



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## **DIPLOMARBEIT**

# **Simulation einer Synchronmaschine mit Vollumrichter in SIMSEN**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
**Diplom-Ingenieur**

unter der Leitung und Betreuung von  
**Univ. Prof. Dr. –Ing. Wolfgang Gawlik**

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
bei der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von

**Matúš Trnovec, Bakk**  
Matrikelnummer: 0825919  
Ľubovnianska 4  
85107 Bratislava



## Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Univ. Prof. Dr. Ing. Wolfgang Gawlik für die Betreuung und die Ermöglichung dieser interessanten Diplomarbeit. Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber für sein wertvolles Feedback aus der Industrie bedanken. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Christoph Maier für die wertvolle Unterstützung und Rat. Schließlich bedanke ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof. Dr.techn. Thomas Wolbank, der mir mit seinen Vorlesungen Inspiration und Hilfe für die Diplomarbeit gab.

Danken möchte ich meiner ganzen Familie, insbesondere aber meinen Eltern für die finanzielle und moralische Unterstützung. Die sieben Jahre meines Studiums waren mit ihrer Unterstützung viel leichter gewesen.

Weiters möchte ich mich bei allen Freunden und Studienkollegen bedanken, dank denen das Studium leichter und schneller gelaufen ist.

# Kurzfassung

Die steigende Elektrizitätsproduktion aus erneuerbaren Energiequellen hat eine große Herausforderung in Europa mit sich gebracht. Dabei handelt es sich um den Unterschied zwischen der volatilen Energieproduktion und dem Energieverbrauch. Der Energieverbrauch verhält sich mit seinem regelmäßigen Tagesverlauf heutzutage fast wie vor ein paar Dekaden. Für die Energieproduktion gilt dies jedoch nicht. Leicht steuerbare Energiequellen wie Kernkraftwerke oder „fossile“ Kraftwerke werden vermehrt durch die umweltfreundliche Windkraft oder Solarkraft ersetzt. Die Energieproduktion hängt dabei von der Sonnenstrahlung und von dem Wind ab. Sie kann zwar prognostiziert werden, jedoch nicht beliebig genau. Um die Lücken zwischen der Produktion und dem Verbrauch zu löschen, werden vermehrt Energiespeicher eingesetzt.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird der elektrische Teil eines Pumpspeicherkraftwerks modelliert und in Simulationssoftware SIMSEN simuliert. Die prinzipielle Funktionsweise eines Pumpspeicherkraftwerks wird im Kapitel 2 beschrieben. Kurze Beschreibung der Simulationssoftware SIMSEN findet im Kapitel 3 statt. Das Ziel der Diplomarbeit war es den Vergleich zwischen dem vollständigen und dem vereinfachten Modell des elektrischen Subsystems zu machen. Die beiden Modelle werden im Kapitel 4 vorgestellt, deren Vergleich anhand von diversen Simulationsszenarien findet im Kapitel 5 statt.

Im letzten Kapitel werden die zukünftigen Weiterentwicklungen diskutiert. Insbesondere werden hier fortgeschrittene Regelungsverfahren für ein besseres transientes Verhalten erwähnt. Weiters wird auf diverse Pulsmuster bei der Pulsweitenmodulation eingegangen, um die totale harmonische Verzerrung niedrig zu halten.

## **Abstract**

The rising electricity production from renewable energy sources has created a challenging engineering task in Europe. The main problem is the difference between the volatile energy production and more or less predictable consumption. The energy consumption with its regular daily variations behaves itself almost as in the last decades. This statement however is not true about the energy production. Easily controllable power plants, such as nuclear or coal power plants are steadily replaced by more eco-friendly wind or solar power plants. The electricity production depends thus on wind and solar radiation, and can be predicted, but not arbitrarily wished. In order to decrease this consumption-production gap, additional energy storage facilities are being built.

In this diploma thesis, the electrical part of a pumped storage hydro power station is modelled and simulated using the SIMSEN software. The working principle of a pumped storage hydro power plant is explained in chapter 2. Short description of the SIMSEN simulation tool is in chapter 3. The main goal of this thesis was the comparison between a complete and a simplified model of electrical part of the pumped storage hydro power station. Both models are introduced in chapter 4, and their comparison is in chapter 5.

The last chapter deals with possible future development. Especially, advanced techniques in synchronous motor control for a better transient behaviour will be discussed. Moreover, different pulse forms of the pulse-width modulation for lower total harmonic distortion will be considered.

# Inhaltsverzeichnis

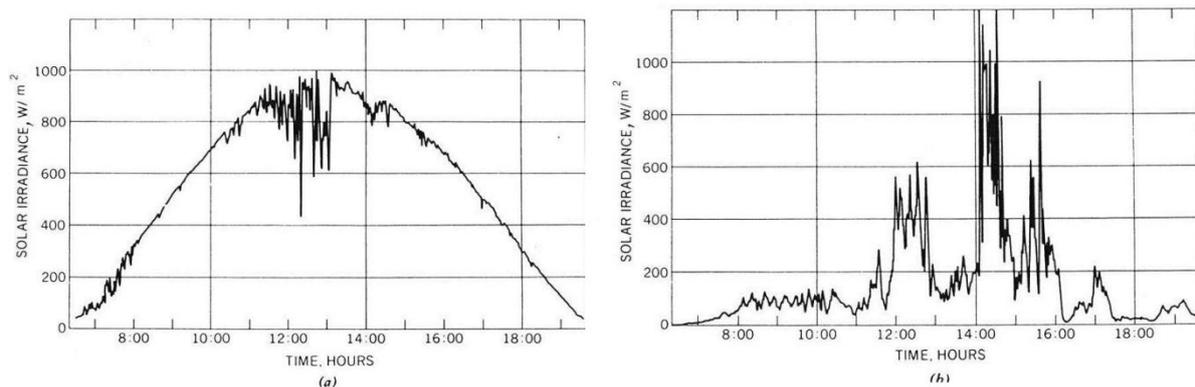
1	Einleitung.....	- 1 -
2	Das drehzahlvariable Pumpspeicherkraftwerk .....	- 3 -
2.1	Arten der Speicherkraftwerke .....	- 3 -
2.2	Pumpspeicherkraftwerk .....	- 4 -
2.3	Die Funktionsweise des drehzahlvariablen Synchrongenerators .....	- 5 -
2.4	Umrichterarten für einen drehzahlvariablen Antrieb .....	- 7 -
2.4.1	Der zwei- und mehrstufige Spannungszwischenkreisumrichter .....	- 7 -
	Stromzwischenkreisumrichter.....	- 8 -
2.4.2	Synchronmotor/Generator mit lastgeführtem Wechselrichter LCI6/LCI12 .....	- 8 -
2.4.3	Asynchronmotor/Generator mit Direktumrichterkaskade .....	- 9 -
2.4.4	Doppeltgespeiste Asynchronmotor/Generator mit zwei-stufigem Spannungszwischenkreis.....	- 10 -
2.4.5	Synchronmotor/Generator mit selbstgeführtem Wechselrichter SCI6 .....	- 11 -
3	Simulationssoftware SIMSEN .....	- 13 -
3.1	Grafische Benutzeroberfläche – Programm EdiSim .....	- 13 -
3.2	Elemente eines Regelkreises .....	- 14 -
3.2.1	Programm - Prog .....	- 15 -
3.2.2	Mittelwertbilder – Averag .....	- 16 -
3.2.3	Z-Transformation: Z-Trans.....	- 17 -
3.2.4	Punktfunktion: F-Pts .....	- 19 -
3.2.5	Regulator: Reg .....	- 19 -
3.3	Programm Inisim .....	- 20 -
3.4	Simulationsablauf - Programm Sim .....	- 21 -
3.4.1	SIMULATION PARAMETERS .....	- 21 -
3.4.2	CONSTANT DATA .....	- 22 -
3.4.3	PARAMETERS und INITIAL CONDITIONS.....	- 22 -
3.4.4	DISTURBANCES .....	- 22 -
3.5	Grafischer Ausgang - Programm Visual .....	- 23 -
3.6	Darstellung der Elementparametern .....	- 23 -
4	Modellimplementierung in SIMSEN .....	- 25 -
4.1	Das vollständige Modell .....	- 25 -
4.1.1	Arbeitsweise des GTOD-Vollumrichters .....	- 27 -
4.1.2	Das Regelungskonzept des Modells .....	- 31 -
4.1.3	Zwischenkreisspannungsregelung im Motorbetrieb.....	- 36 -

4.1.4	Drehzahlregelung im Motorbetrieb .....	- 39 -
4.1.5	Regelung der relativen Blindleistung im Motorbetrieb .....	- 41 -
4.1.6	Zwischenkreisspannungsregelung im Generatorbetrieb .....	- 44 -
4.1.7	Regelung der relativen Blindleistung im Generatorbetrieb .....	- 46 -
4.1.8	Drehzahlregelung im Generatorbetrieb .....	- 48 -
4.1.9	Regelung der absoluten Wirkleistung im Motor- und im Generatorbetrieb .....	- 49 -
4.1.10	Flussregelung im Motor- und Generatorbetrieb.....	- 50 -
4.1.11	Turbinen- und Pumpenkennlinie.....	- 51 -
4.1.12	Betriebswahl.....	- 53 -
4.2	Das vereinfachte Modell .....	- 54 -
4.2.1	Das Regelungskonzept des Modells .....	- 55 -
4.2.2	Drehzahlregelung im Motorbetrieb .....	- 56 -
4.2.3	Drehzahlregelung im Generatorbetrieb .....	- 58 -
4.2.4	Regelung der relativen Blindleistung im Motor- und Generatorbetrieb .....	- 58 -
4.2.5	Regelung der absoluten Wirkleistung im Motor- und im Generatorbetrieb .....	- 59 -
4.2.6	Gesteuerte Spannungsquellen und der „virtuelle Kondensator“ .....	- 60 -
4.2.7	Flussregelung im Motor- und Generatorbetrieb.....	- 62 -
4.2.8	Betriebswahl.....	- 62 -
5	Simulationsszenarien.....	- 64 -
5.1	Nachfahren einer Wirkleistungstrajektorie im Motorbetrieb.....	- 64 -
5.2	Nachfahren einer Wirkleistungstrajektorie im Generatorbetrieb .....	- 66 -
5.3	Nachfahren einer Blindleistungstrajektorie im Motorbetrieb .....	- 67 -
5.4	Generatoranlauf .....	- 68 -
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	- 71 -

### 1 Einleitung

Der weltweite Energiebedarf steigt allmählich an. Die Energieproduktion in den entwickelten Ländern verschiebt sich gleichzeitig in Richtung der Umweltfreundlichkeit. Regenerative Energiequellen, wie Wind und Solarenergie sind aber hochvolatil, und stellen keinen Ersatz zu den primären Kraftwerken (wie Kern- oder Kohlenkraftwerke) dar. Um die Ausgleich- bzw. Regelenergie zu liefern sind Pumpspeicherkraftwerke, Speicherkraftwerke oder Gas und Dampf Zyklen (GuD) gefragt. Sie zeichnen sich durch hohe Leistungsgradienten sowie breite Lastbereiche aus [1] [2].

Im Rahmen des europäischen COMET-Programmes wird der Projekt Green Storage Grid (GSG) ausgeführt. GSG-Projekt befasst sich mit der Einbindung von regenerativen Energiequellen in das bestehende Energieübertragungsnetz. Dabei wird mit neuen Energiequellen wie Wind, PV, Biomasse, Meeresgezeiten oder mit geothermischer Energie gerechnet. Die Windkraftanlagen sowie die Solarkraftwerke stellen den größten Energieanteil dar. Die Windböen sowie die Wolken sind dabei eine große Gefahr für die Netzstabilität. Während eines „idealen“ Tages würden die Solarbestrahlung, und die Windstärke eine annähernd sinusförmige Form besitzen. Da die meisten Tage aber nicht ideal sind, kann die gelieferte Leistung stark verzerrt sein (siehe Abbildung 1, rechts). Bei der gelieferten Leistung ist somit mit sehr hohen Leistungsgradienten zu rechnen [3].



