbar, weil die entstehenden Ergebnisse nicht plausibel sind und der Regler instabil wird.

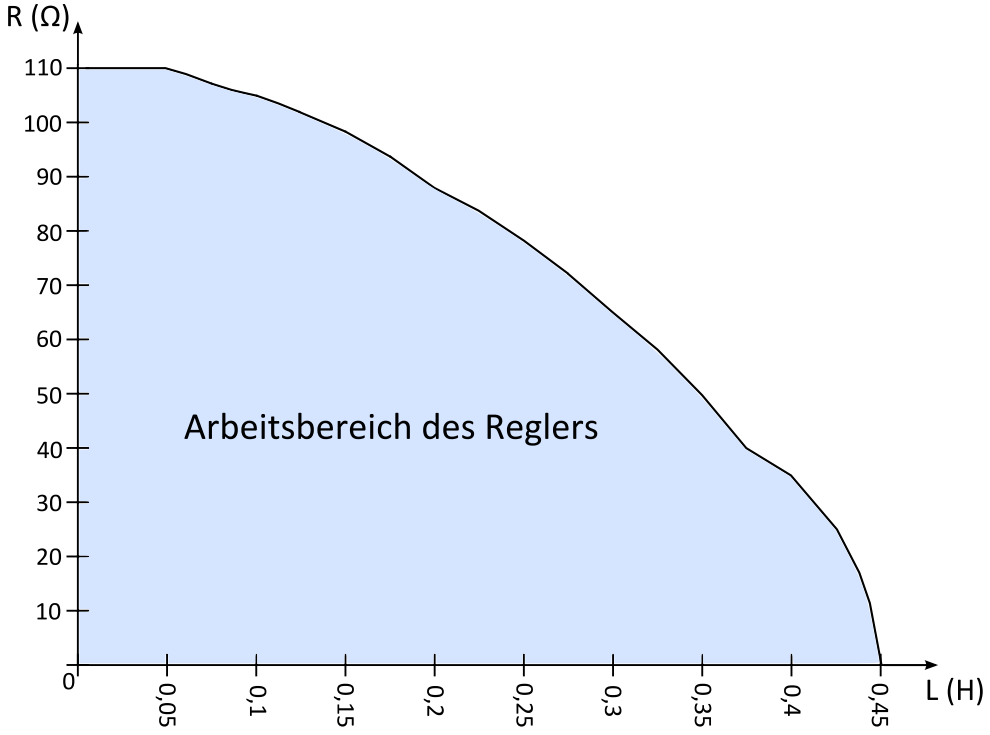

Abbildung 35: Arbeitsbereich des Mehrgrößenreglers für die verschiedenen Leitungsparameter

Des Weiteren wurden die Leitungsparameter für die verschiedenen Freileitungslängen eingesetzt, damit die Leitungslänge festgelegt wurde, wofür der Mehrgrößenregler einsetzbar ist. In der Weitspanne zwischen 0 km und 330 km kann der Regler verwendet werden, wobei die gewünschten Leistungen problemlos eingestellt werden können.

Tabelle 6: Die Leitungsparameter für die verschiedenen Längen der Freileitung

Länge l [km]	R [Ω]	X_l [Ω]	L [H]
10	0,5	4,07	0,013
50	2,5	20,35	0,065
70	3,5	28,49	0,091
100	5	40,7	0,130
150	7,5	61,05	0,194
200	10	81,4	0,259
250	12,5	101,75	0,324
330	16,5	134,31	0,428

Der große Arbeitsbereich ermöglicht die präzise Anwendung des Reglers und des Modells für verschiedenste Situationen, die in der Wirklichkeit auftreten können. Damit kann das Modell für die unterschiedlichen Änderungen verwendet werden, die sich durch Störungen oder durch die Variation der Freileitungslänge ergeben.

5.2.2. Schnittstelle für das hydraulische System – Droop Regler

Der Block 6 aus der Abbildung 32 stellt die Schnittstelle für das hydraulische System dar, wodurch die Verbindung des elektrischen mit dem hydraulischen System erfolgt. Den beiden Systemen ist gemeinsam, dass sie mit einer drehenden Masse gekoppelt sind, die im Modell eine Turbine darstellt. Die Leistungsquelle liefert die Wirkleistung, die mit der Drehzahl der Masse ein elektrisches Moment ausgibt, das als ein Bremsmoment an die Masse übergeben wird. Die Wechselwirkung mit dem hydraulischen System erfolgt über die mechanische Leistung, die auch in Abhängigkeit von der Drehzahl in das mechanische Moment umgerechnet und an die drehende Masse übergeben wird. Aus dem Vorzeichen der Leistungen ist es möglich, festzustellen, ob das Kraftwerk im Generator- oder im Pumpbetrieb arbeitet.

Das Modell des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks wird als Teil eines Projekts eingesetzt, um die verschiedenen Szenarien zu analysieren. Damit das Modell ohne ein hydraulisches System getestet wird, muss ein Drehzahlregler entworfen werden, damit es gelingt, die Drehzahl der Masse auf einem bestimmten Wert zu halten. Diese Aufgabe wird mit einem Droop-Regler (Abbildung 36) erfüllt, der mit einem P-Regler realisiert wird. Der P-Regler wird in SIMSEN durch das Einstellen des Parameters *type* im Element *Reg* auf 1 implementiert und ist durch die Verstärkung *k* definiert.

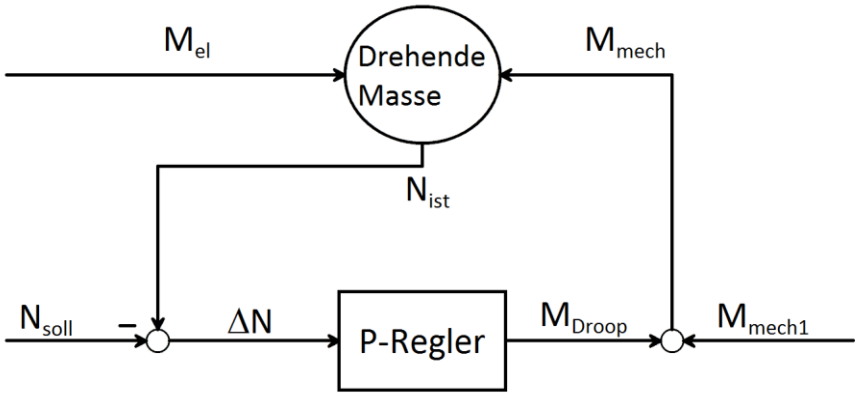

Abbildung 36: Schnittstelle für das hydraulische System – der Droop-Regler

Die Drehzahlabweichung ΔN setzt sich aus der Differenz zwischen der Referenzdrehzahl N_{soll} und der Drehzahl der drehenden Masse N_{ist} zusammen. Sie wird dann mit einer Verstärkung k multipliziert, woraus sich ein Moment M_{Droop} ergibt, was mit dem mechanischen Moment des hydraulischen Systems M_{mech1} addiert wird. Das bedeutet, dass die Drehzahlabweichung mit dem zusätzlichen mechanischen Moment kompensiert wird. Wie das aus der Sicht des hydraulischen Systems realisiert wird, hängt vom Entwurf des Systems ab.

In den Gleichungen (5.9) und (5.10) ist dargestellt, wie das elektrische und das mechanische Moment ausgerechnet werden.

$$M_{el} = \frac{P_{el}}{2 \cdot \pi \cdot N} \tag{5.9}$$

$$M_{mech} = \frac{P_{mech}}{2 \cdot \pi \cdot N} + M_{Droop} \tag{5.10}$$

Die Verstärkung k bei dem P-Regler hängt von der maximalen Drehzahlabweichung ab [12]. Wenn angenommen wurde, dass die Abweichung maximal 6 % erreichen darf, ergibt sich für die Verstärkung $k = \frac{1}{0{,}06} \approx 17$.

$$k = \frac{1}{\Delta N_{max}} \tag{5.11}$$

Um das Element *Masse* in SIMSEN vollständig zu beschreiben, ist es notwendig, die Nennleistung P_N, die Nenndrehzahl N_N und das Trägheitsmoment J zu definieren. Das Trägheitsmoment errechnet sich nach der Gleichung (5.12), in der f_N die Nennfrequenz und T_A die Anlaufzeit der Masse ist. Die eingesetzten Daten sind in der Tabelle 7 dargestellt.

$$J = \frac{T_A \cdot P_N}{{\omega_N}^2} = \frac{T_A \cdot P_N}{(2 \cdot \pi \cdot f_N)^2} \tag{5.12}$$

Tabelle 7: Die Daten und Parameter für das Element Masse

Parameter	Wert
P_N	*98 MW*
Pp	*10*
F_N	*50 Hz*
N_N	*300 U/min*
T_A	*7s* [13]
J	*6950 kgm*^{2}

In der Abbildung 37 ist der Verlauf der relevanten Größen bei der Schnittstelle für das hydraulische System dargestellt. Die mechanische Leistung weicht in einigen Punkten von der elektrischen Leistung ab, was sich auf die Drehzahl der Masse auswirkt. Dabei schaltet sich der Droop-Regler ein und kompensiert die Drehzahlabweichung, was die rote Linie in der Abbildung 37 visualisiert.

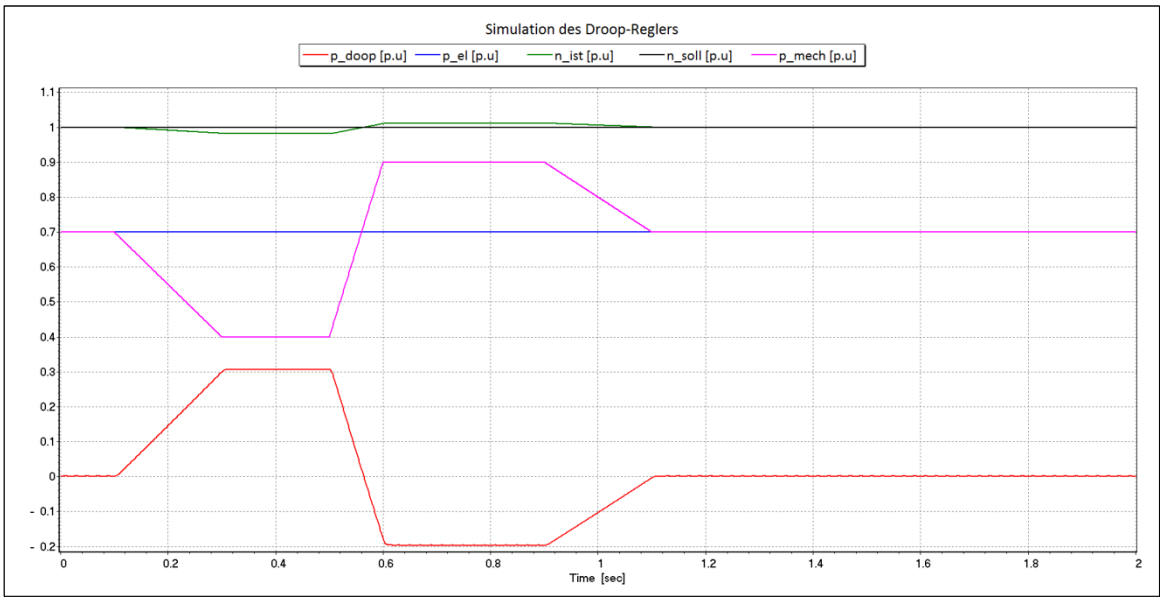

Abbildung 37: Simulation des Droop-Reglers

5.3. Validierung des Modells

Um das Modell mit der Leistungsquelle zu validieren, werden einige Simulationen durchgeführt, nachdem die Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt wurden. Die Validierung wird in drei Schritten realisiert:

- Validierung des elektrischen Teils,
- Validierung des mechanischen/hydraulischen Teils,
- Analyse verschiedener Störungen.

Im ersten Schritt wird versucht, alle vier Quadranten mit den Wirk- und Blindleistungen zu erreichen. Dabei wird angenommen, dass sich die Wirkleistung mit einem Gradienten von $0{,}0167\ {}^{p.u}/_{s}$ und einer Blindleistung mit $0{,}4\ {}^{p.u}/_{s}$ ändern kann. Das bedeutet, dass die Wirkleistung innerhalb von 60 Sekunden 100 % der Nennleistung erreichen kann. Die Blindleistung kann sich in der Wirklichkeit etwas schneller ändern und erreicht die volle Leistung innerhalb von 1 bis 5 Sekunden. Die Leistungsverläufe (Soll-Werte) werden mithilfe der Point-Funktionen erzeugt, welche als Teil 4 in der Abbildung 32 dargestellt sind. Zum aktuellen Stand des Projekts dienen die Funktionen als ein Hilfsmittel, um das Modell zu testen. Durch die Weiterentwicklung des Projekts können die zusätzlichen elektrischen Systeme an diesen Punkten angeschlossen und über die Leistungen verbunden werden.

Vor der Simulation müssen die Elemente in SIMSEN parametrisiert und die Anfangswerte eingetragen werden. Die Parameter der Elemente sind in den Tabellen 1, 2, 3, 5 und 7 dargestellt. Die Anfangswerte sollten zudem vor der Simulation festgelegt werden, um Einschwingvorgänge zu vermeiden, weil sie die Richtigkeit der Ergebnisse beeinflussen können. Zur Bestimmung der Anfangswerte bieten sich einige Methoden. Damit die Rechnungszeit der Werte einzusparen, wurden die Endzustände der Simulation gleich den Anfangszuständen eingestellt, die am Simulationsende in den Elementen gespeichert werden.

Für die Simulation der Leistungsverläufe wurde eine Betriebszeit von 300 Sekunden festgelegt, wobei die Integrationszeit 0,001 s beträgt, weil die kleinste Zeitkonstante des Mehrgrößenreglers $2 \cdot 10^{-3}$ s ist.

In der Abbildung 38 sind die Verläufe der Wirk- und Blindleistung zusammen mit den Soll-Werten der Leistungen dargestellt. Sie werden zwischen der Leitung und dem Transformator gemessen, wo die Regelung eingesetzt wird. Aus der Abbildung wird sichtbar, dass die Ist-Werte den Soll-Werten sehr gut folgen. Es ist des Weiteren erkenntlich, dass mit dem Mehrgrößenregler alle vier Quadranten erreicht werden können, ohne dabei instabil zu sein. Die Leistungsverläufe deuten auch darauf hin, dass die Werte entkoppelt eingestellt werden können.

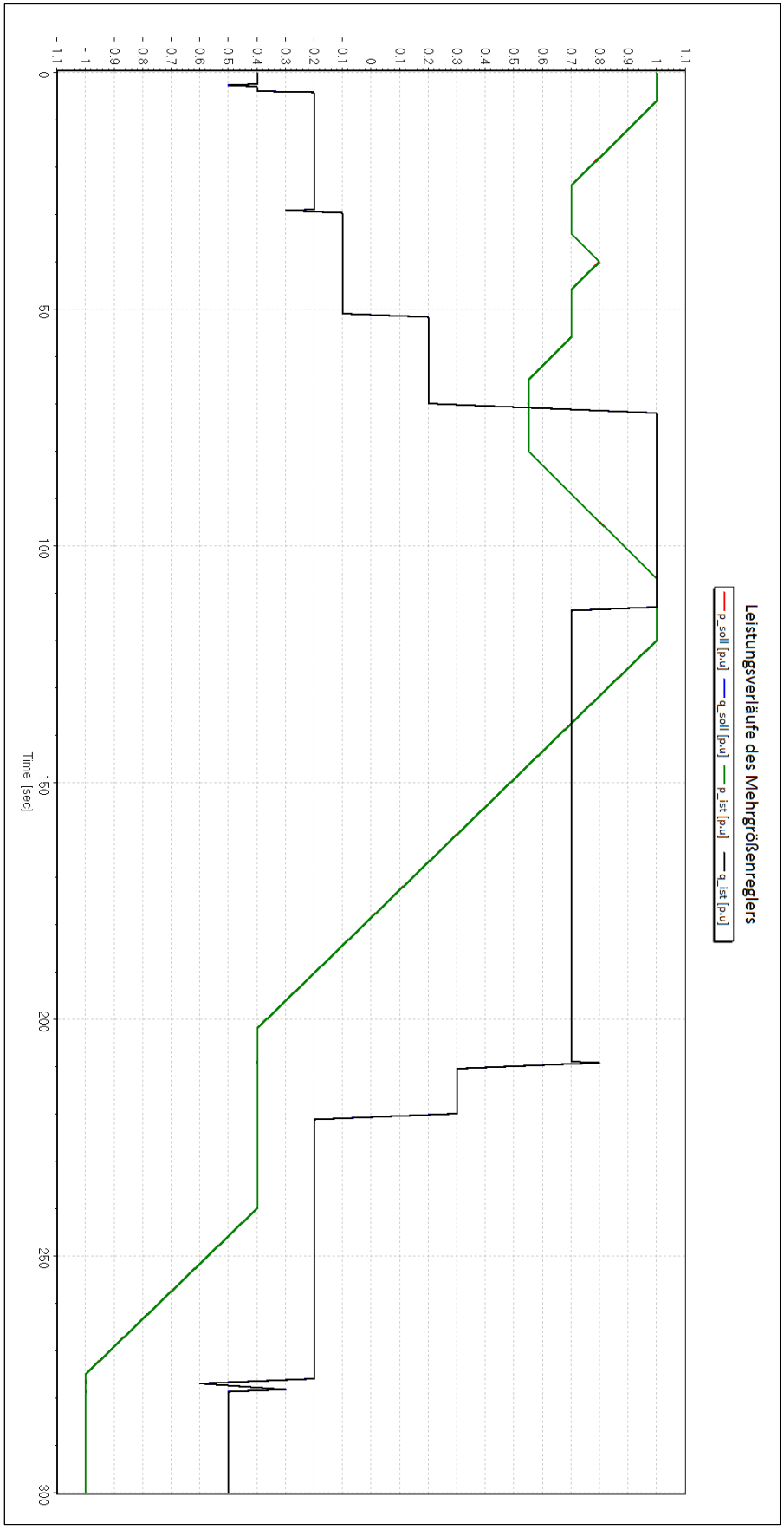

Abbildung 38: Leistungsverläufe zwischen Leitung und Transformator

Damit die Validierung des Modells vervollständigt wird, werden noch ausgewählte relevante Größen dargestellt. Für das Netz ist es wichtig, die Frequenz und die Amplitude der Spannung konstant zu halten, damit die Netzstabilität gewährgeleistet wird. Deshalb werden auch die Ströme und die Spannungen der Leistungsquelle kontrolliert, um festzustellen, dass die Frequenz dieser auch 50 Hz wie beim Netz ist und dass es keinen Gleichanteil gibt, der durch den Transformator entstehen könnte. In der Abbildung 41 sind die verlagerten Ströme an der Generatorseite des Transformators dargestellt, die auch bei korrekt eingestellten Leistungen auftreten können.

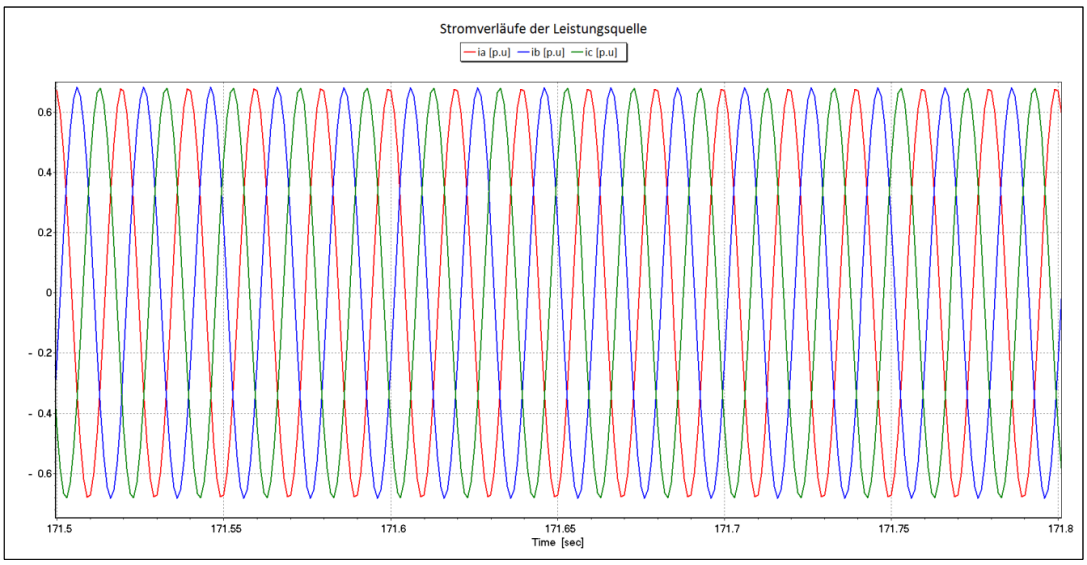

Abbildung 39: Ausschnitt der Stromverläufe der Leistungsquelle

Aus der Abbildungen 39 und 40 kann entnommen werden, dass die Frequenz der Ströme und der Spannungen, die aus der Leistungsquelle austreten, die Frequenz von 50 Hz besitzen, wobei kein Gleichanteil entsteht.

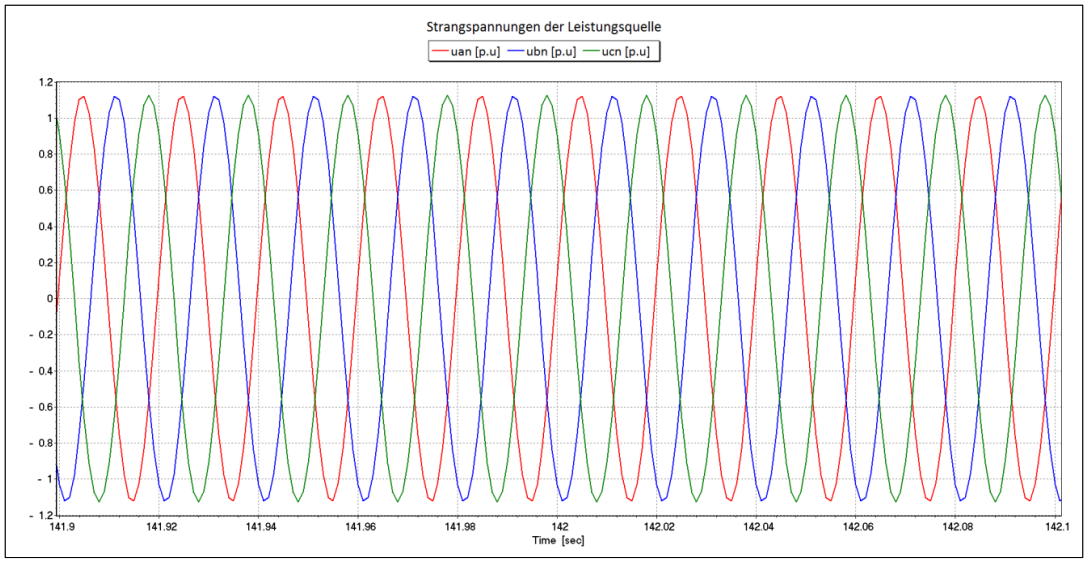

Abbildung 40: Ausschnitt der Strangspannungsverläufe der Leistungsquelle

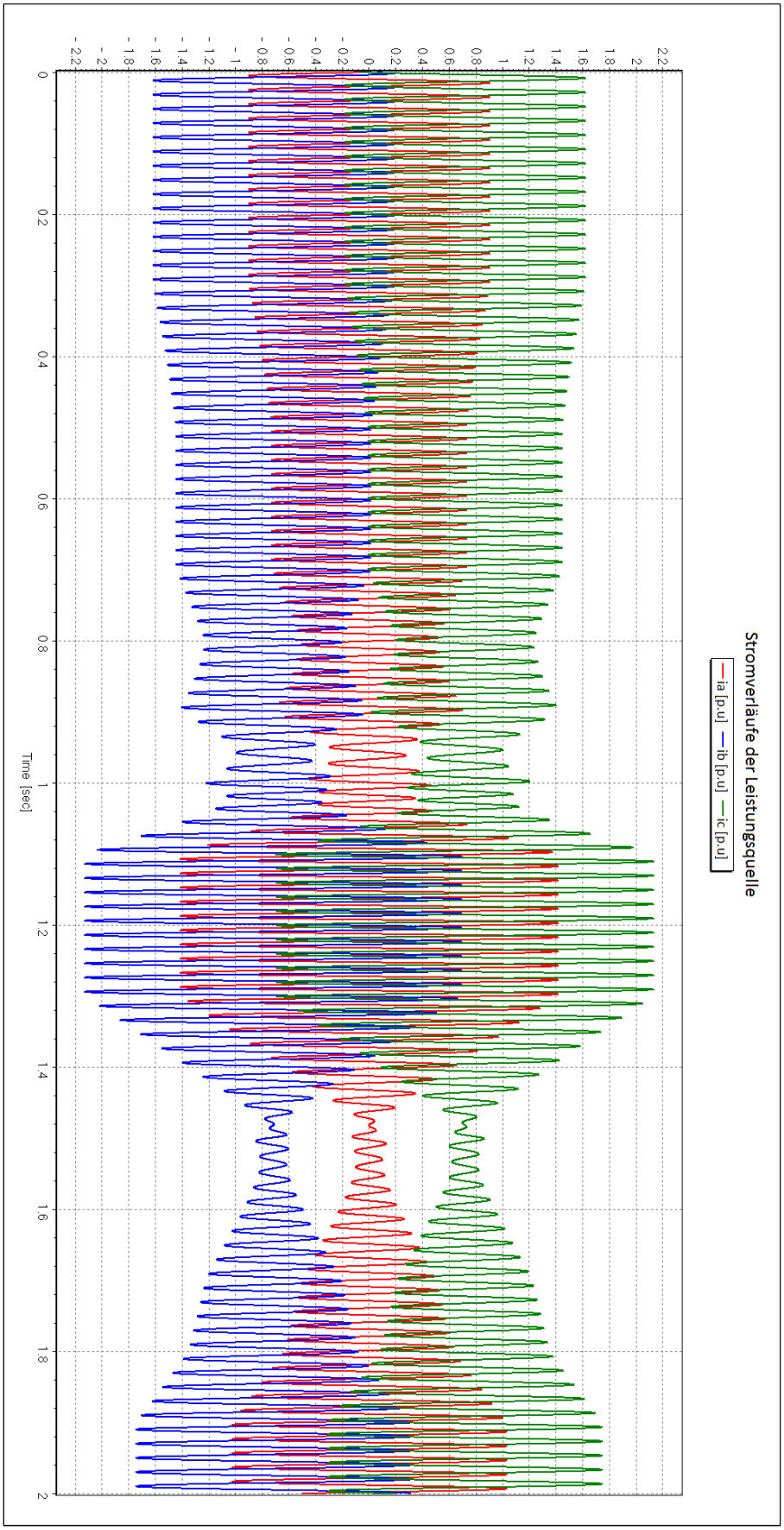

Abbildung 41: Zwischenzeitlich erhaltene unplausible Stromverläufe der Leistungsquelle