**Abbildung 1: Typischer Zeitverlauf der Solarbestrahlung während eines (a) sonnigen und (b) während eines bewölkten Tages [3]**

Ein starker Anstieg von einem Bruchteil auf die volle Nennleistung kann bei den Solaranlagen in Sekunden passieren. Bei der Windkraft verlängert sich diese Zeitkonstante dank der Rotorträgheit in den Minutenbereich. Der Bedarf nach der Primär- und Sekundärregelenergie erhöht sich, und kann alleine durch die konventionellen thermischen Kraftwerke nur schwer bedeckt sein. Die Pumpspeicherkraftwerke und schnelle GuD-Kraftwerke können die notwendige Regelenergie liefern.

Man spricht dabei von einem gemischten Inselnetz. In einem gemischten Inselnetz sind mehrere Kraftwerkstypen vertreten, die insgesamt eine ausgeglichene Energiebilanz liefern. In einer Falluntersuchung von [2] ist ein thermisches Kraftwerk (1.3GW) mit einem Wind- (200MW), Solar- (100MW) und Pumpspeicherkraftwerk (250MW) gemeinsam modelliert. Ein Konsument mit einer konstant verbrauchten Leistung von 1.4GW wird als Last angenommen (Abbildung 2), [2].

Wie schon erwähnt, wird im Rahmen des GSG-Projektes die Einbindung von regenerativen Energiequellen in ein bestehendes elektrisches Netz untersucht. Die Herausforderung dabei ist es die Stabilität des Netzes zu gewährleisten. Der Aufbau von zusätzlichen Speicherkapazitäten

## 1. EINLEITUNG

(Luftdruckspeicher, Pumpspeicher etc.) kann diese Aufgabe gut erfüllen[4]. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein drehzahlvariables Pumpspeicherkraftwerk mit Vollumrichter untersucht. Es wird davon ein Modell in Simulationssoftware SIMSEN erstellt, das sich in das Gesamtmodell des GSG-Projektes integrieren lässt. Dieses Modell eignet sich sowohl für stationäre als auch für dynamische Simulationen.

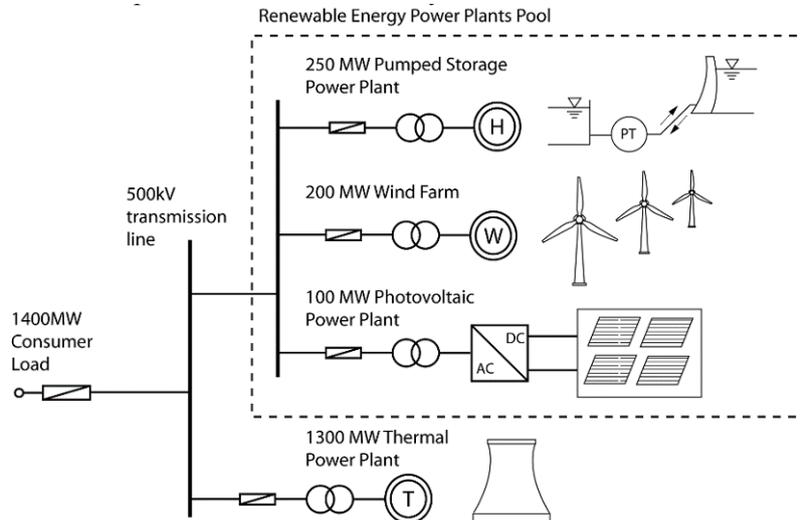


Figure 2 Case study power network.

Abbildung 2: Inselnetzwerk mit regenerativen und thermischen Energiequellen [2]

Der elektrische Teil des untersuchten Pumpspeicherkraftwerks besteht aus einer fremderregten Synchronmaschine, einem Vollumrichter mit Spannungszwischenkreis, und einer elektrischen Leitung. Die Schnittstelle zu dem hydraulischen Subsystem befindet sich an der Welle der Turbine. Die Schnittstelle zu dem Stromverbraucher liegt an den Klemmen des Übertragungsnetzes. Die implementierten Regelungsstrukturen ermöglichen die Drehzahl und die Blindleistungsregelung. Als Grundlage für die Modellierung wurde das Simsen-Tutorial 9 aus der EPFL-Webseite genommen.

Im Kapitel 2 wird auf die allgemeine Funktionsweise des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks eingegangen. Kapitel 3 wird einer kurzen Beschreibung der Simulationssoftware SIMSEN und den wichtigsten Funktionen und Bauelementen gewidmet. Im Kapitel 4 wird die eigentliche Implementierung diskutiert, und im Kapitel 4 sind die wichtigsten Simulationsszenarien beschrieben. Anschließend wird im Kapitel 6 die mögliche Weiterentwicklung sowie die Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse präsentiert.

## 2 Das drehzahlvariable Pumpspeicherkraftwerk

In den letzten Dekaden ist der Anteil der erneuerbaren Energie, insbesondere aus Wind und Sonne, rapid gestiegen. Da die gelieferte Leistung aus diesen dezentralen Energiequellen nicht beliebig gewünscht werden kann, so muss die überschüssige Stromproduktion in einem Energiespeicher gespeichert werden.

### 2.1 Arten der Speicherkraftwerke

Die Energiespeichermethoden sind heutzutage auch dank der Leistungselektronik am weitesten fortgeschritten. Diese Methoden basieren meistens auf einem Druckluftspeicher oder auf dem Gravitationspotential, und können folgendermaßen unterteilt werden [4]:

- Traditionelle Drucklufttechnik (CAES)
- Zweistoff-Drucklufttechnik
- Hydraulischer Akkumulator
- Gravitationsspeicher
- Hydraulisches Pumpspeicherkraftwerk

Die ersten drei gehören in die Kategorie der Druckluftspeicher, und die letzten zwei sind aus der Kategorie des Gravitationspotential.

Traditionelle Drucklufttechnik arbeitet mit einem großen Hohlraum, wie beispielsweise einer Höhle. In den Zeiten der überschüssigen Stromerzeugung wird die Luft in die Höhle hineingepumpt. Während der erhöhten Stromnachfrage wird die Luft ausgeblasen, und treibt die Turbine auf. Die Luft in der Höhle ist jedoch wegen der Wärmeabfuhr nicht warm genug und braucht zusätzliche Wärmequelle um den Vorgang aufrecht zu halten. Die zugeführte Wärme, meistens in Form eines natürlichen Gases, verschlechtert die Energiebilanz dieses Speichers und ermöglicht eine Energierückgewinnung von nur etwa 30% [4].

Bei der Zweistoffdrucklufttechnik wird ein kompressibles mit einem inkompressiblen Medium zusammen gepumpt (meistens Wasser mit Luft). Dank den günstigen Wärmeeigenschaften vom Wasser wird die Luft nicht so schnell abgekühlt, und die gesamte Energiebilanz dieses Prozesses ist gestiegen. Auf gleichem Prinzip basiert auch der Druckluftspeicher der Art „Luft über Wasser“. Hier wird mit dem gepumpten inkompressiblen Wasser die Luftblase in einem Tank komprimiert. Die Energierückgewinnung erfolgt wiederum durch Auspumpen des Wassers [4].

Die zweite Form der Energiespeicherung ist mittels des Gravitationspotentials. Die erste Realisierung ist es eine schwere Last hydraulisch hoch zu pumpen um Energie zu speichern. Bei der Rückgewinnung wird die Last wieder gesenkt. Das gleiche Prinzip gilt auch für das Pumpspeicherkraftwerk. Die Last ist das gepumpte Wasser. Der Gesamtvolumen des Stausees ist für die totale Speicherkapazität ausschlaggebend, und der maximale Durchfluss hängt mit der maximalen Wirkleistung zusammen [4], [2].

## 2.2 Pumpspeicherkraftwerk

In diesem Abschnitt wird die physische Auslegung eines Pumpspeicherkraftwerks näher diskutiert. In Abbildung 3 ist die schematische Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks in der Nähe von Genfer See in Schweiz abgebildet. Der Genfer See (375m) stellt eine fast unbegrenzte Volumenkapazität des unteren Wasserbeckens dar (Abbildung 3, *Downstream reservoir*). Das obere Wasserbecken ist durch den Stausee Lac de l'Hongrin (1225m) gebildet (*Upstream reservoir*). Außer der eigentlichen Speicherung ist dieser Stausee durch normale Flüsse aus den umgebenden Bergen gefüllt, und funktioniert somit auch wie ein übliches Laufwasserkraftwerk[2].

Um auf die schnellen Änderungen in der Stromnachfrage antworten zu können, ist das Speicherkraftwerk mit einem Wasserschloss ausgerüstet. Der Maschinenraum ist mit einem ternären Satz ausgestattet, d.h. mit einer separaten Pumpe und Turbine und mit einer hydraulischen Kupplung dazwischen. Die Pumpe bzw. die Turbine ist an einer Welle mit der Synchronmaschine angeschlossen. Die Synchronmaschine ist über einen Transformator direkt ans Netz angekoppelt. Es handelt sich also um einen drehzahlkonstanten Antrieb, dass für die Netzfrequenz  $f_{NETZ} = 50\text{Hz}$  ausgelegt wird.

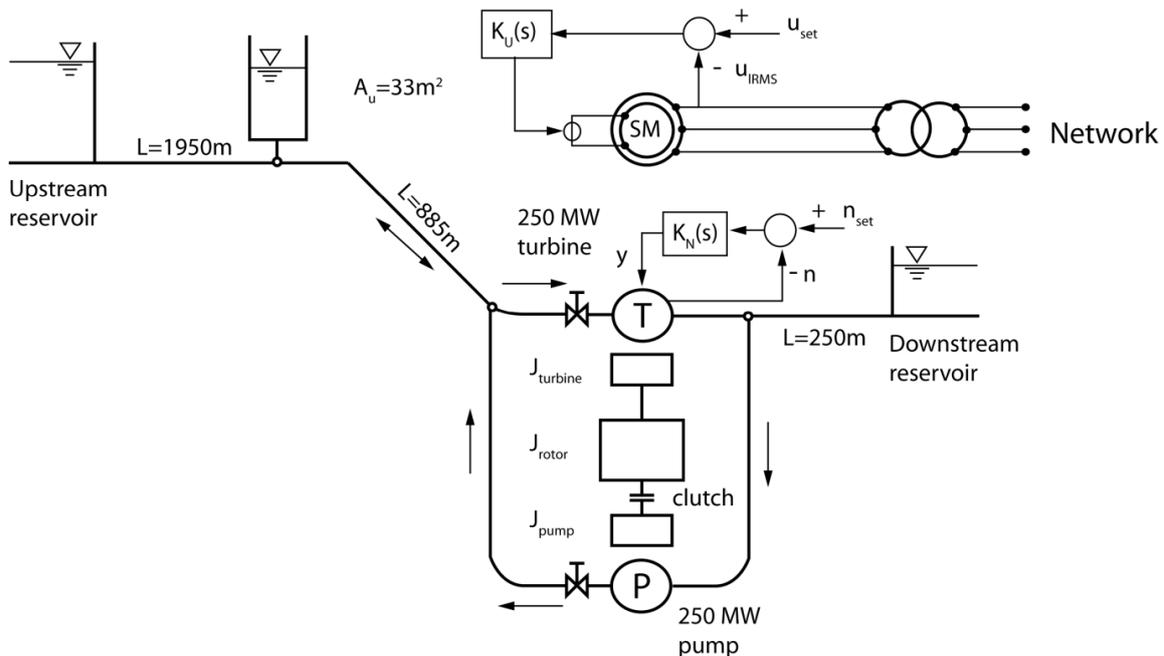


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks mit ternärem Satz [3]

Um drehzahlvariabel zu fahren, muss die Maschine mit einem Umrichter ausgestattet werden (siehe Abbildung 4). Umrichter ist eine elektronische Schaltung, die eine Wechselspannung  $U_1$  der Frequenz  $f_1$  an der Primärseite in eine Wechselspannung  $U_2$  mit der Frequenz  $f_2$  an der Sekundärseite überführt. Es gibt mehrere Umrichterarten, die sich voneinander durch unterschiedliche Aspekte wie Preis, Komplexität oder totale harmonische Verzerrung unterscheiden. Eine Übersicht und anschließende Auswahl des Umrichters für diese Diplomarbeit findet im Abschnitt 2.4 statt. Die schematische Darstellung des Pumpspeicherkraftwerks mit dem Umrichter ist in Abbildung 4. Prinzipiell besteht der Umrichter aus einem Wechselrichter, einem Zwischenkreis und einem Wechselrichter. Die vereinfachte Funktionsweise ist in den meisten Fällen folgende: (i) der dreiphasige Wechselstrom aus dem Netz wird durch den Gleichrichter in einen Gleichstrom, bzw.

## 2. DAS DREHZAHLVARIABLE PUMPSPEICHERKRAFTWERK

eine Gleichspannung umgewandelt. (ii) Die „Speicherung“ der Energie im Zwischenkreis wird mit einer Spule, einem Kondensator oder einem Filter realisiert. (iii) Schließlich wird die Gleichspannungsgröße wieder in einen dreiphasigen Wechselstrom durch einen Wechselrichter umgeformt. Dabei können sich die beiden Spannungen bzw. Ströme sowohl in Amplitude als auch in Frequenz unterscheiden. Die genaue Funktionsweise des Umrichters wird im Abschnitt 2.4 näher erklärt.

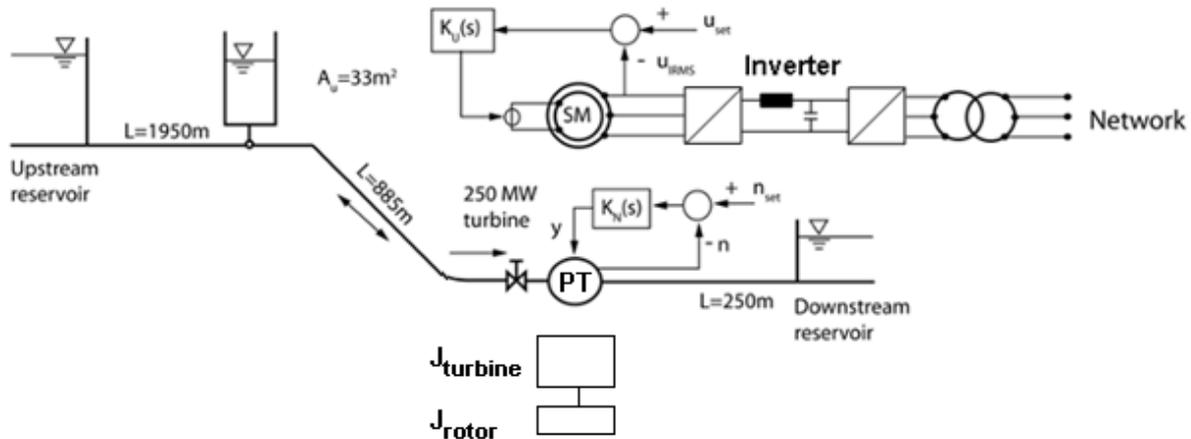


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks mit dem Umrichter [5]

An dieser Stelle wird noch kurz auf die Unterschiede zwischen der drehzahlvariablen und der drehzahlkonstanten Ausführung eingegangen.

Die modernste Entwicklung in der Leistungselektronik hat die Umrichter und deren Einsatz günstiger und einfacher gemacht. Deswegen werden die drehzahlkonstanten Antriebe vermehrt durch die drehzahlvariablen Antriebe ersetzt. Eingesetzt wird entweder eine doppelt-gespeiste Asynchronmaschine, oder – wie in dieser Diplomarbeit – eine Synchronmaschine. Die variable Drehzahl ermöglicht einen weitaus flexibleren Betrieb. Das Kraftwerk muss sich nicht mehr auf den einzigen optimalen Arbeitspunkt der Drehzahl beschränken, sondern kann auch bei niedrigerem Gefälle bzw. höherem Durchfluss arbeiten. Dadurch wird zwar der effektivste Arbeitspunkt der Turbinen verloren, die Anforderungen von der Netzseite (elektrische Leistung und Leistungswinkel) können jedoch einfacher erfüllt werden [2].

### 2.3 Die Funktionsweise des drehzahlvariablen Synchrongenerators

In vorherigen Abschnitten wurden die Vorteile der drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerke erwähnt. In diesem Abschnitt wird die tatsächliche elektrische Realisierung des Motor-Generators und des dazugehörigen Umrichters behandelt.

Aus der elektrischen Sicht gibt es zwei Realisierungen des drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks [5] – eine Synchronmaschine mit Vollumrichter oder eine doppelt-gespeiste Asynchronmaschine (Abbildung 5). Beide Realisierungen brauchen einen Umrichter. Bei der Synchronmaschine ist der Umrichter an der Statorseite zwischen den Statorklemmen und dem Netzanschluss platziert und muss somit 100% der Leistung übertragen. Bei der Asynchronmaschine befindet sich der Umrichter im Rotorkreis, und wird zur Rückspeisung der Schlupfleistung zurück ins Netz verwendet. Aus diesem Grunde muss der Umrichter bei einer doppelt-gespeisten Asynchronmaschine nicht für die volle Nennleistung, sondern für nur etwa ein Drittel davon dimensioniert werden. Daraus folgen auch die

## 2. DAS DREHZAHLVARIABLE PUMPSPEICHERKRAFTWERK

Einsatzgebiete der beiden Ausführungen. Die doppelt-gepeiste Asynchronmaschine eignet sich laut Hildinger und Kodding für Leistungen oberhalb  $100\text{MW}$ , während die Synchronmaschine für kleinere Leistungen geeignet ist [2], [5].

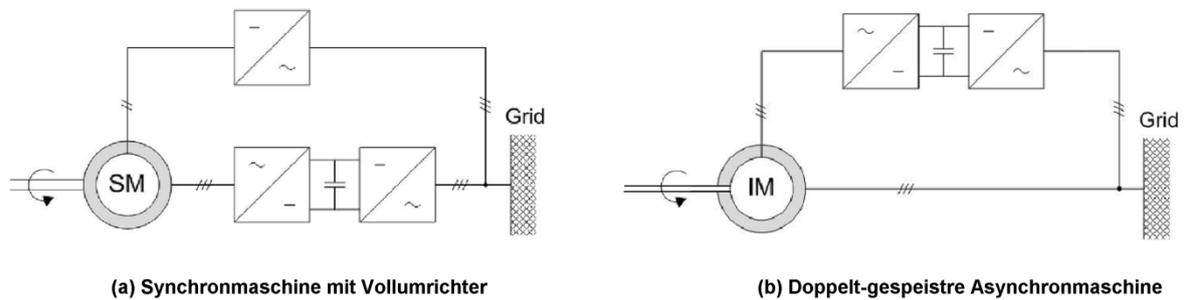


Abbildung 5: Zwei elektrische Ausführungen eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks [5]

Die eigentliche Motorkonstruktion der Synchron- und der Asynchronmaschine unterscheidet sich jedoch nur in der Beschaltung der Rotorseite. Dies ist auch der schematischen Darstellung in der Abbildung 5 zu entnehmen. Es ist leicht zu erkennen, dass eine fremderregte Synchronmaschine ohne Permanentmagnete mit einem Gleichstrom erregt wird. Der Gleichstrom wird mit einem, ans Netz angeschlossenen Gleichrichter gebildet (Abbildung 5, links). Bei der doppelt-gepeisten Asynchronmaschine ist die Statorseite ohne Umrichter direkt ans Netz angeschlossen. Die „Schlupfleistung“ wird dann mit dem Umrichter ins Netz übertragen (Abbildung 5, rechts)[5], [6].

Detaillierter Querschnitt einer mittelgroßen Synchronmaschine ist in der Abbildung 6 gegeben.

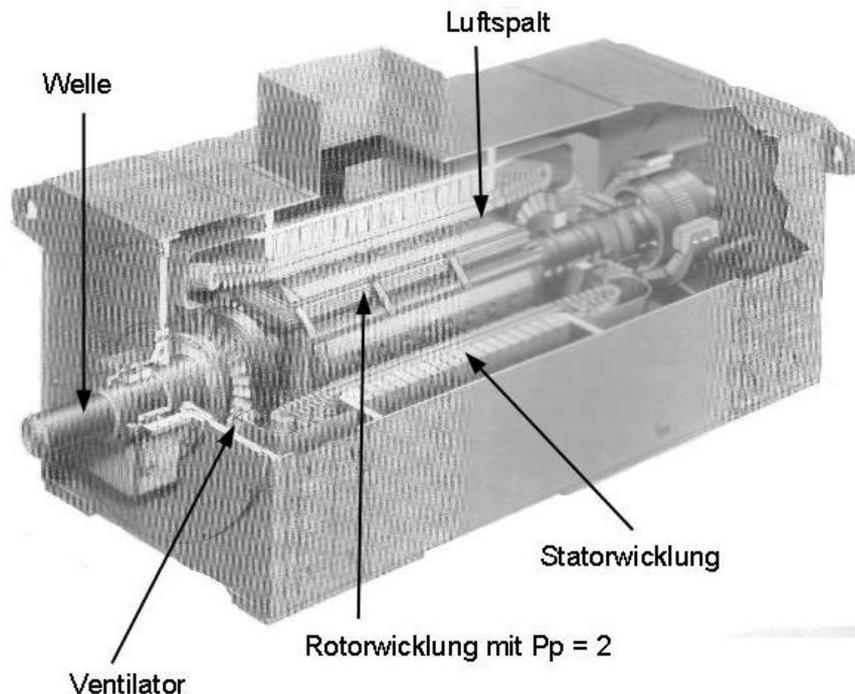


Abbildung 6: Querschnitt einer mittelgroßen Synchronmaschine [6]

## 2.4 Umrichterarten für einen drehzahlvariablen Antrieb

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, werden bei drehzahlvariablem Betrieb Umrichter eingesetzt. Eine Übersicht über die herkömmlichen Umrichter wird in diesem Abschnitt gegeben. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Umrichter werden diskutiert, und anschließend wird eine Wahl des richtigen Umrichters getroffen. Zuerst wird jedoch ein kurzer Vergleich der bis jetzt erwähnten Eigenschaften gemacht.

Allgemein gesagt liegen die Vorteile der drehzahlvariablen Antriebe in deren Einsatzflexibilität. Man kann die Turbinendrehzahl variieren, was bei Wasser- oder Windkraftanlagen zur Wirkungsgradoptimierung und höheren Verfügbarkeit führen kann. Dies geschieht ohne zusätzliches Getriebe, und ist nur zu Lasten des elektrischen Kreises realisiert. Zu Nachteilen von drehzahlvariablen Antrieben zählen dann die erhöhte Komplexität des Regelkreises bzw. des eingesetzten Konverters und Kosten.

Die Unterschiede werden am folgenden Beispiel illustriert. Dabei wird eine doppelt-gespeiste Asynchronmaschine als Vertreter von drehzahlvariablen Antrieben mit einer klassischen reversiblen Francis Pumpe-Turbine angetrieben durch eine Synchronmaschine verglichen [1], [7].