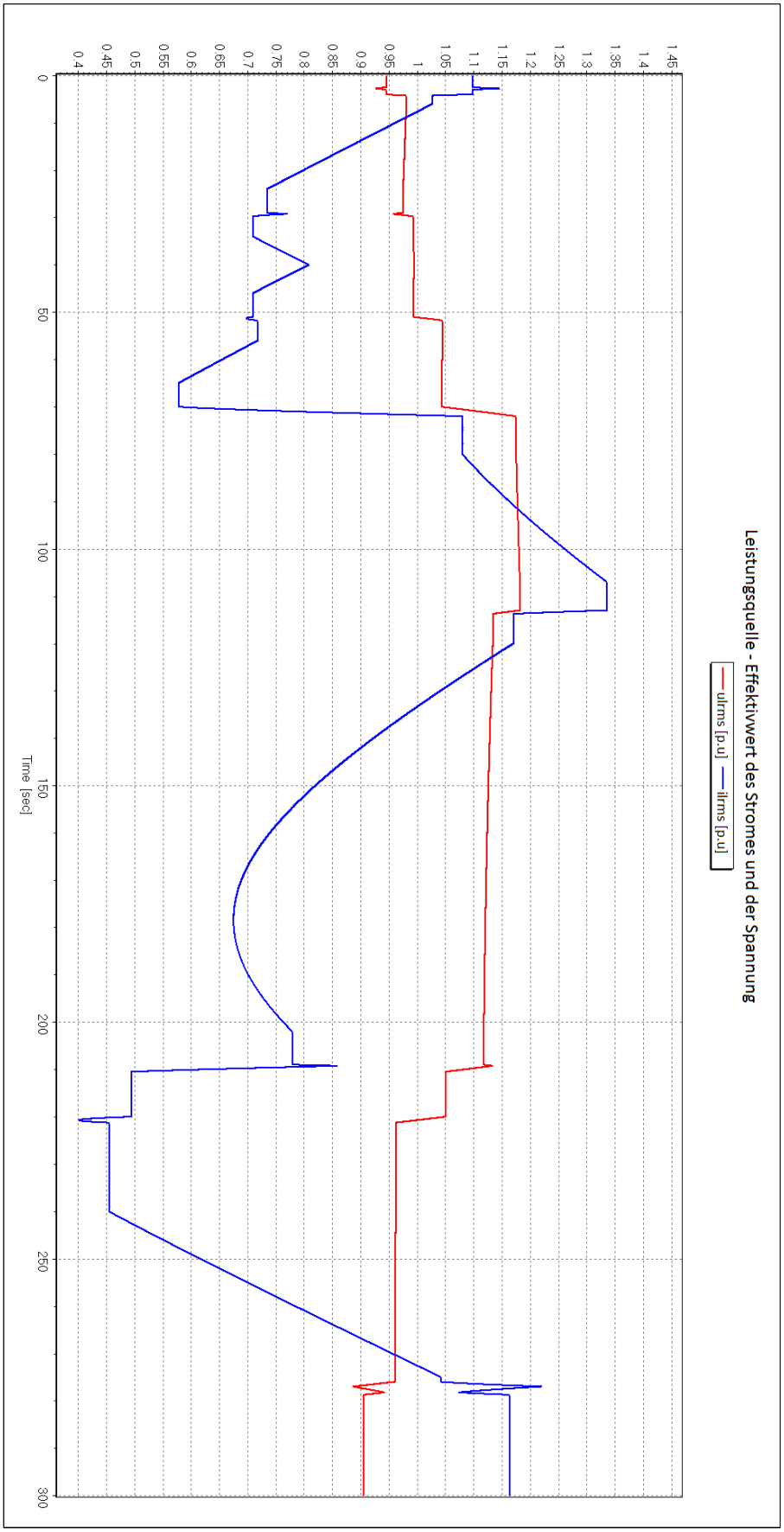

Abbildung 42: Leistungsquelle – Verläufe der Effektivwerte des Stromes und der Spannung

In der Abbildung 42 sind die Verläufe der Effektivwerte von der Spannung und dem Strom dargestellt. Die Werte sind natürlich nicht konstant, weil die Blindleistung über den Effektivwert der Spannung geregelt wird. Da auch der Winkel der Leistungsquelle geändert wird, stellt sich der Effektivwert des Stromes dementsprechend ein. Die Stromwerte sind auch von den Transformator- und Leitungsparametern abhängig.

In den Abbildungen 39 und 40 werden die Abschnitte der Verläufe skizziert, um eine bessere Übersicht zu erhalten. Die restlichen Verläufe der Spannungen und der Ströme sind durch die Effektivwerte aus der Abbildung 42 bestimmt. Während der gesamten Simulation behalten sie aber die Frequenz von 50 Hz bei. Die teilweise eckigen Verläufe aus den Abbildungen 39 und 40 entstehen durch die vergleichsweise lange Integrationszeit. Wird die Integrationszeit kürzer, so steigt die Genauigkeit der Ergebnisse und im Diagramm werden die richtigen und vollständigen Sinusverläufe abgebildet.

Der Einsatz des Mehrgrößenreglers zwischen der Leitung und dem Transformator bedeutet, dass die gewünschten Leistungen an der Primärseite des Transformators eingestellt werden. Sie werden folglich in die Leitung eingespeist und haben das gleiche Vorzeichen wie die Soll-Werte der Wirk- und Blindleistung. Die Leistungen, die aus der Leistungsquelle herauskommen, ändern sich im Vergleich zu den Leistungen an der Primärseite des Transformators, weil am Transformator einige Verluste entstehen, die hauptsächlich durch die hohe Hauptreaktanz hervorgerufen werden. Deswegen manifestieren sich die Verluste überwiegend an der Blindleistung, was in der Abbildung 43 dargestellt ist. Der Unterschied zwischen den Leistungen am Einsatzort der Regelung und den Leistungen von der Leistungsquelle hängt auch von der Auslastung des Transformators ab.

Es werden auch etwas andere Leistungen in das Netz eingespeist, weil sie über eine Leitung übertragen werden. Dort treten auch Verluste auf, die in diesem Fall von dem Leitungsparameter abhängig sind. Die Verluste zeichnen sich leitgebend durch die Blindleistung ab, was in der Abbildung 44 dargestellt ist.

In der Abbildung 45 sind die Gesamtverluste über den Transformator und die Leitung visualisiert. Es ist auffällig, dass die Verluste der Wirkleistung deutlich kleiner als die von der Blindleistung sind. Das liegt daran, dass die Blindleistungsverluste durch die Reaktanz und die Wirkleistungsverluste durch den Widerstand beeinflusst werden (Gleichungen (5.12) und (5.14)[14]), wobei die Reaktanz viel größer als der Widerstand der Strecke ist.

$$P_V = \frac{R_N \cdot U \cdot U_N}{{Z_N}^2} \cdot \left(\frac{U}{U_N} + \frac{U_N}{U} - 2 \cdot \cos\delta\right) \tag{5.13}$$

$$Q_V = \frac{X_N \cdot U \cdot U_N}{{Z_N}^2} \cdot \left(\frac{U}{U_N} + \frac{U_N}{U} - 2 \cdot \cos\delta\right) \tag{5.14}$$

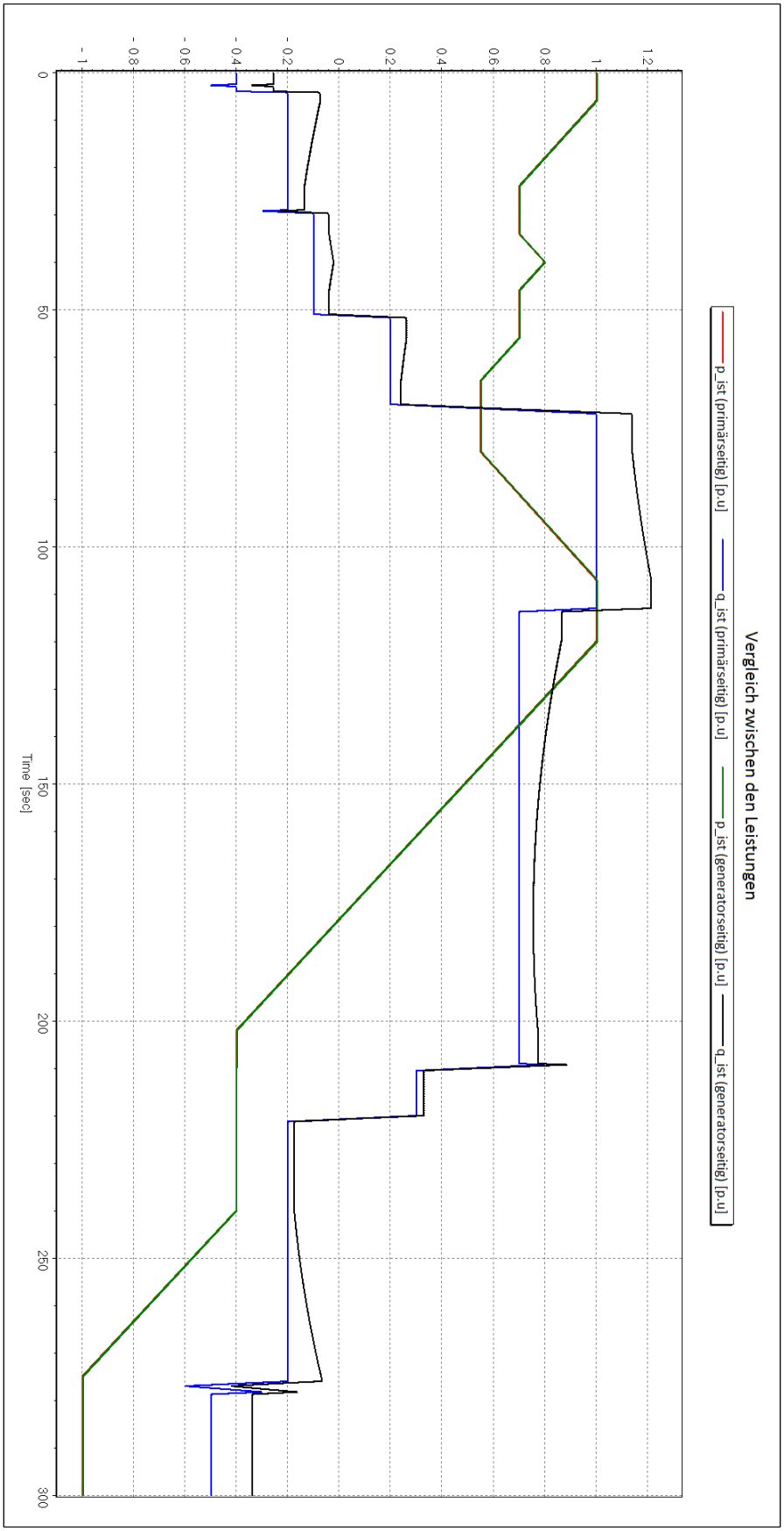

Abbildung 43: Vergleich zwischen den Leistungen an der Primärseite und der Sekundärseite des Transformators