Vorteile einer doppelt-gespeisten Asynchronmaschine (DGASM)	Nachteile einer DGASM
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effiziente Wirkleistungsregelung im Pumpbetrieb</li> <li>- Große Variationen der Fallhöhe im Damm möglich</li> <li>- Höhere Effektivität im Turbinenbetrieb</li> <li>- Große Arbeitsbereich im Pump- und Turbinenbetrieb</li> <li>- Schnelle Wirkleistungsversorgung dank eines „Effekt von Schwungrad“</li> <li>- Anlauf der Turbine ohne zusätzliche Einrichtung</li> <li>- Blindleistungsregelung mit einem statischen Blindleistungskompensator sogar beim Stillstand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Höhere Investitionskosten (Motor-Generator und Frequenzumrichter und damit zusammenhängende Baukosten)</li> <li>- Neue Technologie</li> </ul>

Tabelle 1: Vergleich von einer Doppelt-Gespeisten Asynchronmaschine mit einer Synchronmaschine [1], [7]

### 2.4.1 Der zwei- und mehrstufige Spannungszwischenkreisumrichter

Im Allgemeinen, besteht der Spannungszwischenkreisumrichter aus einem Gleichrichter, einem Zwischenkreis mit konstanter Spannung und einem Wechselrichter. Es können unterschiedliche ein- und auch ausschaltbare Halbleiterbauelemente wie GTO (Gate Turn Off), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) oder IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) eingesetzt werden.

## 2. DAS DREHZAHLVARIABLE PUMPSPEICHERKRAFTWERK

Ein mehrstufiger Spannungszwischenkreisumrichter wird dann mittels eines Transformators mit mehrfacher Sekundärseite und unterschiedlichen Windungsanordnungen/-zahlen realisiert [1], [7].

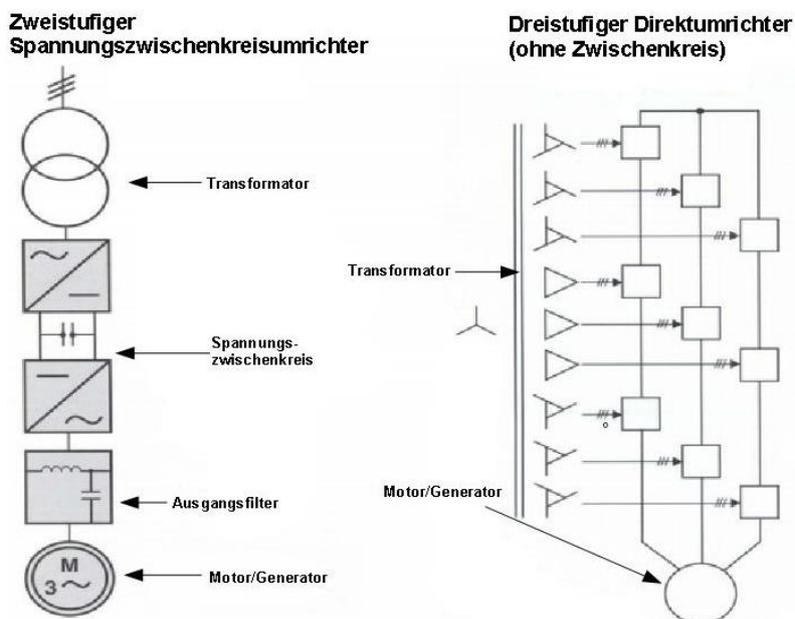


Abbildung 7: Zweistufiger Spannungszwischenkreisumrichter links, und ein dreistufiger Direktumrichter ohne Zwischenkreis rechts [7]

### Stromzwischenkreisumrichter

Bei einem Stromzwischenkreisumrichter wählt man anstelle von Spannung den Strom als die Speichergröße des Zwischenkreises aus. Um den Strom im Zwischenkreis konstant zu halten, enthält der Zwischenkreis eine Induktivität. Amplitude des Statorstromes ist mit dem Gleichrichter geregelt, wobei die Frequenz und somit auch die Motorgeschwindigkeit mit dem Wechselrichter geregelt wird. Der größte Vorteil eines Spannungszwischenkreises gegenüber dem Stromzwischenkreis ist die einfache Drehzahlregelung. Der größte Nachteil ist der kostbare Zwischenkreiskondensator [1].

#### 2.4.2 Synchronmotor/Generator mit lastgeführtem Wechselrichter LCI6/LCI12

Beim lastgeführten Umrichter wird der Gleichstrom mit einem gesteuerten Gleichrichter und einer Induktivität erzeugt. Die Amplitude und die Frequenz der, an die Maschine angelegten Spannung wird mit dem Wechselrichter bestimmt [7].

Dies ist eine sehr einfache Schaltung, was zu einem niedrigen Entwicklungsaufwand führt. Es ist möglich einfache Halbleiterelemente, wie SCR (Silicon Controlled Rectifier) oder einfache Thyristoren zu verwenden. Es ist aber auch eine sehr primitive Variante, und birgt mehrere Nachteile in sich. Die Eigenschaften der LCI6-Schaltung sind:

- + einfache Umrichtervariante mit niedriger Elementenzahl
- + einfache SCR-Bauelemente (Silicon Controlled Rectifier)
- + Es kann zum Start einer Synchronmaschine verwendet werden
- Der Umrichter muss für die nominelle Gesamtleistung dimensioniert werden

## 2. DAS DREHZAHLVARIABLE PUMPSPEICHERKRAFTWERK

- niedrige Totale Harmonische Verzerrung (Total Harmonic Distortion, THD)
- Die Wirkleistungsregelung ist nicht möglich
- Der Blindleistungsverbrauch des Umrichters muss durch die Maschine bedeckt werden => Erhöhung des totalen Leistungsverbrauchs [1].

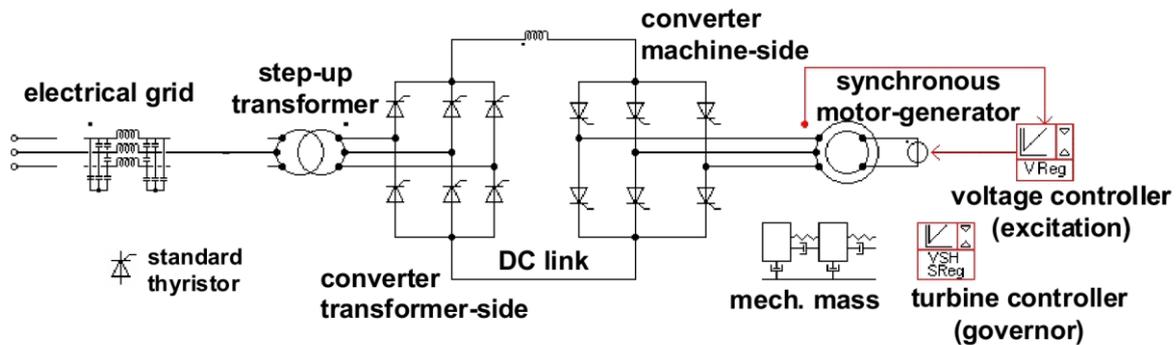


Abbildung 8: Der lastgeführte Umrichter LCI6 mit Stromzwischenkreis [1]

### 2.4.3 Asynchronmotor/Generator mit Direktumrichter-kaskade

Bis jetzt wurden nur die Umrichtervarianten mit einem Zwischenkreis behandelt. Der Zwischenkreis diente dabei die Zwischenkreisgröße – Strom an der Spule oder Spannung am Kondensator – konstant zu halten. Ein Umrichter kann aber auch ohne Zwischenkreis realisiert werden. Man spricht dann von einem Direktumrichter, da die elektrischen Größen Strom und Spannung direkt – ohne Zwischenkreis – umgeformt werden [1],[7].

Direktumrichter besteht aus drei separaten Zweigen – ein Zweig für eine Phase des dreiphasigen Motor-Generators. In jedem Zweig gibt es einen Transformator und einen Umformer ohne Zwischenkreis. Die transformatorseitige Wechselfspannung wird direkt in die Wechselfspannung der Maschine umgeformt [7]. Ein Beispiel des Direktumrichters wird in Abbildung 9 gegeben.

Die Vorteile (+) bzw. die Nachteile (-) dieses Umrichters sind[1], [7]:

- + Verwendung einfacher SCR-Bauelemente möglich
- + Wirk- und Blindleistung können geregelt werden
- + Umrichter bei DGASM dimensioniert nur für einen Bruchteil der Gesamtleistung
- + niedrigere THD an der Netzseite im Generatorbetrieb
- drei Transformatoren mit mehrfachen Wicklungen
- sehr komplexe Regelung und Zündung von den 72 Thyristoren
- erhöhtes Risiko eines Komponentenausfall wegen der hohen Elementenzahl
- hohes THD im Rotorkreis => Filters nötig
- ein zusätzliches Frequenzumrichter für den Anlauf im Pumpbetrieb nötig

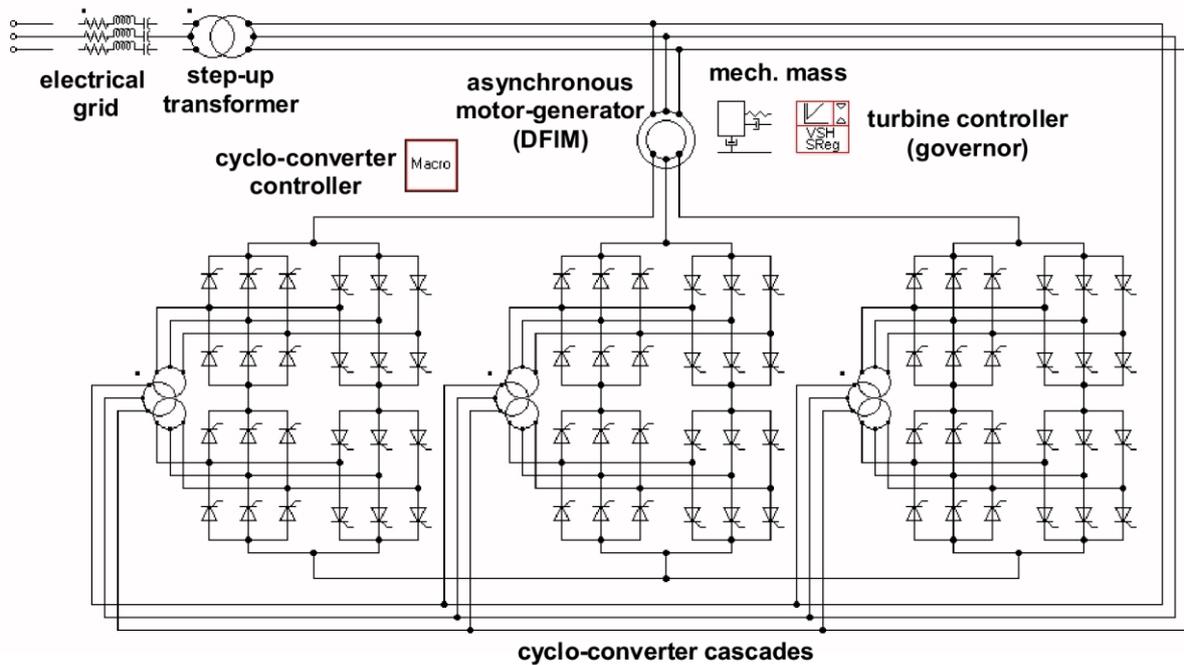


Abbildung 9: Doppelt-Gespeiste Asynchronmaschine mit Direktumrichter [1]

### 2.4.4 Doppeltgespeiste Asynchronmotor/Generator mit zwei-stufigem Spannungszwischenkreis

Wie schon im Abschnitt 2.4.3 gezeigt, ist die Asynchronmaschine meistens doppelt gespeist. Dies ermöglicht die Schlupfleistung und somit auch die Drehzahl zu regulieren. Im vorherigen Abschnitt 2.4.3 wurde eine umständliche Variante des Direktumrichters vorgestellt. Nachteilig waren die hohe Elementenzahl und die Komplexität dieses Systems. Asynchronmaschine kann aber auch mit einem Vollumrichter getrieben werden.

Vollumrichter ist eine Art des Umrichters, der den Leistungsfluss in allen vier Quadranten ermöglicht. Es ist somit möglich sowohl motorisch als auch generatorisch zu fahren. Des Weiteren kann noch der Blindleistungsverbrauch beliebig gewünscht werden.

Zu diesem Zwecke müssen jedoch andere Halbleiterelemente angewendet werden. Einfache Thyristoren oder SCR reichen nicht aus. Die Halbleiterbauelemente müssen abschaltbar sein, um die Pulsweitenmodulation (PWM) anwenden zu können. Verglichen mit der Ansteuerung des Zündwinkels bei den einfachen Thyristoren ist die Ansteuerung bei Pulsweitenmodulation (PWM) viel komplexer. Schaltfrequenzen von rund  $1.4\text{kHz}$  sind üblich, was zu einem höheren schaltungstechnischen Aufwand führt. Die Simulationen solcher Systeme brauchen deutlich kürzere Integrationszeiten, und werden langsamer. Dies ist auch der Grund, warum im Rahmen dieser Diplomarbeit ein komplettes mit einem vereinfachten System verglichen wird (s. Kapitel 4). Das komplette System beinhaltet die ein- und abschaltbare Halbleiter – es wurden GTOD-Thyristoren (Gate Turn Off-Thyristor with antiparallel Diode) genommen. Im vereinfachten System werden diese Halbleiterelemente durch einfache gesteuerte Spannungsquellen ersetzt. Näheres dazu im Kapitel 4. Jetzt wird noch kurz auf die doppelt-gespeiste Asynchronmaschine mit Vollumrichter eingegangen. Eine Realisierung der DGASM mit GTOD-Thyristoren ist in Abbildung 10 gezeigt. Die Asynchronmaschine ist über den Haupttransformator ans Netz gekoppelt. Die Rotorseite ist über einen Vollumrichter mit Spannungszwischenkreis rückgekoppelt. Ein Hilfstransformator ist noch

## 2. DAS DREHZAHLVARIABLE PUMPSPEICHERKRAFTWERK

zwischen der Maschinenseite des Haupttransformators und dem Vollumrichter angebracht. Die Vorteile dieser Schaltung im Vergleich mit der DGASM aus Abschnitt 2.4.3 liegen hauptsächlich in ihrer Kompaktheit und besserem harmonischen Verhalten. Der große Nachteil ist die Unfähigkeit dieses Umrichters einen Gleichstrom einzuspeisen. Aus diesem Grunde gibt es einen Totband um die Synchrondrehzahl. Die Eigenschaften der DGASM aus Abbildung 10 sind [1]:

- + Umrichter muss nur für einen Bruch der Gesamtleistung dimensioniert werden
- + Wirk- und Blindleistungsregelung möglich
- + Entkopplung der Ansteuerung des Gleich- von dem Wechselrichter
- + niedrige Elementenzahl und eine modulare (Regelungs-)Struktur
- + nur 1 Hilfstransformator nötig (verglichen mit drei Transformatoren des Direktumrichters).
- MIMO-Regler nötig, da d- und q-Komponenten miteinander gekoppelt sind
- höhere THD verglichen mit einem 3-stufigen Umrichter
- die Unfähigkeit DC einzuspeisen verursacht ein Totband (+/-2%) um Synchrondrehzahl

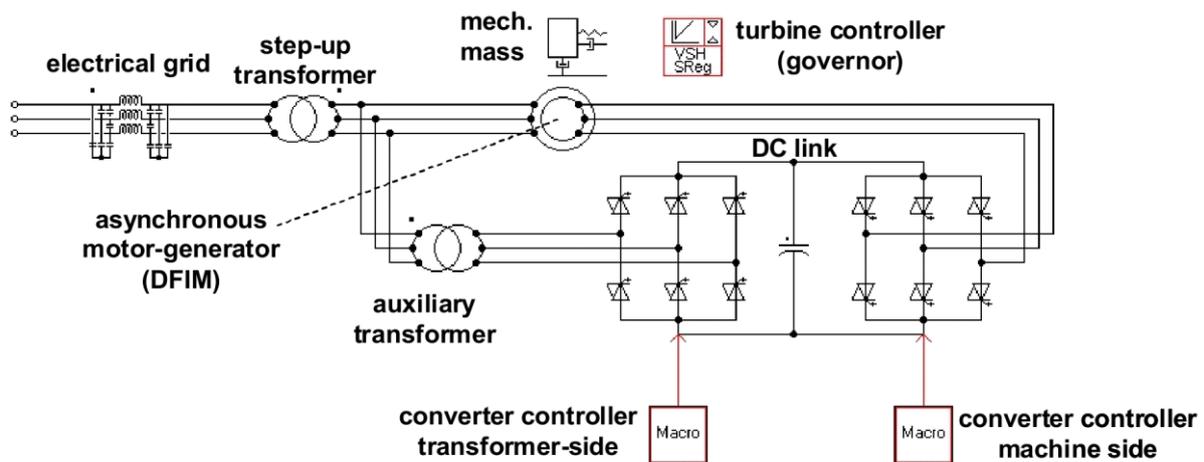


Abbildung 10: Doppelt-Gespeiste Asynchronmaschine mit GTOD-Vollumrichter [1]

Die relativ hohe harmonische Verzerrung kann durch Verwendung eines 3-stufigen Umrichters vermieden werden. Darauf wird jedoch an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Der nächste Abschnitt wird dahingegen der, in dieser Diplomarbeit verwendeter Maschinenanordnung gewidmet.

### 2.4.5 Synchronmotor/Generator mit selbstgeführtem Wechselrichter SCI6

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine Synchronmaschine mit selbstgeführtem Wechselrichter SCI6 (Self Commutated Inverter, 6 IGCTs/GTOs) gewählt. Der Grund ist die Einbindung in das Projekt GSG (Green Storage Grid). Im Rahmen dieses Projektes wurden die anderen Maschinenanordnungen schon erfolgreich modelliert und mit Simulationssoftware SIMSEN simuliert. Das Modell der Synchronmaschine mit Vollumrichter wird somit ähnlich zu [2] in das Gesamtmodell integriert, um Simulationen des gemischten

## 2. DAS DREHZAHLVARIABLE PUMPSPEICHERKRAFTWERK

Energiesystems mit konventionellen (fossile) sowie regenerativen Energiequellen (Wind und PV) durchzuführen.

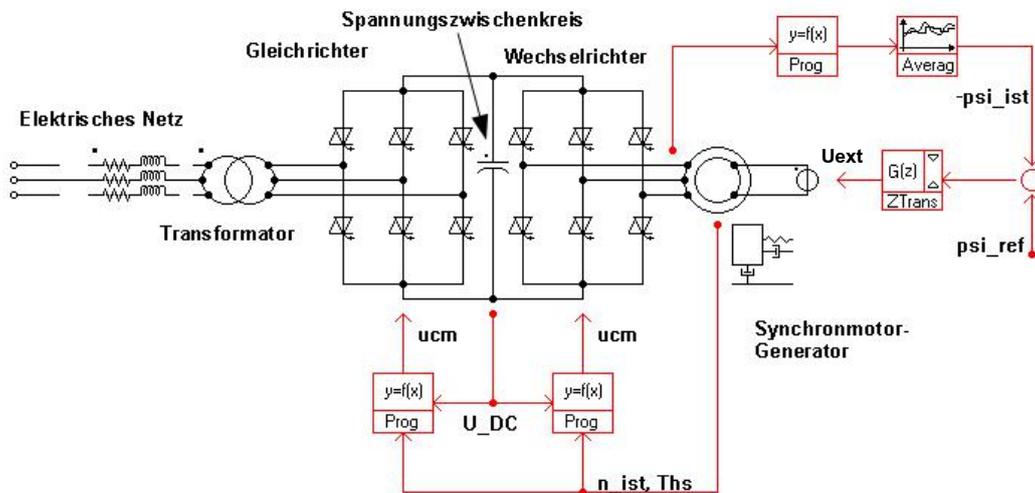


Abbildung 11: Synchronmaschine mit selbstgeführtem Wechselrichter

Abbildung 11 zeigt eine fremderregte Synchronmaschine mit Vollumrichter. Es handelt sich um einen Vollumrichter aus GTO-Thyristoren mit antiparallelen Dioden und Spannungszwischenkreis. Der Vollumrichter ist netzseitig durch einen Transformator an Übertragungsnetz gekoppelt. Maschinenseitig ist er mit dem Stator der Synchronmaschine verbunden. Synchronmaschine wird durch eine externe Gleichspannungsquelle fremderregt. Abbildung 11 zeigt schematisch die implementierten Regelungsstrukturen wie: Zwischenkreisspannungsregelung, Drehzahlregelung oder Erregungsflussregelung. Stellgrößen sind die Steuerbefehle  $ucm^1$  für den Gleichrichter sowie den Wechselrichter und die externe Erregungsspannung  $U_{ext}$ . Die Ausgangsgrößen sind die Drehzahl, die Scheinleistung und der Leistungswinkel. Die genaue Funktionsweise dieses Umrichters und die Zündstrategie wird näher im Abschnitt 4.1.1 beschrieben. Jetzt werden noch kurz die Vorteile (+) und die Nachteile (-) dieses Umrichters erwähnt [1], [7]:

- + niedrige harmonische Verzerrung
- + Regelung der Blindleistung zwischen dem Umrichter und dem Netz
- + Niedrigere Schaltverluste verglichen mit dem lastgeführten Wechselrichter
- + Verfügbar für alle Mittelspannungsbereiche, minimale Anzahl von Bauelementen für eine gewünschte Leistung
- Umformer muss für die gesamte Nennleistung ausgelegt sein
- Eine komplexe Regelung der Zündung für IGCT/GTO-Ventile verglichen mit dem lastgeführten Wechselrichter
- Höhere Kosten von IGCT verglichen mit SCR (ungefähr um einen Faktor 3)

<sup>1</sup> UCM ..U – Spannung, CM – „command“ Befehl im Englisch

## 3 Simulationssoftware SIMSEN

Für die Simulationen des Pumpspeicherkraftwerks wurde die Simulationssoftware SIMSEN (modular SIMulation software for analysis of ENergy conversion Systems) verwendet. SIMSEN wird an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne in Zusammenarbeit mit Industriepartnern seit 1992 entwickelt. Die heutige Version kann stationäre sowie transiente Vorgänge in elektrischen und hydraulischen Systemen simulieren, und eignet sich somit auch für die Simulation eines Pumpspeicherkraftwerks [8], [9].

### 3.1 Grafische Benutzeroberfläche – Programm EdiSim

SIMSEN verfügt über eine grafische Benutzeroberfläche, wo die Elemente des modellierten Systems grafisch hinzugefügt werden können. Die Auswahl eines Elementes erfolgt durch das obere Menü, und es stehen elektrische und hydraulische Elemente sowie diverse logische Funktionen und Makros zur Verfügung.