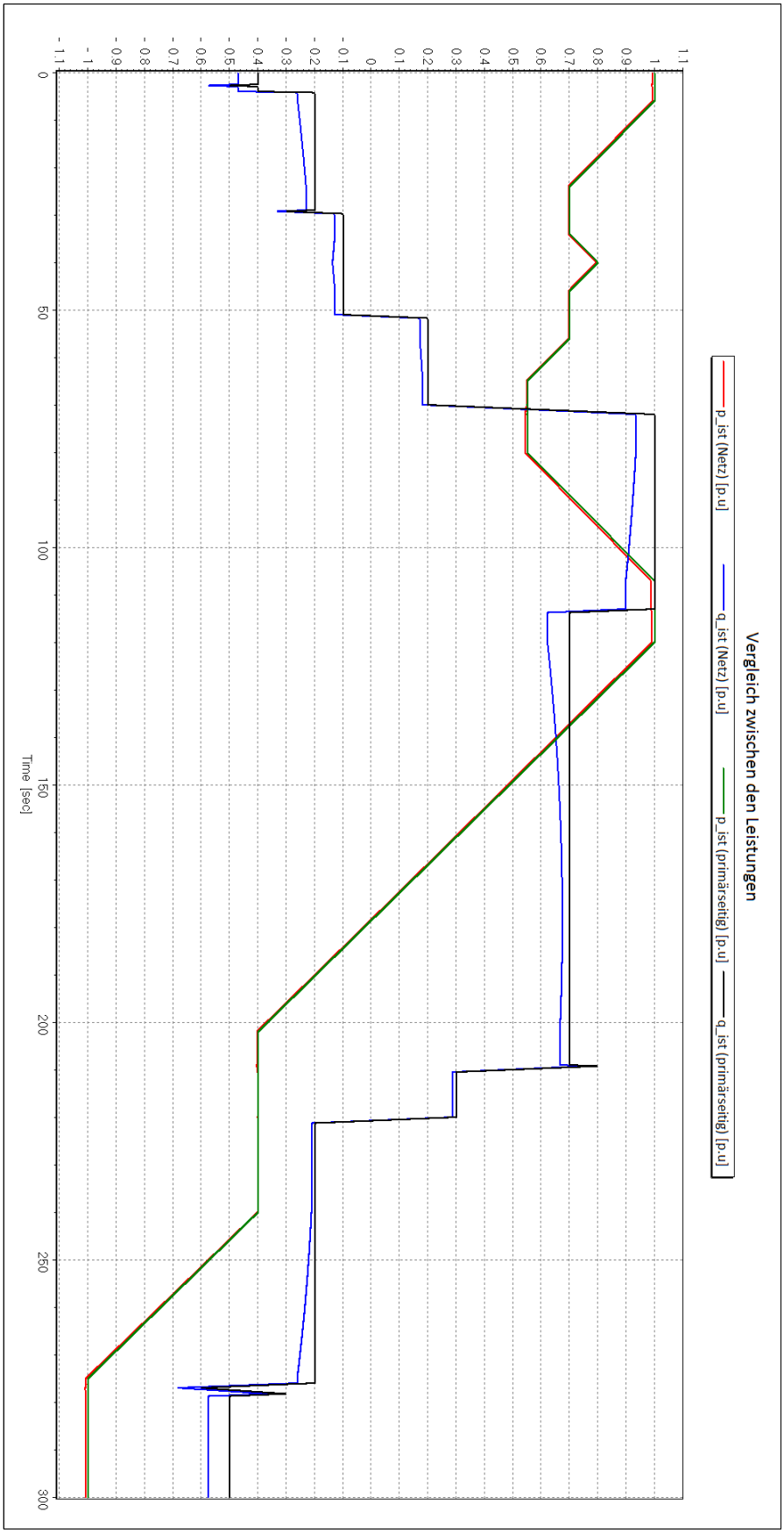

Abbildung 44: Vergleich zwischen den Leistungen an der Primärseite des Transformators und dem Netz

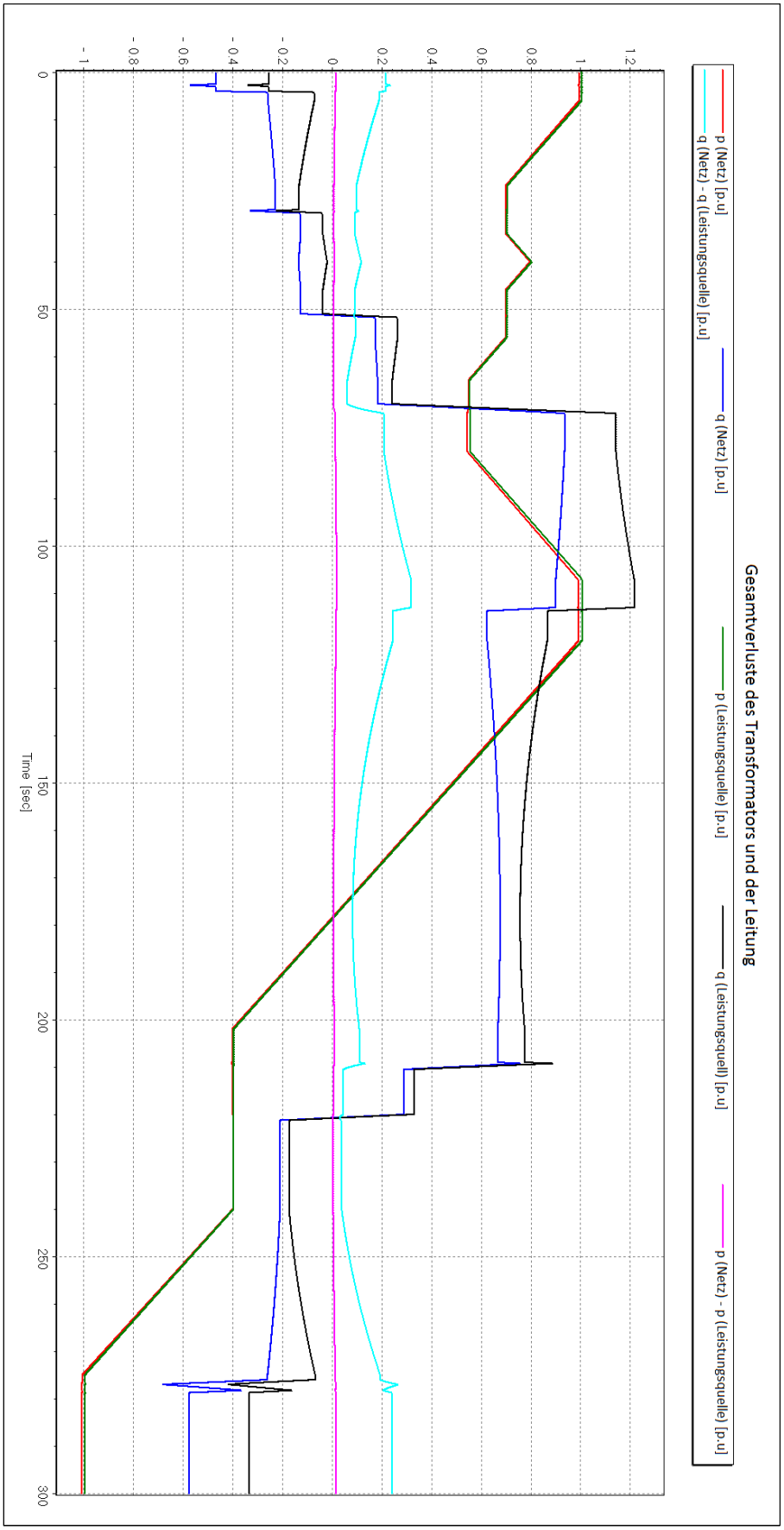

Abbildung 45: Leistungsverluste zwischen der Leistungsquelle und dem Netz

Wie bereits erwähnt wurde, müssen die Frequenz und die Spannungsamplitude des Netzes während des Betriebs konstant gehalten werden. Da das Netz als "Infinite Bus" in der Software realisiert wurde, sind diese Anforderungen erfüllt. In den Abbildungen 46 und 47 sind die kurzen Abschnitte der Verläufe von den Strömen und Strangspannungen dargestellt, woraus auch ersichtlich wird, dass die Frequenz für beide Größen 50 Hz ist. Die Verläufe des Effektivwerts der Spannung und des Stromes aus der Abbildung 48 zeigen, dass die Spannungsamplitude während der Betriebsdauer konstant gehalten wurde. Die Amplitude des Stromes ändert sich natürlich in Abhängigkeit von den eingestellten Leistungen, die über die Spannungsamplitude und den Winkel der Leistungsquelle geregelt werden.