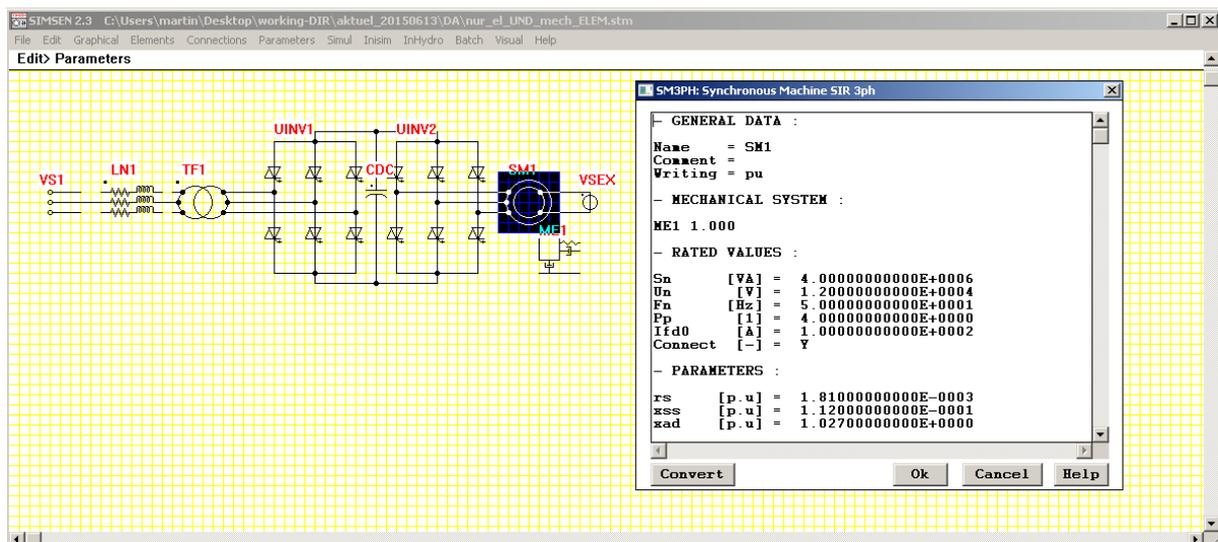


Abbildung 12: Entwicklungsumgebung von SIMSEN

In Abbildung 12 ist die Benutzeroberfläche von SIMSEN dargestellt. In dem dargestellten Beispiel ist das elektrische Schaltbild einer fremderregter Synchronmaschine mit Vollumrichter, Transformator, elektrischem Übertragungsnetz und einer mechanischen Last dargestellt. Rechts sieht man das Parameter-Fenster mit Abschnitten GENERAL DATA, MECHANICAL SYSTEM, RATED VALUES, PARAMETERS, SPECIFIED OPERATING POINT, CALCULATED VALUES und INITIAL CONDITIONS

Den Abschnitt GENERAL DATA haben alle Elemente in SIMSEN gemeinsam. Es beinhaltet allgemeine Informationen über das Element wie der Name (*Name*), Kommentar (*Comment*) und Form der Ausgabe (*Writing*). Die Namen müssen kürzer als 8 Buchstaben sein, und müssen unterschiedlich voneinander sowie von den Elementtypen sein. Mit dem Parameter *Writing* kann man festlegen, wie die Simulationsergebnisse zu speichern sind. Es sind vier Zustände „SI“, „PU“, „YES“ oder „NO“

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN

---

zugelassen, wobei die Ergebnisse dementsprechend in SI-Einheiten, in bezogenen Einheiten, wahlweise in SI oder PU beziehungsweise gar nicht gespeichert werden.

Im Abschnitt MECHANICAL SYSTEM kann die mechanische Verbindung zwischen Maschinen und mechanischen Lasten festgelegt werden. Im vorliegenden Beispiel aus Abbildung 12 ist die Synchronmaschine *SM1* mit der mechanischen Last *ME1* im positiven Sinne gekoppelt.

Wichtig für die Berechnung von Simulationsergebnissen in bezogenen Größen ist die Eingabe von Bezugsgrößen. Diese erfolgt im Abschnitt RATED VALUES. Bei einer Synchronmaschine gibt man die Bezugsleistung  $S_n$ , Bezugsspannung  $U_n$ , Bezugsfrequenz  $F_n$ , Polpaarzahl  $P_p$  und den Bezugserregerstrom  $I_{fd0}$  an.

Im Abschnitt PARAMETERS werden die Elemente mit Hilfe von Bezugsgrößen aus dem Abschnitt RATED VALUES dimensioniert. Die Eingabe erfolgt in bezogenen Größen. Für die oben erwähnte Synchronmaschine werden unter anderem folgende Größen eingegeben: der Statorwiderstand  $r_s$ , die Statorstreureaktanz  $x_{ss}$ , die Magnetisierungsreaktanz  $x_{ad}$  oder die Erregerstreureaktanz  $x_{sf}$ .

Sehr wichtig für den Simulationsstart ist der Abschnitt INITIAL CONDITIONS, wo die Anfangsbedingungen gesetzt werden. Die Anfangsbedingungen von elektrischen Elementen können auch mit dem Programm INISIM berechnet werden. Dabei wird der gewünschte Betriebspunkt im Abschnitt SPECIFIED OPERATING POINT angegeben, und die Ergebnisse werden automatisch im Abschnitt INITIAL CONDITIONS gespeichert.

Verbindung von zwei Elementen wird grafisch mit einem Draht (*Wire*), Verbindung von drei oder mehreren Elementen wird mit einem Knoten (*Crossing*) realisiert. Die Verbindungen zwischen den logischen Bausteinen werden jedoch nicht grafisch sondern in den Parametern gesetzt. Dazu kommen bei den logischen Bausteinen noch die Abschnitte REFERENCES X, DATA und REFERENCES Y hinzu. Deren Funktionalität wird im Abschnitt 3.2 anhand von konkreten Beispielen näher erklärt.

#### 3.2 Elemente eines Regelkreises

Regelkreise in SIMSEN werden durch Elemente wie *Prog*, *Reg*, *F-Pts* oder *Z-Trans* gebildet. In Abbildung 13 ist ein Regelkreis der Erregerflussregelung der Synchronmaschine abgebildet. Anhand von diesem Regelkreis wird die Funktionsweise von *Prog*, *Averag* und *Z-Trans* erklärt.

### 3. SIMULATIONS SOFTWARE SIMSEN

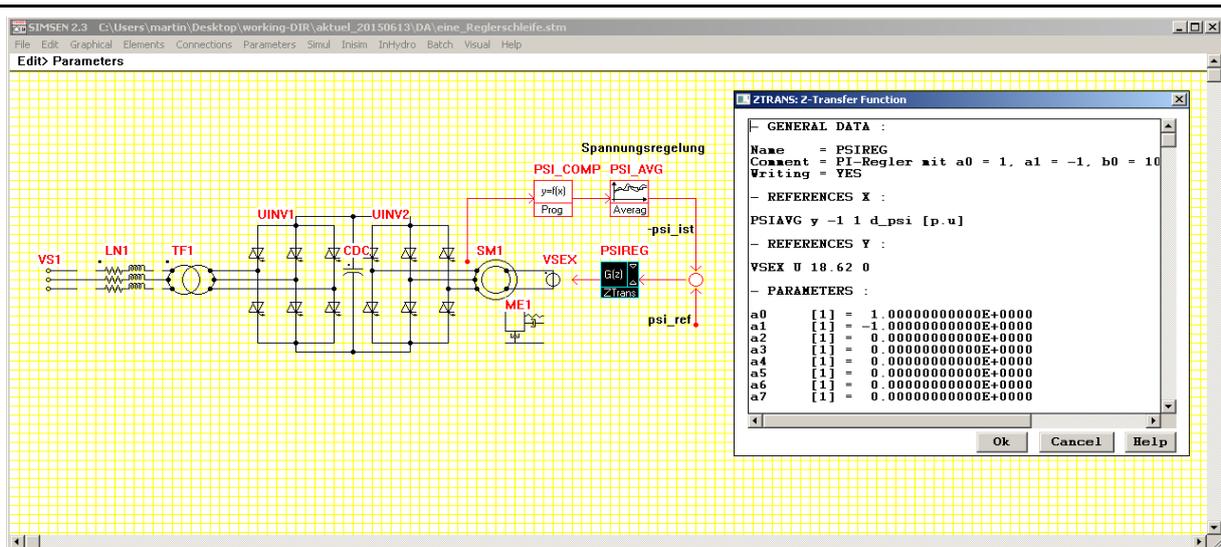


Abbildung 13 Regelkreise in SIMSEN

#### 3.2.1 Programm - Prog

Die Hauptaufgabe dieses Regelkreises ist es den Fluss auf einem konstanten Niveau zu halten. Die drei einzelnen Flüsse  $\Psi_a$ ,  $\Psi_b$  und  $\Psi_c$  stehen als Messwerte direkt zu Verfügung. Für eine Regelungsaufgabe sind sie jedoch nicht geeignet, da sie nur sinusförmige Momentanwerte an den drei Strängen darstellen. Um den Flussbetrag zu erhalten, werden sie deshalb zuerst mit der Park-Transformation in zwei aufeinander orthogonale Komponenten  $\Psi_d$  und  $\Psi_q$  überführt. Anschließend wird der Flussbetrag  $\Psi_{total}$  mit dem Satz von Pythagoras gerechnet.

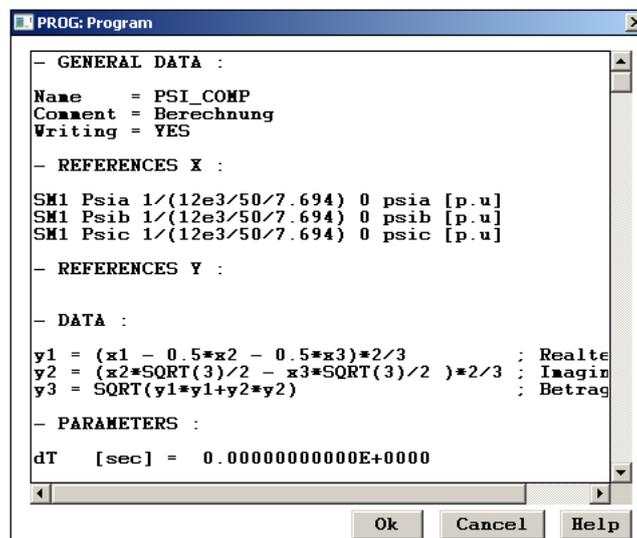


Abbildung 14: Programm PSI\_COMP

In der Abbildung 14 sieht man die Implementierung des obigen Algorithmus in einem Programm (*Prog*). In jedem Programm können beliebig viele Eingangsgrößen  $x_i$  auftreten. Diese sind nach folgender Vorschrift als REFERENCES X angeführt:

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN

---

ELEMENT\_NAME quantity\_name coeff1 coeff2 label [unit] comment (3.1)

was zu folgendem  $x_i$  entspricht:

$$X_i = \text{Element\_name}_i (\text{quantity\_name}_i * \text{coeff1}_i + \text{coeff2}_i) \quad (3.2)$$

$\text{Coeff1}_i$  wird für eine Normierung und  $\text{coeff2}_i$  für eine Verschiebung der Eingangsgröße  $x_i$  verwendet. Im Beispiel des Programms PSI\_COMP aus Abbildung 14 wird der nominelle Fluss mit (12e3/50/7.694) dividiert um den normierten Fluss zu erhalten.

In dem DATA-Abschnitt können bis zu 20 Ausgangsgrößen  $y_1, y_2 \dots y_{20}$  mit den vorher definierten Eingangsgrößen  $x_i$  berechnet werden. Im obigen Beispiel wird der Fluss entlang der direkten Achse  $\Psi_d$  dem Ausgang  $y_1$  und der Fluss entlang der Querachse  $\Psi_q$  dem Ausgang  $y_2$  zugeordnet:

$$\Psi_d = (\Psi_a - 0.5\Psi_b - 0.5\Psi_c) \frac{2}{3} \Leftrightarrow y_1 = (x_1 - 0.5*x_2 - 0.5*x_3)*2/3 \quad (3.3)$$

$$\Psi_q = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\Psi_b - \frac{\sqrt{3}}{2}\Psi_c\right) \frac{2}{3} \Leftrightarrow y_2 = (x_2*\text{SQRT}(3)/2 - x_3*\text{SQRT}(3)/2)*2/3 \quad (3.4)$$

Aus den orthogonalen Flusskomponenten kann schließlich mit dem Satz von Pythagoras der Gesamtfluss berechnet und am Ausgang  $y_3$  gespeichert werden.

$$\Psi_{total} = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} \Leftrightarrow y_3 = \text{SQRT}(y_1*y_1 + y_2*y_2) \quad (3.5)$$

Alle drei Ausgänge  $y_1, y_2$  und  $y_3$  stehen auch anderen Elementen zu Verfügung. Zu diesem Zwecke müssen sie lediglich als REFERENCES X angeführt werden.

#### 3.2.2 Mittelwertbilder – Averag

Um den Flussmittelwert zu bilden, wird der Ausgang *PSI\_COMP.y3* dem Mittelwertbilder *PSI\_AVG* als Eingang zugeführt. Wie schon im Abschnitt 3.2.1 erklärt, wird auch hier der Ausgang *PSI\_COMP.y3* mit der Vorschrift

$$\text{PSI\_COMP } y_3 \ 1 \ 0 \ \text{Betrag(Psi)} \ [p.u] \ ; \ dT*avg = \text{Mittelwertfenster} \quad (3.6)$$

angegeben. Es ist zu bemerken, dass meistens mit bezogenen Größen gearbeitet wird, und somit der  $\text{coeff1}_i = 1$  und  $\text{coeff2}_i = 0$  sind.

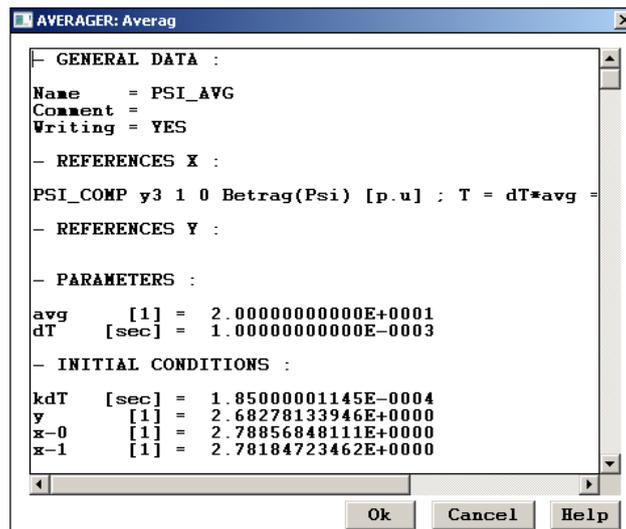


Abbildung 15: Mittelwertbilder PSI\_AVG

Der Mittelwertbilder bildet den Mittelwert eines Zeitfensters, das  $T_{\text{fenster}} = \text{avg} * dT$  lang ist. Dabei ist

- avg ... die Anzahl der Abtastwerte, und
- dT .... die Abtastperiode bei der Mittelwertbildung.

Im obigen Beispiel wird also der Mittelwert über 20 Abtastwerte mit einer Abtastperiode von 1ms gebildet. Dies ist zwar wichtig um die Oberschwingung aus dem Eingangssignal des Reglers weg zu filtern, es bringt aber auch einen großen Nachteil mit sich. Die dadurch entstandene Totzeit von 20ms kann unter Umständen zur Einschwingung der Regelgröße und zur Instabilität führen.

#### 3.2.3 Z-Transformation: Z-Trans

Die eigentliche Regelungsaufgabe wird im obigen Beispiel aus Abbildung 13 mit einer Z-Transformation (*Z-Trans*) realisiert. Im Gegenteil zu dem üblichen Regelungselement *Reg* (siehe Unterabschnitt 3.2.5) bietet das Element *Z-Trans* die Möglichkeit eine Übertragungsfunktion direkt im Z-Bereich anzugeben. Die Einschränkung auf die üblichsten Reglertypen (wie beim Regelungselement *Reg*) fällt somit weg. In den Parametern eines Z-Trans Elementes können die Koeffizienten des Nennerpolynoms  $a_0, a_1, a_2 \dots a_{19}$  sowie die, des Zählerpolynoms  $b_0, b_1, b_2 \dots b_{19}$  direkt angegeben werden (Abbildung 16, Abschnitt PARAMETERS). Die einzige Einschränkung ist die Ordnung der Polynome, die kleiner als 20 sein muss.

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN

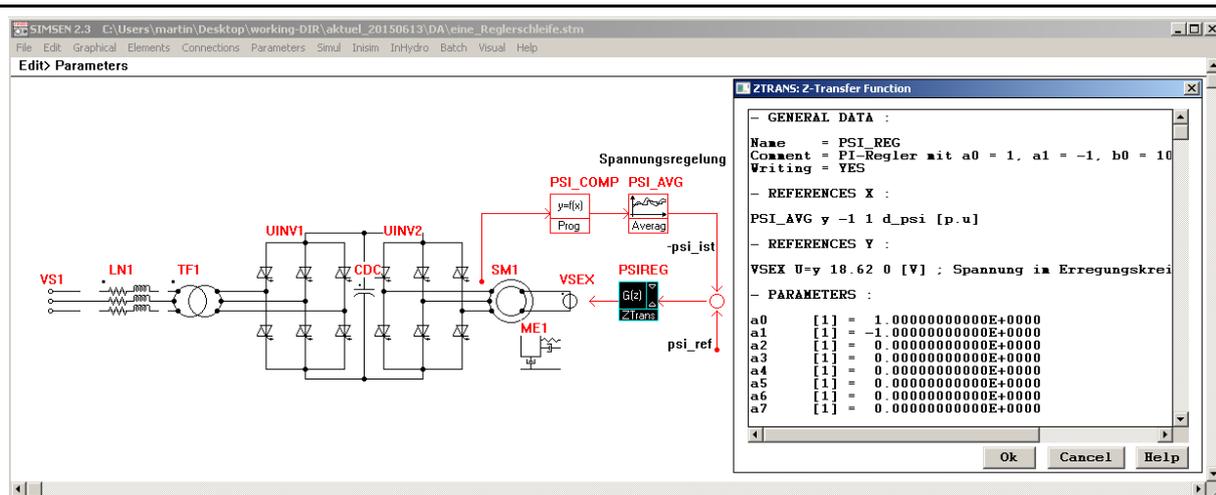


Abbildung 16: Regelung mit einer Z-Übertragungsfunktion

In diesem Beispiel werden die Koeffizienten auf

$$a_0 = 1, a_1 = -1, b_0 = 100.05, b_1 = -99.95 \quad (3.7)$$

gesetzt, und entsprechen somit folgender Z-Übertragungsfunktion und der zugehörigen zeitdiskreten Zeitfunktion

$$G(z) = \frac{100.05 - 99.95z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad \Leftrightarrow \quad y_k = 100.05 \cdot x_k - 99.95 \cdot x_{k-1} - y_{k-1} \quad (3.8)$$

Weiters wurden auch folgenden Parametern gesetzt:

$$y_{max} = 55, \quad y_{min} = -45, \quad dT = 0.5ms \quad (3.9)$$

wobei die Ausgangsbeschränkung durch  $y_{max}$  bzw.  $y_{min}$  und die Abtastzeit durch  $dT$  definiert sind.

Die Parameterabschnitte REFERENCES X, DATA und PARAMETERS wurden schon in Unterabschnitten 3.2.1 und 3.2.2 geklärt. In diesem Unterabschnitt wird noch der Syntax von REFERENCES Y kurz besprochen.

Unter REFERENCES Y können bis zu 20 Ausgangsgrößen anderen Elementen zugeordnet werden. In diesem Falle wird aber meistens kein Eingangssignal geschrieben, sondern eher Elementparametern gesetzt. Das Eingangssignal kann nämlich selbst durch die REFERENCES X eines Elementes abgefragt werden. Die Parameter müssen jedoch „von außen“ verändert werden. Genau zu diesem Zwecke werden REFERENCES Y eingesetzt. In dem untersuchten Beispiel wird die Spannung als Parameter einer gesteuerten Spannungsquelle  $VSEX.U$  verändert<sup>2</sup>

$$VSEX \ U=y \ 18.62 \ 0 \ [V] \ ; \ \text{Spannung im Erregungskreis} \quad (3.10)$$

Die Gleichung (3.10) wird nach folgender Vorschrift geschrieben

<sup>2</sup> Speziell in diesem Falle könnten die REFERENCES Y auch nach der folgenden Vorschrift geschrieben werden: „VSEX U 18.62 0 [V] ; Spannung im Erregungskreis“. Dies ist aber nur dann möglich, wenn eine einzige Ausgangsgröße  $y$  anstelle von mehreren Ausgängen  $y_1, y_2, \dots, y_{20}$  geschrieben wird. Im Falle von einer SISO-Übertragungsfunktion  $Z\text{-Trans}$  ist dies der Fall.

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN

$$ELEMENT\_NAME \text{ Größe} = y_i \text{ coeff1}_i \text{ coeff2}_i \text{ [Einheit]} ; \text{Kommentar} \quad (3.11)$$

Dabei wird der Parameter der Gleichspannung  $U$  der Spannungsquelle  $VSEX$  als Ausgang der Übertragungsfunktion  $PSIREG$  gesetzt. Anschließend wird es nach Gleichung (3.12) multipliziert.

$$VSEX.U = PSIREG.y \cdot 18.62V + 0V \quad (3.12)$$

Mit der erklärten Funktionsweise von den wichtigsten Parameterfelder REFERENCES X, REFERENCES Y und DATA kann schon auf weitere wichtigen Elemente wie die Punktfunktion bzw. den Regulator herangegangen werden (Unterabschnitte 3.2.4 und 3.2.5).

#### 3.2.4 Punktfunktion: F-Pts

Bei der Punktfunktion wird der Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang nicht durch eine Übertragungsfunktion, sondern durch eine statische Zuordnung gegeben. Die zugeordneten X- und Y-Werte sind in einer Tabelle im Feld DATA nach der Abbildung 17 angegeben.

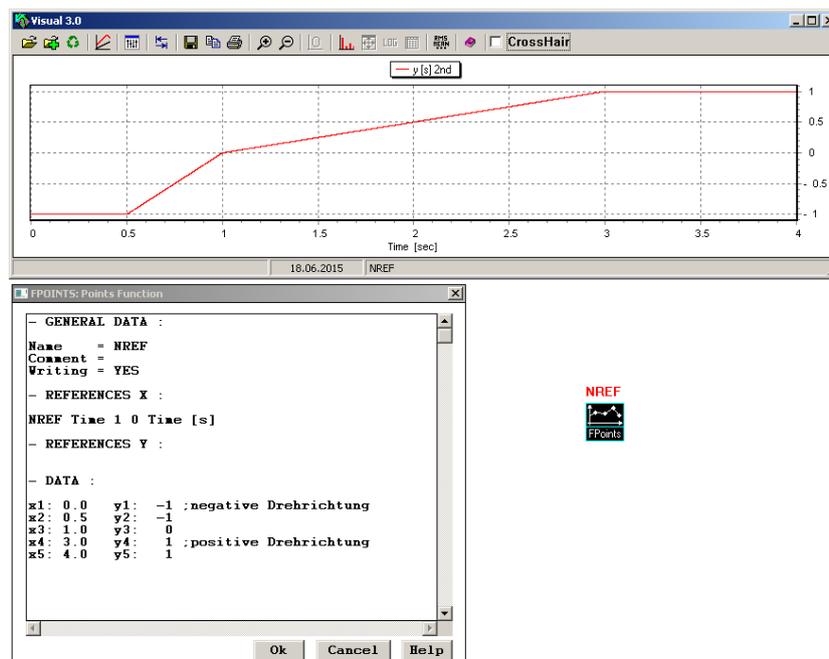


Abbildung 17: Punktfunktion F-Pts als Trajektorievorgabe

Die Punktfunktion eignet sich somit hervorragend für die Implementierung einer Kennlinie oder einer Trajektorievorgabe. In dem Beispiel aus der Abbildung 17 wurde die Punktfunktion als Trajektorievorgabe eingesetzt. Die Zeit wird im Feld REFERENCES X als die Eingangsgröße zugeführt. Die Zuordnung der X zu den Y-Werten findet in der Tabelle im Feld DATA statt. Im Programm VISUAL (Programm für die Visualisierung der Simulationsergebnisse – Abschnitt 3.5) wird der Ausgang der Punktfunktion  $NREF$  auf die Zeit aufgetragen gezeichnet.