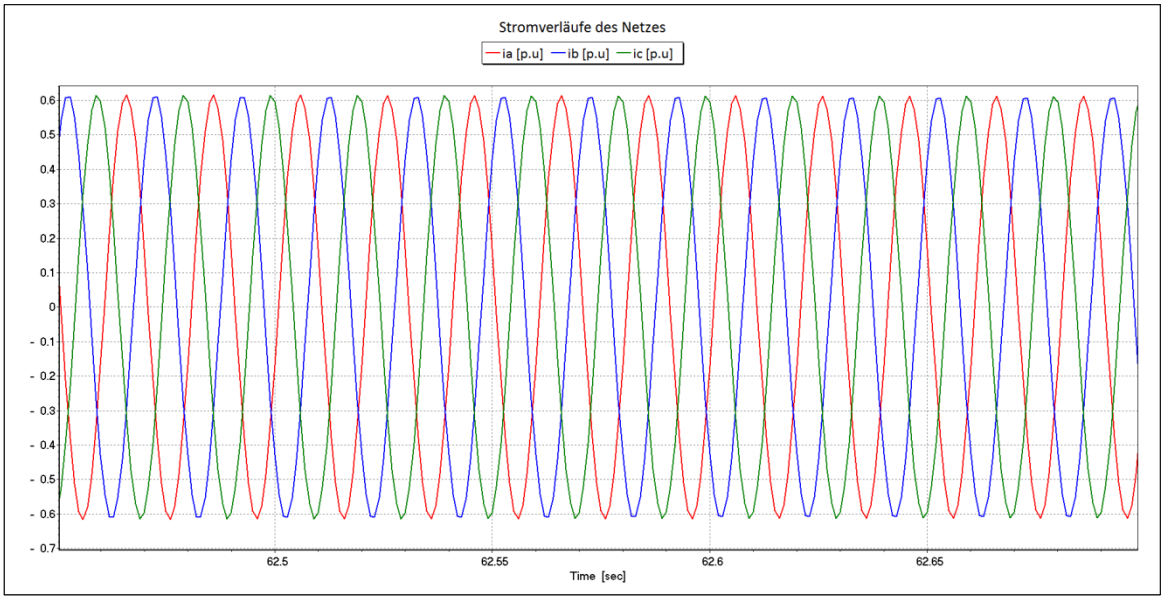

Abbildung 46: Ausschnitt der Stromverläufe des Netzes

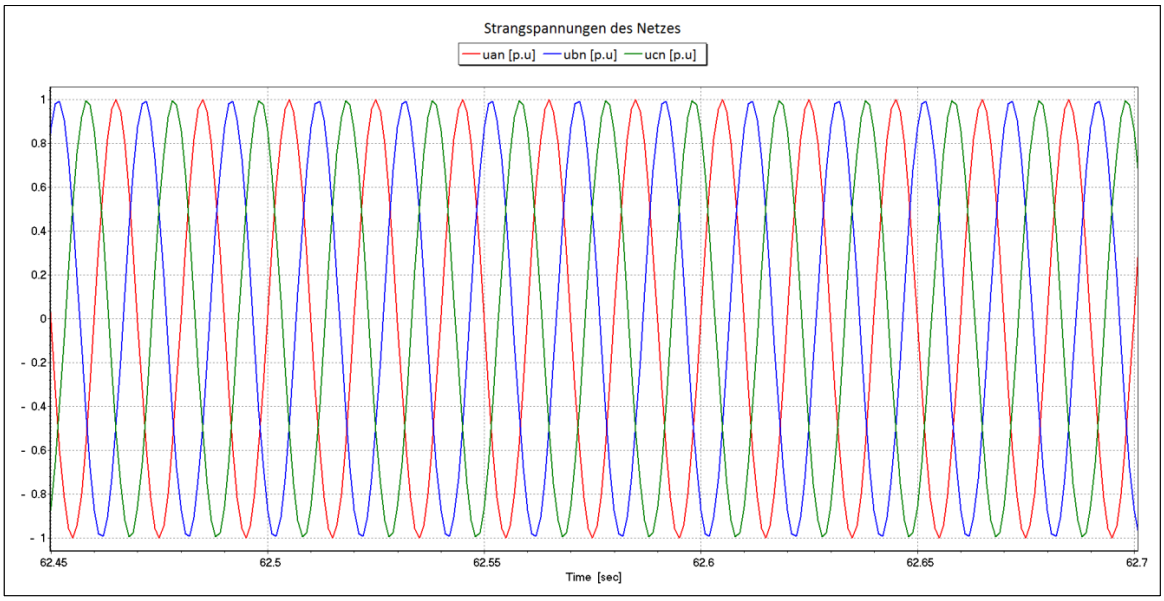

Abbildung 47: Ausschnitt der Strangspannungsverläufe des Netzes

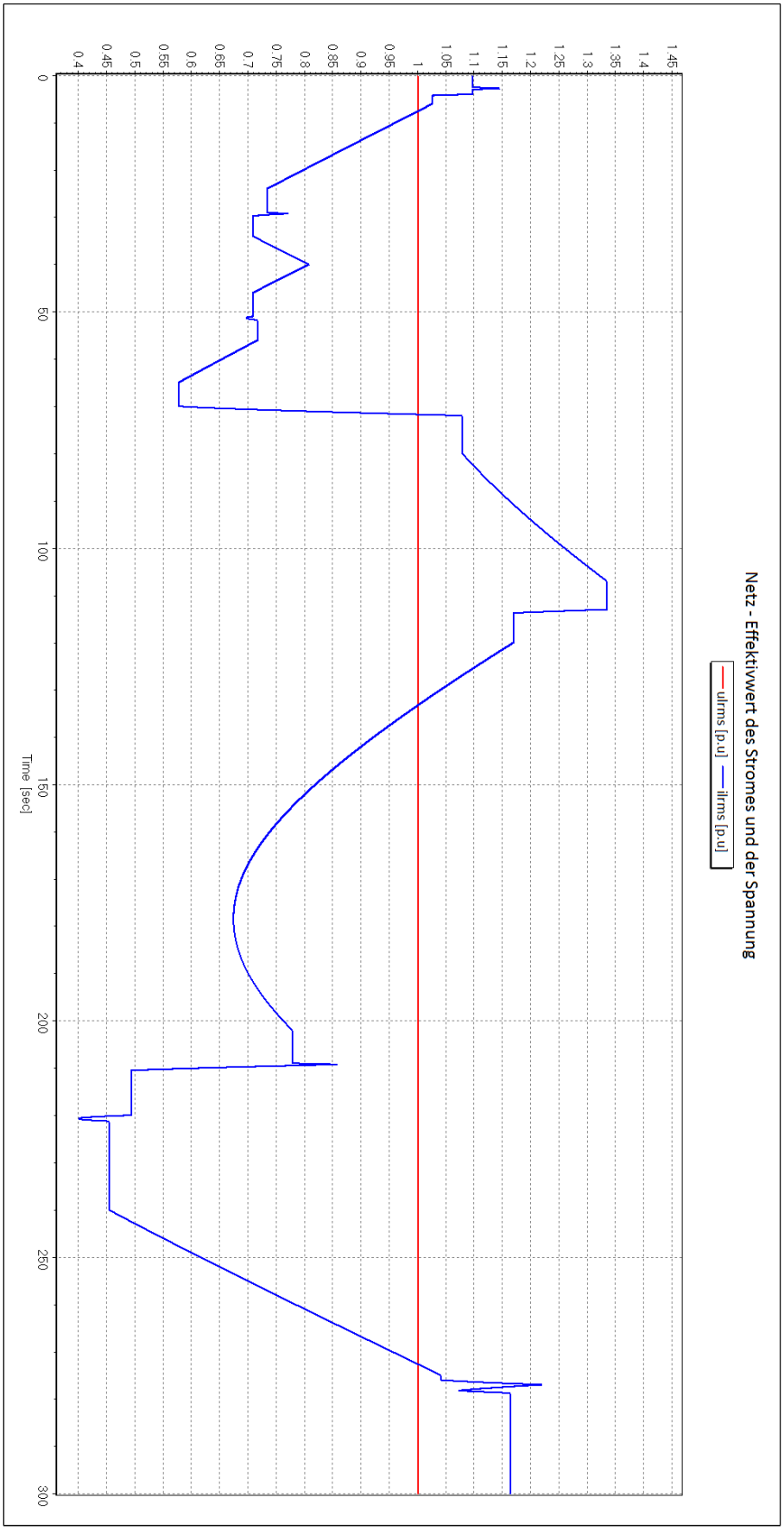

Abbildung 48: Netz - Verläufe der Effektivwerte des Stromes und der Spannung

Alle Ergebnisse, die in den vorherigen Abbildungen dargelegt wurden, deuten darauf hin, dass das elektrische Teil des Modells als valid angenommen werden kann.

Im zweiten Schritt der Validierung wird die Schnittstelle für das hydraulische System analysiert. Die Ausführung und die Parametrisierung des Teils werden im Kapitel 5.2.2 detailliert erklärt. Mithilfe der Point-Funktion wird der Verlauf der mechanischen Leistung gebildet, die dann in das mechanische Moment umgerechnet und an die drehende Masse übergeben wird. Auch die Solldrehzahl, die während der Simulation auf der Nenndrehzahl eingestellt ist, wird mit der Point-Funktion realisiert.

Wenn die beiden Leistungen bzw. Momente gleich sind, ändert sich die Drehzahl nicht und der Droop-Regler bleibt inaktiv, was in der Abbildung 50 sichtbar ist. Die Drehzahlabweichung tritt auf, wenn sich die Leistungen bzw. die Momente voneinander unterscheiden. Dies wird mit einem P-Regler kompensiert, wodurch die zusätzliche Leistung zur mechanischen Leistung addiert oder subtrahiert wird, was davon abhängig ist, ob die mechanische Leistung kleiner oder größer als die elektrische Leistung ist. Die maximale Abweichung liegt wie erwartet bei 2,3 % (Abbildung 49) und ist deutlich kleiner als die maximal zulässige Abweichung. Für die Simulation wurde angenommen, dass sich die mechanische Leistung mit dem Gradienten $0{,}05\ {}^{p.u}/_{s}$ ändert.

In einer weiteren Simulation wurde die Solldrehzahl geändert, wobei die Leistungen konstant gehalten wurden. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 51 dargestellt, woraus erkennbar ist, dass der Ist-Wert sehr gut dem Soll-Wert folgt. Der gewünschte Wert der Drehzahl wird mit dem Droop-Regler in Form der zusätzlichen Leistung eingestellt.

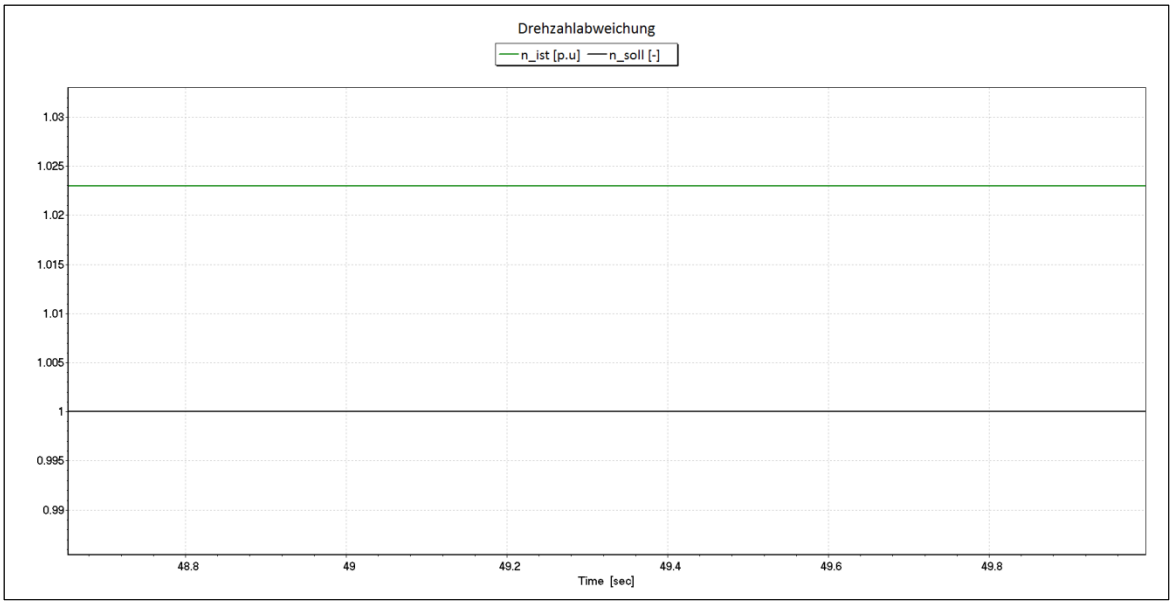

Abbildung 49: Drehzahlabweichung mit aktiviertem Droop-Regler

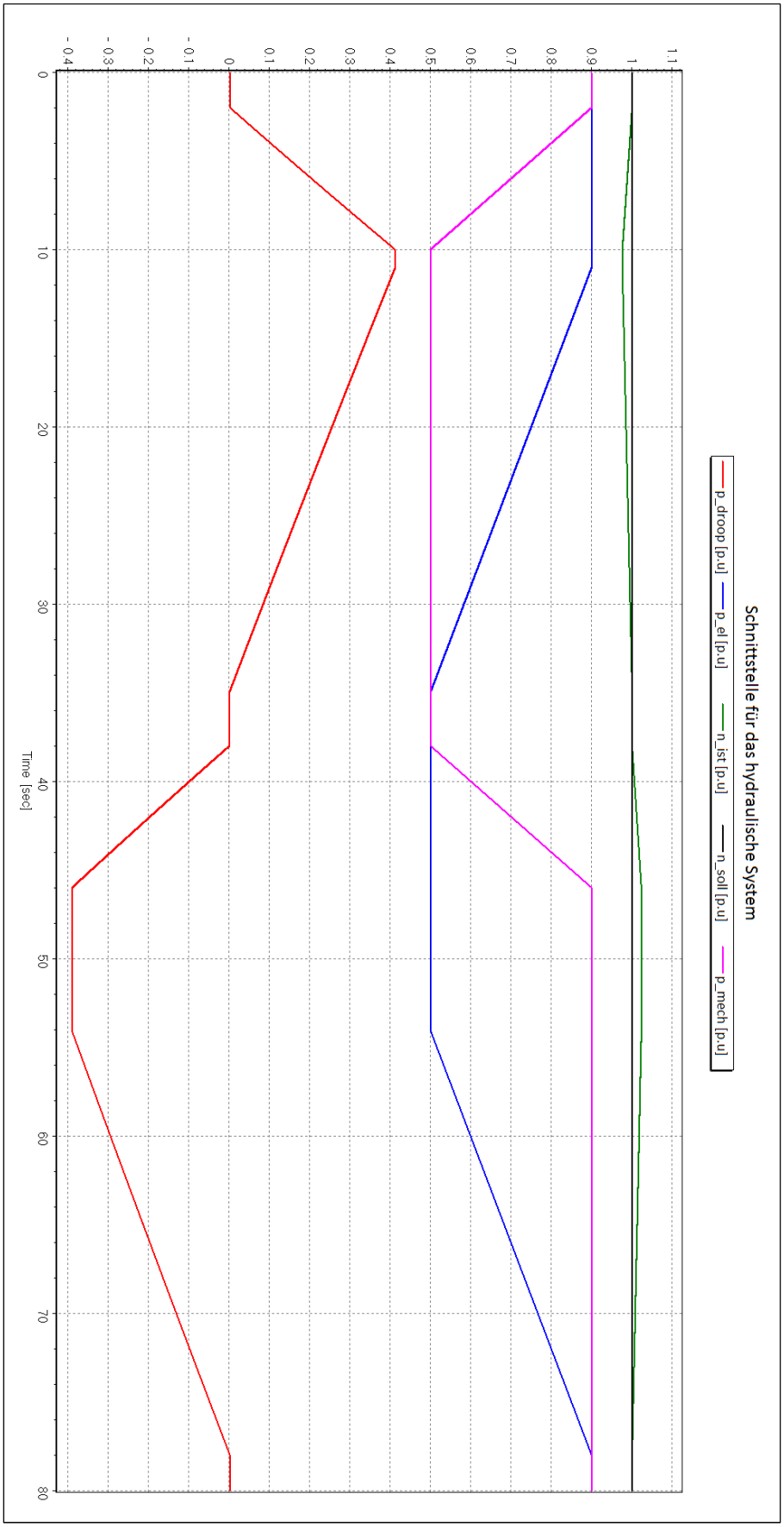

Abbildung 50: Simulation der Schnittstelle für das hydraulische System

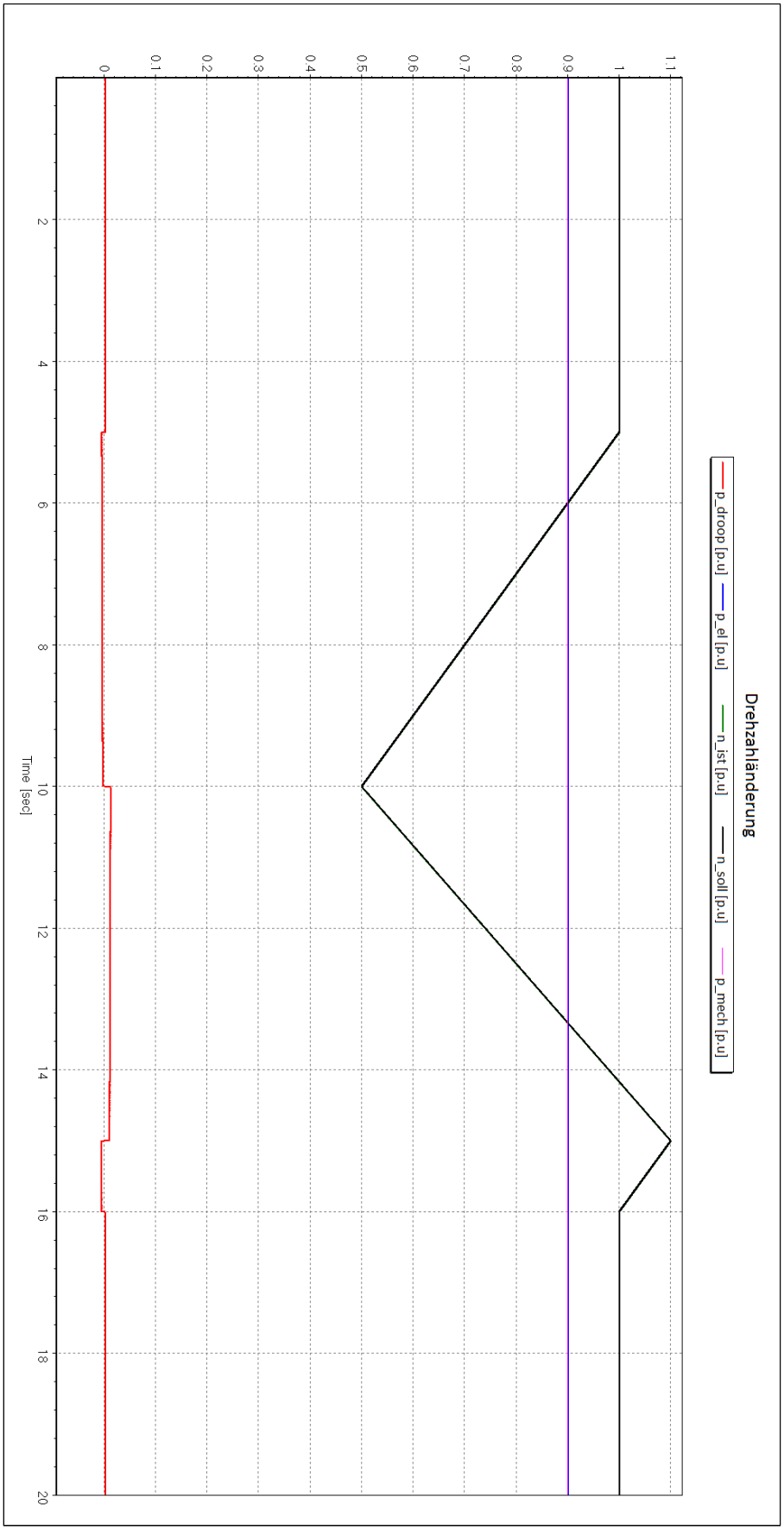

Abbildung 51: Drehzahländerung bei der Schnittstelle für das hydraulische System

Die gewonnenen Ergebnisse aus den Simulationen des mechanischen Systems zeigen, dass auch die Schnittstelle für das hydraulische System erwartete und vernünftige Verläufe erzeugt.

Mit dem zusätzlichen Schritt der Validierung werden verschiedene Störungen im Modell erzeugt, um die Reaktionen zu analysieren und zu bewerten.

Als Erstes wird die Schnittstelle für das hydraulische System beim Auftreten der Störungen simuliert, die sich durch die volle Entlastung der Masse manifestieren. Wenn die Differenz zwischen dem elektrischen und dem mechanischen Moment bzw. der Leistung 100 % ist, sollte eine Drehzahlabweichung von maximal 6 % vorhanden sein.

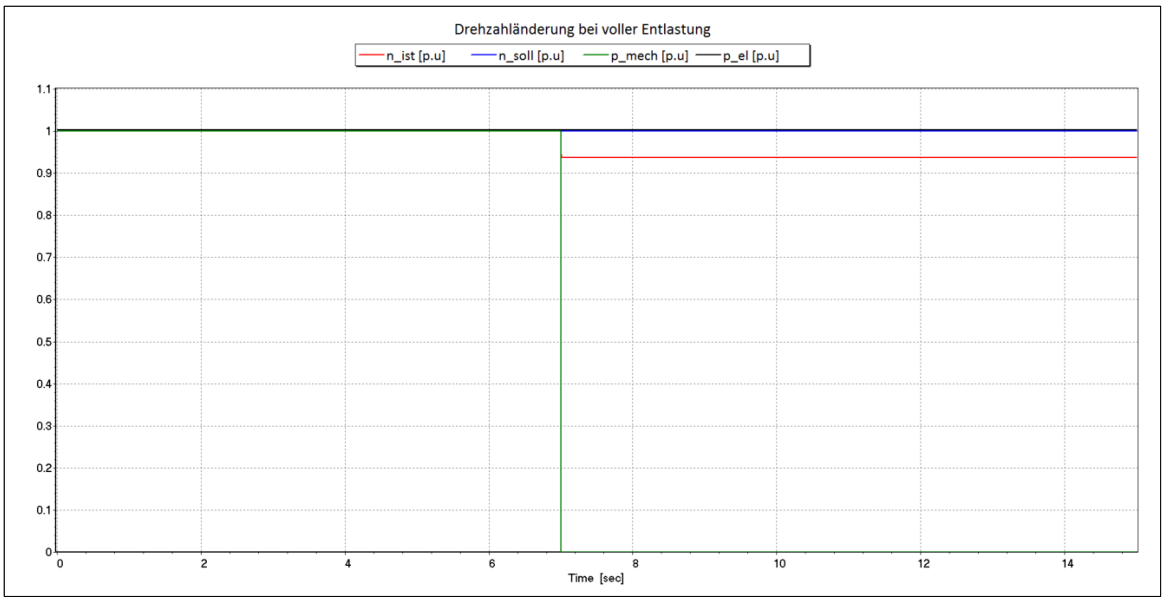

Abbildung 52: Volle Entlastung der drehenden Masse

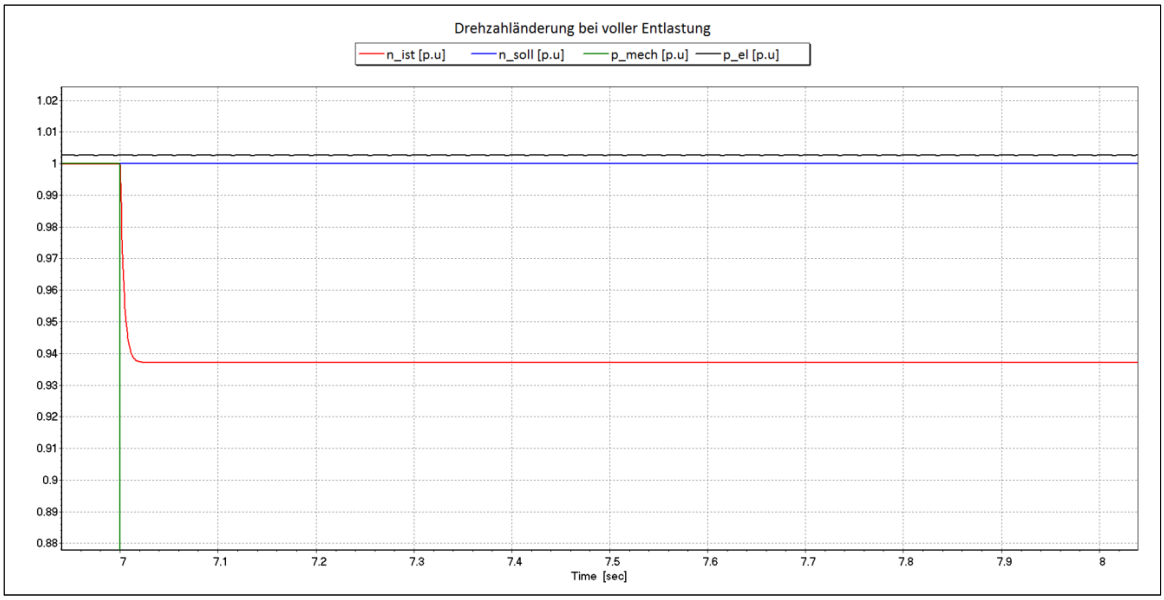

Abbildung 53: Drehzahlabweichung bei der vollen Entlastung

In der Abbildung 52 wurden die Ergebnisse der vollen Entlastung der Masse dargestellt. In diesem Fall ändert sich die mechanische Leistung bzw. das Moment sprungartig von 100 % auf 0 %, wobei das elektrische Moment konstant gehalten wurde. Die elektrische Leistung, die von der Leistungsquelle eingespeist wird, liegt geringfügig über 100 %, weil die Regelung an der Primärseite des Transformators eingesetzt wurde. Die Drehzahlabweichung in der Abbildung 53 liegt dabei unbeträchtlich über 6 %, weil auch die Differenz zwischen den Momenten nicht genau 100 % beträgt.

Eine solche Realisierung der Schnittstelle für das hydraulische System dient der Vorbereitung, damit das Modell getestet werden kann, wodurch zufriedenstellende Ergebnisse gewonnen wurden. Im Projektverlauf wird die Verbindung mit dem hydraulischen System über die mechanische Leistung bzw. dem Moment der drehenden Masse ausgeführt werden, wobei der Droop-Regler durch einen Turbinenregler ersetzt wird.

Für die Auswertung der Ergebnisse wurden auch ausgewählte Störungen für die Wirk- und die Blindleistung simuliert. Im ersten Fall wird die sprungartige Änderung der Wirkleistung analysiert, um festzustellen, wie sich solche Störungen auf die anderen Größen auswirken.

In der Abbildung 54 ist ein sprungartiger Abfall der Wirkleistung von 20 % dargestellt. Es ist sichtbar, dass sich eine solche Störung in den Ist-Werten der Wirk- und Blindleistung manifestiert, was durch kurzfristige Schwingvorgänge abgebildet wird. Die Auswirkung auf die Blindleistung resultiert aus der Kopplung mit der Wirkleistung, die durch den Mehrgrößenregler nicht ganz aufgehoben sein kann. Da die Dynamik der Regelung relativ schnell ist, werden die Schwingungen in ca. 0,6 s kompensiert und die Ist-Werte erreichen ihre Soll-Werte. In den Abbildungen wird der generatorseitige Strom einer Phase dargestellt, der in allen Fällen plausible Resultate liefert.

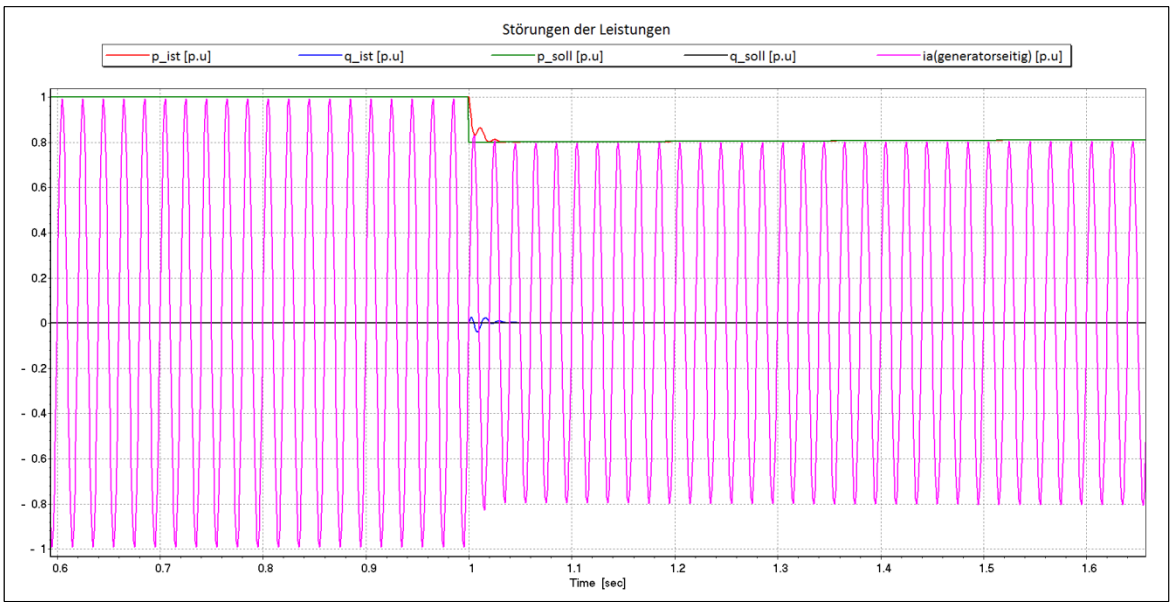

Abbildung 54: Sprungartige Änderung der Wirkleistung um 20 %

Eine Änderung der Wirkleistung von 50 % (Abbildung 55) löst eine höhere Schwingung der Blind- und der Wirkleistung aus, was aber schnell innerhalb von ca. 0,6 s ausgeglichen wird. Die Höhe der Störungen ist durch die großen Verstärkungen bei den Reglern bestimmt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass der Regler beim Auftreten solcher Störungen stabil wird.

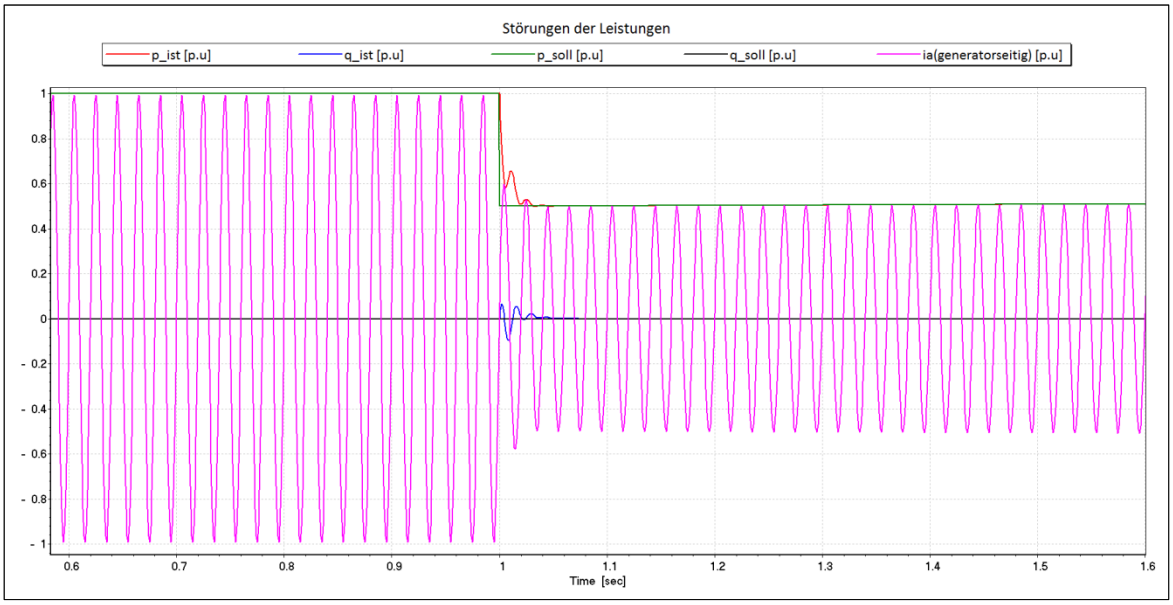

Abbildung 55: Sprungartige Änderung der Wirkleistung um 50 %

Das Schwingen der Wirkleistung wirkt sich ebenso auf die drehende Masse aus, weil daraus das elektrische Moment ausgerechnet wird. Aus der Abbildung 56 wird ersichtlich, dass solche Störungen wenige Effekte auf die Drehzahl verursachen, die mit dem Droop-Regler gut bezwungen werden können.

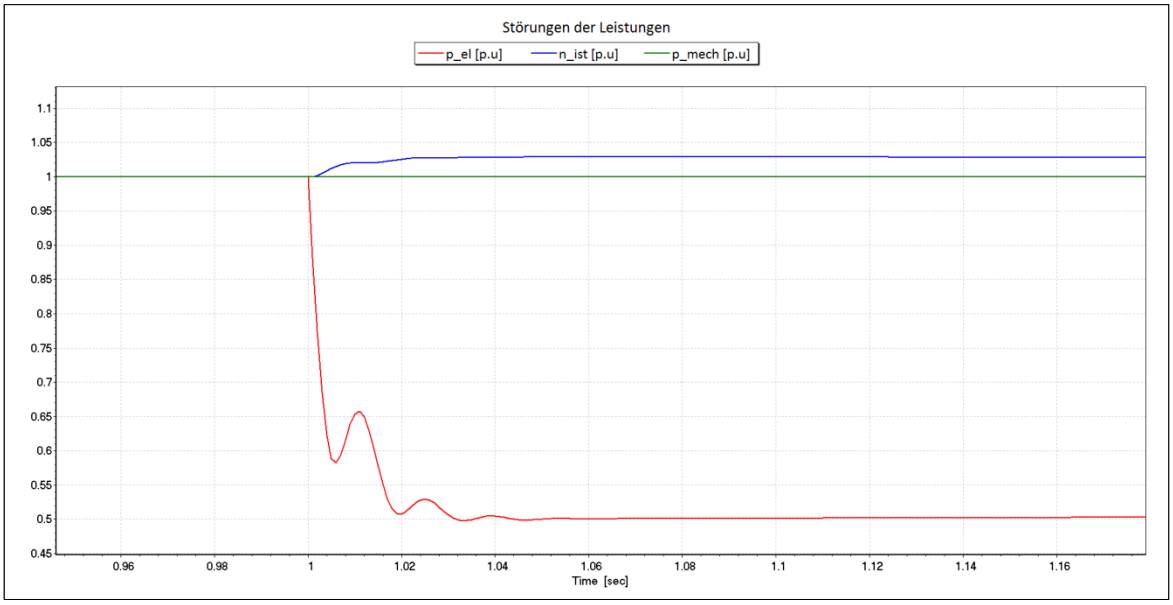

Abbildung 56: Auswirkung der sprungartigen Änderung der Wirkleistung auf die Drehzahl

Eine ähnliche Störung wurde auch für die Blindleistung untersucht, wobei die Blindleistung um 20 % (Abbildung 57) bzw. um 50 % (Abbildung 58) sprungartig steigt. Die gleichen Effekte treten auch in dem Fall auf, dessen Auswirkungen auf die Richtigkeit des Modells vernachlässigbar klein sind.

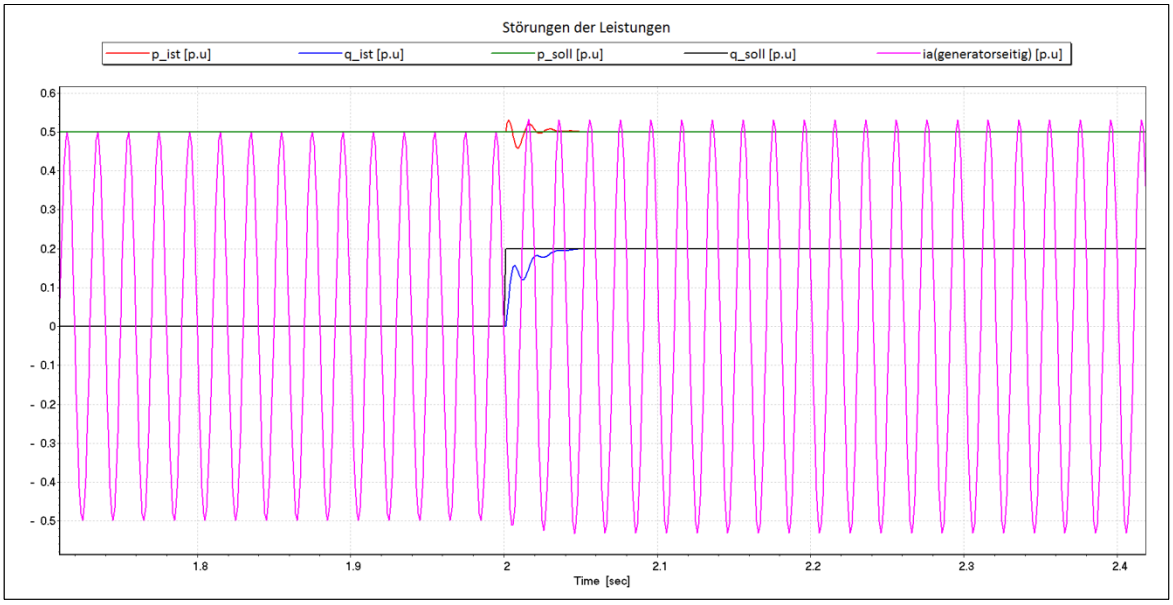

Abbildung 57: Sprungartige Änderung der Blindleistung um 20 %

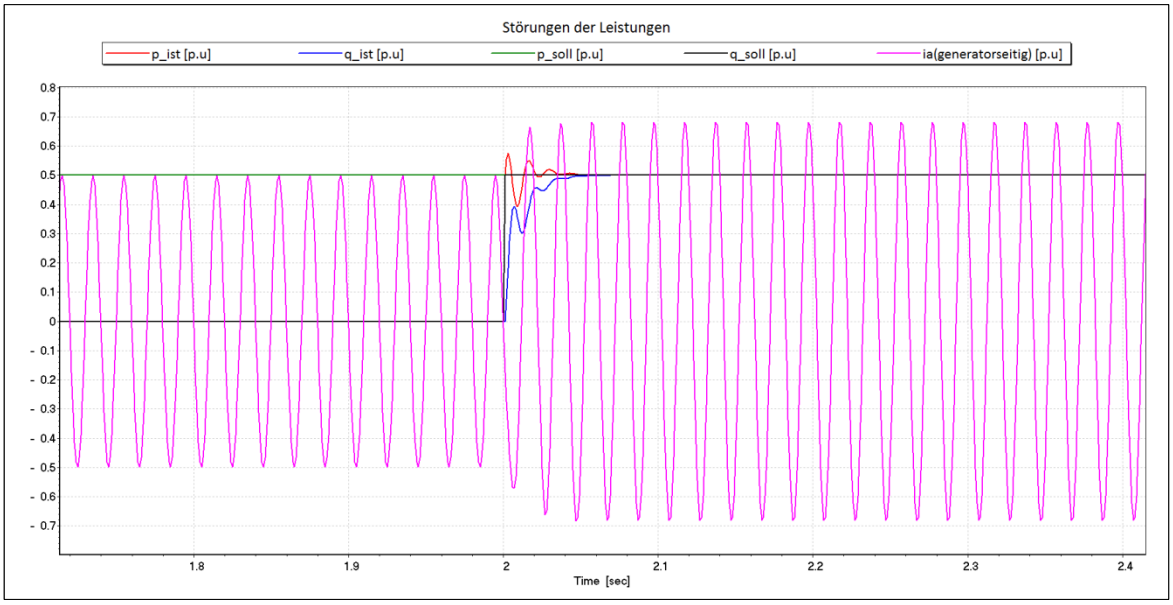

Abbildung 58: Sprungartige Änderung der Blindleistung um 50 %

Aus den ersten zwei Schritten der Validierung kann angenommen werden, dass das Modell mit der Leistungsquelle mit den eingestellten Parametern und den festgelegten Gradienten der Leistungen plausible und erwartete Resultate liefert. Auch beim Auftreten verschiedener Störungen entstehen einige Effekte, die mit den eingesetzten Reglern rasch behoben werden, ohne dass Instabilitäten auftreten. Dadurch könnte das Modell nur validiert werden. Für die Verifikation des Modells sollten die gewonnenen Ergebnisse mit den Messungen einer Anlage mit den gleichen Parametern verglichen werden, welche für die Diplomarbeit nicht zur Verfügung standen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Währen der Diplomarbeit ergaben sich viele Vorteile der drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerke, die besonders für die Stabilität des Netzes nutzbringend sind. Diese Vorzüge sind nicht nur für die drehzahlvariablen Wasserkraftwerke, sondern auch für die Windkraftanlagen, die mit einer ähnlichen Technologie ausgeführt werden, einsetzbar, wodurch die Windkraft besser ausgenutzt wird. Der Einsatz und die Verbindung solcher Einheiten mit den anderen Kraftwerken ermöglichen eine bessere Ausgangsposition für die Anforderungen, welche in der Zukunft durch die steigende Anzahl der erneuerbaren, fluktuierenden Erzeugungsanlagen auftreten könnten. Die Optimierung der Einsatzstunden und der Interaktion zwischen den eingesetzten Anlagen könnte die Qualität des elektrischen Energiesystems verbessern.

Um die Ziele der Diplomarbeit zu erfüllen, wurden einige Modelle eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks analysiert, damit ein einfaches Modell in SIMSEN realisiert werden konnte. Da das Modell mit einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine, die mit einem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter ausgeführt ist, die meisten Vorteile bietet, wurde versucht, ein solches Modell auch in SIMSEN zu implementieren. Die kleine Integrationszeit, die komplexen Filter und die aufwendige Regelung sind die Gründe, weswegen das Modell für die Erfüllung der Ziele der Diplomarbeit nicht geeignet war. Mit einem pseudo-kontinuierlichen Modell könnte die Integrationszeit vergrößert und die Simulationsdauer um Faktor 60 beschleunigt werden, wobei die Umrichter durch die gesteuerten Spannungsquellen realisiert wurden. Durch den Einsatz eines solchen Modells fallen die komplexen Filter aus, aber die komplexe Regelungsstruktur wird erhalten.

Ein WT3G1-Modell bietet eine einfachere Regelung, die über die reale und imaginäre Komponente des Stromes erfolgt. Im Modell wird eine Stromquelle eingesetzt, die den Generator und die Umrichter eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks ersetzt. Da die Stromquelle als ein fertiges Element nicht in der Software vorhanden ist, wurde versucht, sie als eine geregelte Spannungsquelle zu realisieren, wobei die Phase und die Amplitude des Stromes eingestellt werden sollten. Durch die mathematische und grafische Analyse des Systems wurde festgestellt, dass die zwei Komponenten sehr stark aneinander gekoppelt sind, weswegen die Realisierung der Stromquelle in SIMSEN nicht möglich war.

Die weitere mathematische Analyse des Systems hat darauf verwiesen, dass auch die Blind- und die Wirkleistung stark verbunden sind, wobei es möglich war, die zwei Größen mit dem Einsatz eines Mehrgrößenreglers zu entkoppeln. Daraus formte sich die Idee, ein Modell mit der Leistungsquelle in SIMSEN zu realisieren, wobei die Wirk- und die

Blindleistung für die Verbindung mit den anderen elektrischen Systemen verwendet werden. Da in der Software eine Leistungsquelle als ein fertiges Element nicht verfügbar ist, wurde sie als eine geregelte Spannungsquelle entworfen. Die Wirkleistung wird über die Phase und die Blindleistung über die Amplitude der Spannung eingestellt. Der eingesetzte Mehrgrößenregler besteht aus vier PI-Regler, bei denen die Parameter empirisch mit dem Einlegen eines Sprunges (Soll-Wert) am Eingang der Regler bestimmt wurden. Die Integrationszeit für die Simulation beträgt 10^{-3} s, weil auch einige Zeitkonstanten der PI-Regler in dieser Größenordnung vorliegen. Dadurch wurde eine kürzere Simulationsdauer als mit dem Modell mit dem Drei-Punkt-Umrichter erreicht.

Mit dem Variieren der Leitungsparameter wurde ein breiterer Arbeitsbereich festgestellt, in dem das Modell plausible Ergebnisse liefert und in dem der Regler stabil ist. Mit den eingestellten Parametern des Reglers ist es möglich, das Modell über eine Freileitung bis zu 330 km mit dem Netz zu verbinden.

Die Schnittstelle für das hydraulische System musste in das Modell eingebaut werden, wobei die Verbindung über das mechanische Moment erfolgt, das ein hydraulisches System zur Verfügung stellt. Die elektrische Leistung aus der Quelle wird für das elektrische Moment verwendet, das an eine drehende Masse als Bremsmoment übergeben wird. Die drehende Masse stellt im Modell eine Turbine dar. Damit das System getestet werden konnte, wurde ein Droop-Regler implementiert, womit die Drehzahlabweichung kontrolliert wird. Der Regler schaltet sich ein, wenn der Momenten- bzw. Leistungsunterschied zwischen zwei Systeme auftritt, damit eine festgelegte Drehzahlabweichung nicht überschritten wird.

Nach der Implementierung aller Teile wurde das Modell in drei Schritten validiert. In den ersten zwei Schritten wurden die elektrischen und die mechanischen bzw. hydraulischen Teile getestet. Abschließend wurden Störungen im Form von sprungartigen Änderungen simuliert und analysiert. Die daraus gewonnenen Ergebnisse verweisen darauf, dass das Modell mit der Leistungsquelle wie erwartet reagiert.

Das realisierte Modell mit der Leistungsquelle ermöglicht die Analyse des elektrischen Systems und seine Auswirkungen auf das hydraulische System. Die Effekte, die im hydraulischen System auftreten, manifestieren sich nicht auf den elektrischen Teil des Modells. Die Optimierung und die Weiterentwicklung des Modells durch eine sinnvolle Verbindung zwischen den zwei implementierten Schnittstellen könnten bewirken, dass die gegenseitige Wechselwirkung zwischen den Systemen analysiert werden könnte.

Eine weitere Option wäre, die Schnittstelle mit anderen elektrischen Systemen über die Wirkleistung und Spannung auszuführen, wodurch es möglich wäre, den Regler zu vereinfachen und die Integrationszeit etwas zu erhöhen. In dem Fall könnte die Spannung über die Amplitude der Leistungsquelle gesteuert werden, wobei die Blindleistungsregelung mit der Spannungssteuerung ersetzt wird.

Da sich die Ausführungen von drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerken größtenteils durch die eingesetzten Umrichter unterscheiden, wäre auch eine Möglichkeit, die Leistungselektronik einfacher in die Software zu implementieren, um sie mit einer Asynchronmaschine zu verbinden, wodurch die zusätzlichen Effekte und Auswirkungen einer Analyse zugeführt werden könnten.

Literaturverzeichnis

[1] W. Gawlik, "*Energieübertragung und Kraftwerke*", TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, 2011.

[2] R. Eckhard, "*Energiehandbuch: Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

[3] E. Schmidt, J. Ertl, A. Preiss, R. Zensch, R. Schurhuber, J. Hell, "*Studies about the low voltage ride through capabilities of variable-speed motor-generators of pumped storage hydro power plants",* Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian , vol., no., pp. 1,6, 25-28 Sept. 2011.

[4] Lab-Volt Ltd, "*Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)",* Mai 2011.

[5] K. Krueger, J. Koutnik, "*Dynamic Simulation of Pump-Storage Power Plants with Different Variable Speed Configurations using the Simsen Tool*", 24 th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IAHR, October 27-31, 2008, Foz Do Igaussu, Brazil

[6] J. J. Simond, A. Sapin, T. Xuan, R. Wetter and P. Burmeister, "*12-pulse LCI synchronous drive for a 20 MW compressor: Modelling, simulation and measurements,"* in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting , Hong Kong, 2005, pp. 2302–2308.

[7] A. Hodder, "*Double-fed asynchronous motor-generator equipped with a 3-level VSI cascade*"; Ph.D thesis N° 2939, EPFL 2004-

[8] Y. Pannatier, C. Nicolet, B. Kawkabani, J.-J. Simond, and P. Allenbach, "*Dynamic behavior of a 2 variable speed pump-turbine power plant*" in Proc. 18th ICEM, Vilamoura, Portugal, Sep. 2008, pp. 1–6.

[9] Y. Pannatier, B. Kawkabani, G. Sari, J.-J. Simond, "*Stability Studies of a Mixed Islanded Power Network with Varspeed Units using Simplified Models of the Converters*", IEEE ECCE 2010, Atlanta, Georgia, September 2010.

[10] UVIG Modeling Wiki, WT3 - Generic Wind Model: http://www.uwig.org:8080/index.php?title=WT3_-_Generic_Wind_Model [Online; Stand 01. Februar 2014].

[11] G. Andersson, *"Elektrische Energiesysteme:Vorlesungsteil Energieübertragung"*, ETH Zürich, EEH Power System Laboratory, September 2008.

[12] Hoa D. Vu, J. C. Agee, *"WECC Tutorial on Speed Governors"*, WECC Control Work Group, Februar 1998.

[13] D. Nelles, "*Netzdynamik: Elektromechanische Ausgleichsvorgänge in elektrischen Energieversorgungsnetzen*", VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach, März 2009.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht zu einem Pumpspeicherkraftwerk [2] 6
Abbildung 2: Synchron-/Asynchronmaschine mit der variablen Drehzahl [3] 7
Abbildung 3: Doppelt gespeiste Asynchronmaschine mit der variablen Drehzahl [3] 7
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Rotordrehzahl und der Frequenz des rotierenden magnetischen Feldes in den Rotorwindungen, wenn diese gleichgesetzt sind [4] 9
Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Rotordrehzahl und der Frequenz des rotierenden magnetischen Feldes in den Rotorwindungen, wenn diese entgegengesetzt sind [4] 9
Abbildung 6: Synchronmotor/Generator mit LCI6-Umrichter [5] 12
Abbildung 7: Synchronmotor/Generator mit LCI12-Umrichter [6] 13
Abbildung 8: Synchronmotor/Generator mit SCI6-Umrichter [5] 14
Abbildung 9: Asynchronmotor/Generator mit der Direktumrichterkaskade [5] 15
Abbildung 10: Asynchronmotor/Generator mit Zwei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [5] 16
Abbildung 11: Asynchronmotor/Generator mit Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [5] 18
Abbildung 12: Vergleich zwischen Zwei- und Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [5] 18
Abbildung 13: SIMSEN – Die Entwicklungsumgebung 19
Abbildung 14: SIMSEN – Parametrisierung der Elemente 20
Abbildung 15: SIMSEN – Elementenverbindung 21
Abbildung 16: SIMSEN – Simulationsparameter 22
Abbildung 17: SIMSEN – Post-Processing-Analyse 23
Abbildung 18: Das Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter in SIMSEN [7] 24
Abbildung 19: Regelungskonzept des Transformatorteils nach [8] 26
Abbildung 20: Regelungskonzept des Maschinenteils nach [8] 27
Abbildung 21: Das Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [7] 28
Abbildung 22: Pseudo-kontinuierliches Modell des Asynchronmotors/-Generators mit dem Drei-Punkt-Spannungszwischenkreis-Umrichter [9] 30
Abbildung 23: Generator/Umrichter-Modell (WT3G1) [10] 31
Abbildung 24: Das Modell mit der Stromquelle 32
Abbildung 25: Das Netz mit der Leitung und der Stromquelle 34
Abbildung 26: Das Zeigerdiagramm des Netzmodells 36
Abbildung 27: Änderung der Stromamplitude bei dem Netzmodell 36
Abbildung 28: Änderung des Stromwinkels bei dem Netzmodell 37
Abbildung 29: Das Prinzip des Modells mit der Leistungsquelle 38
Abbildung 30: Das Netz mit den Parametern und der Leistungsquelle 39

Abbildung 31: Phasendifferenz zwischen den Spannungen 40
Abbildung 32: Das Modell des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks in SIMSEN .. 42
Abbildung 33: Der Mehrgrößenregler 45
Abbildung 34: Sprungantwort des Mehrgrößenreglers..... 47
Abbildung 35: Arbeitsbereich des Mehrgrößenreglers für die verschiedenen Leitungsparameter 48
Abbildung 36: Schnittstelle für das hydraulische System – der Droop-Regler..... 50
Abbildung 37: Simulation des Droop-Reglers 51
Abbildung 38: Leistungsverläufe zwischen Leitung und Transformator 53
Abbildung 39: Ausschnitt der Stromverläufe der Leistungsquelle 54
Abbildung 40: Ausschnitt der Strangspannungsverläufe der Leistungsquelle 54
Abbildung 41: Zwischenzeitlich erhaltene unplausible Stromverläufe der Leistungsquelle 55
Abbildung 42: Leistungsquelle – Verläufe der Effektivwerte des Stromes und der Spannung 56
Abbildung 43: Vergleich zwischen den Leistungen an der Primärseite und der Sekundärseite des Transformators 58
Abbildung 44: Vergleich zwischen den Leistungen an der Primärseite des Transformators und dem Netz 59
Abbildung 45: Leistungsverluste zwischen der Leistungsquelle und dem Netz 60
Abbildung 46: Ausschnitt der Stromverläufe des Netzes 61
Abbildung 47: Ausschnitt der Strangspannungsverläufe des Netzes 61
Abbildung 48: Netz - Verläufe der Effektivwerte des Stromes und der Spannung 62
Abbildung 49: Drehzahlabweichung mit aktiviertem Droop-Regler 63
Abbildung 50: Simulation der Schnittstelle für das hydraulische System 64
Abbildung 51: Drehzahländerung bei der Schnittstelle für das hydraulische System 65
Abbildung 52: Volle Entlastung der drehenden Masse 66
Abbildung 53: Drehzahlabweichung bei der vollen Entlastung..... 66
Abbildung 54: Sprungartige Änderung der Wirkleistung um 20 %..... 68
Abbildung 55: Sprungartige Änderung der Wirkleistung um 50 %..... 68
Abbildung 56: Auswirkung der sprungartigen Änderung der Wirkleistung auf die Drehzahl 69
Abbildung 57: Sprungartige Änderung der Blindleistung um 20 % 69
Abbildung 58: Sprungartige Änderung der Blindleistung um 50 % 70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Netzparameter 42
Tabelle 2: Die Leitungsparameter 43
Tabelle 3: Die Transformatorparameter 43
Tabelle 4: Die Werte für die Normierung 44
Tabelle 5: Die Parameter für den Mehrgrößenregler 46
Tabelle 6: Die Leitungsparameter für die verschiedenen Längen der Freileitung 49
Tabelle 7: Die Daten und Parameter für das Element Masse 51