#### 3.2.5 Regulator: Reg

Das wichtigste Regelungselement in SIMSEN ist der Regulator ( $Reg$ ). Es eignet sich für 7 Reglertypen (P, I, PI, PD, PID, PID\* und Hystereseregler). Die Definition der Ein- und Ausgänge erfolgt

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN

in REFERENCES X bzw. REFERENCES Y. Das Eingang-Ausgangsverhalten wird im Feld PARAMETERS definiert.

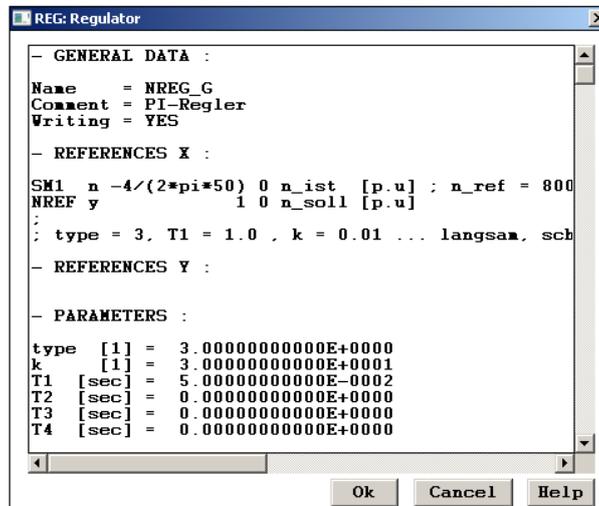


Abbildung 18: Regulator Reg als ein PI-Regler

Unter den PARAMETERS lassen sich folgende Attribute einstellen:

- „type“ ... welcher Reglertyp (P, I, PI, PD, PID, PID\* oder Hystereseregler)
- „k, T1, T2, T3, T4“ ... Reglerverhalten
- „minY, maxY, minX, maxX“ ... Ein- und Ausgangsbeschränkungen

Bei dem in Abbildung 18 angeführten Beispiel handelt es sich um einen PI-Regler ( $type = 3$ ) mit den Reglerkoeffizienten  $k = 3.0$  und  $T1 = 50ms$ . Die Ausgänge sind auf den Arbeitsbereich beschränkt ( $minY = -0.95$ ,  $maxY = 0.95$ ). Die Reglerabweichung wird in REFERENCES Y durch die Subtraktion der Ist-Größe (SM1.n) von der Soll-Größe (NREF.y) gebildet. Das Feld REFERENCES Y ist leer, weil der Ausgang des Elementes NREF „von außen“ durch andere Elemente referenziert wird.

### 3.3 Programm Inisim

Bei den elektrischen Elementen können die Anfangszustände durch den Lastflussanalyseprogramm INISIM berechnet werden. Der gewünschte Betriebspunkt wird dabei im Feld SPECIFIED OPERATING POINT angegeben, und das Ergebnis wird im Feld CALCULATED VALUES gespeichert (Abbildung 19). Diese Anfangswerte werden dann für den Simulationsstart verwendet.

Programm INISIM kann jedoch nur für elektrische Bauelemente verwendet werden. Die Anfangswerte der logischen Bauelemente müssen manuell gesetzt werden. Falls Halbleiter vorhanden sind, so darf INISIM überhaupt nicht verwendet werden, und alle Anfangswerte müssen manuell gesetzt werden.

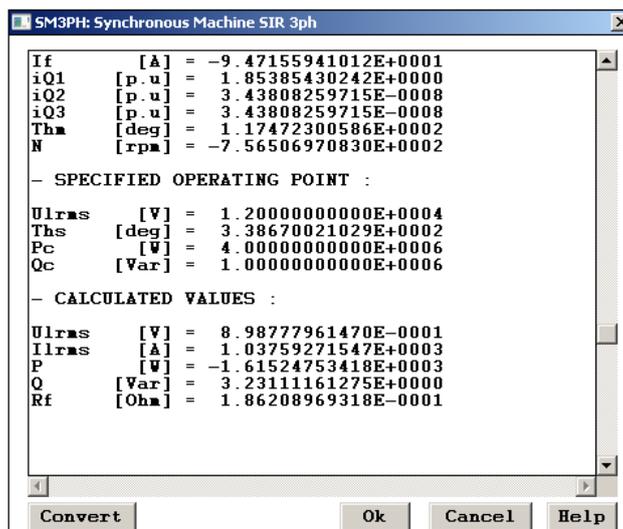


Abbildung 19: Berechnung des Anfangszustandes mit INISIM

### 3.4 Simulationsablauf - Programm Sim

Um das implementierte Modell zu simulieren, müssen auch die Simulationsparameter in der Main-Datei gesetzt werden (*Menu -> Parameters -> Simulation*). In der Main-Datei gibt es Felder SIMULATION PARAMETERS, CONSTANT DATA, PARAMETERS, INITIAL CONDITIONS und DISTURBANCES. Es wird hier kurz auf die einzelnen Felder herangegangen.

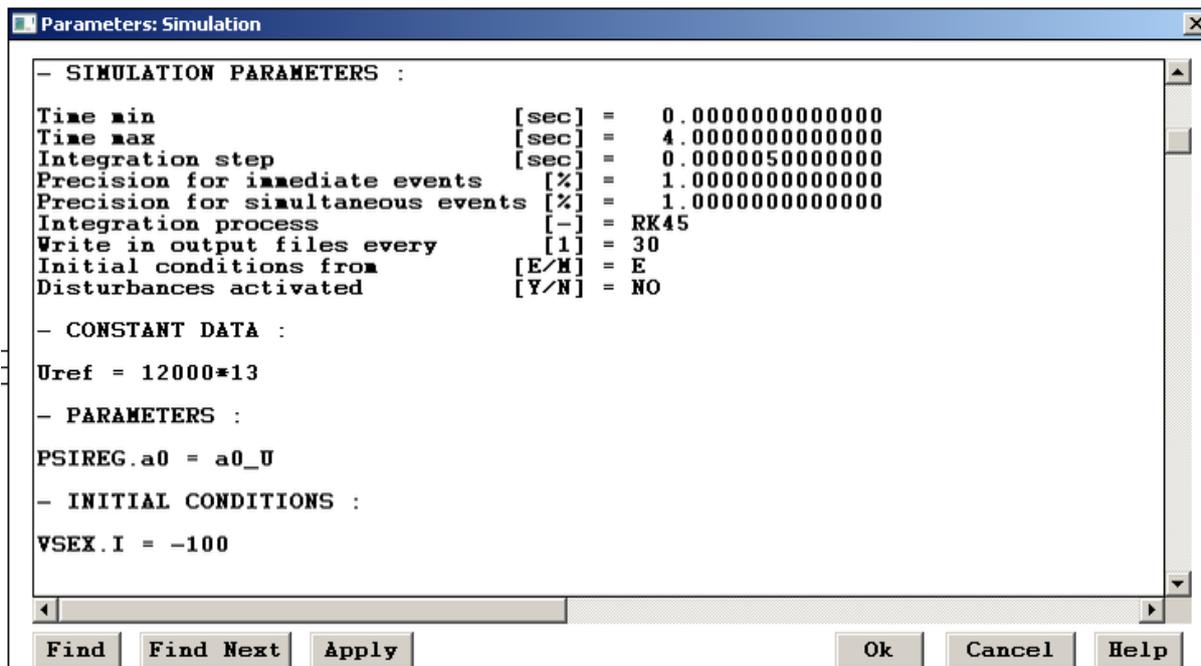


Abbildung 20: Simulationsparameter

#### 3.4.1 SIMULATION PARAMETERS

Im Feld SIMULATION PARAMETERS werden die allgemeine Simulationsparameter wie Anfangszeit und Endzeit (*Time min*, *Time max*) gesetzt. Dabei muss die Anfangszeit logischerweise kleiner als die Endzeit sein. Ein weiterer sehr wichtiger Parameter ist die Integrationszeit (*Integration time*). Dies ist die Zeit, die bei dem Integrationsverfahren verwendet wird. Diese Zeit beeinflusst einerseits die

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN

---

Auflösung der Simulationsergebnisse, und andererseits den gesamten Zeitaufwand der Simulation. In dem Beispiel aus Abbildung 20 ist die Integrationszeit  $T_{\text{int}} = 5\mu\text{s}$ , was zu einer sehr niedrigen Integrationszeit und großem Simulationsaufwand entspricht.

Es stehen drei Integrationsalgorithmen zu Verfügung (*Runge Kutta 45 – RK45, Runge Kutta 23 – RK23* oder *Euler*). Um den Zeitaufwand der Simulation niedrig zu halten können Simulationsergebnisse nur für jedes k-ten Intervall gespeichert werden (*Write in output every*). Bei einem langsamen System kann durch diese Option viel Zeit und Speicherort an der Festplatte gespart werden.

Mit der Option *Initial Conditions from* kann ausgewählt werden, ob die Startwerte der Simulation aus der Main-Datei oder aus den einzelnen Elementen verwendet werden. Die Störungen können im Feld *Disturbances activated* eingeschaltet werden. Dadurch können die Elementparameter wie zum Beispiel die mechanische Last, oder die Netzspannung während der Simulation variiert werden. Dies eignet sich besonders für die Simulation eines Betriebsfehlers.

#### 3.4.2 CONSTANT DATA

Im Feld CONSTANT DATA werden globale Konstanten definiert. Die übliche Anwendung sind die Referenzwerte, die in jedem Element zur Bildung von bezogenen Größen verwendet werden. Ein Beispiel davon ist in Abbildung 20 zu sehen, wo die Referenzspannung  $U_{\text{ref}} = 12\text{kV}$  für den Spannungsregler definiert wird. Die Werte aus dem Feld CONSTANT DATA sind dann in jedem Element „sichtbar“.

#### 3.4.3 PARAMETERS und INITIAL CONDITIONS

Im Gegensatz zu CONSTANT DATA sind die Konstanten aus dem Feld PARAMETERS schon konkreten Elementen zugeordnet. Diese Zuordnung wird mit dem Punkte-Operator gemacht. In dem Beispiel aus Abbildung 20 wird der Koeffizient  $a_0$  des PI-Reglers PSIREG zu  $a0\_U$  gesetzt, wobei der Zahlenwert von  $a0\_U$  wiederum im Feld CONSTANT DATA definiert wird. Die gleiche Definition von Elementparameter kann auch in den Elementen selber stattfinden. Die Definition in der Main-Datei hat aber den Vorteil, dass sämtliche Parameterdefinitionen an einem Ort sind, und die Übersicht gestiegen ist.

Definition von Anfangswerten kann ebenfalls wahlweise in den Simulations- oder in den Elementparametern stattfinden. Das Feld INITIAL CONDITIONS ist dafür vorgesehen. Der Syntax der Anfangswerte ist gleich zu dem der Elementparameter.

#### 3.4.4 DISTURBANCES

Während der Simulation können die Elementparameter gestört werden. Jede Störung ist definiert durch eine Zeile im Feld DISTURBANCES. Es muss die Zeit des Ereignisses, sowie der gestörte Elementparameter nach folgender Vorschrift angegeben werden:

$$\text{Time: } 0.5 \text{ ME1.Text} = -100000 \quad (3.13)$$

Laut Gleichung (3.13) wird zu Zeit  $t = 0.5\text{s}$  das Lastmoment  $T_{\text{ext}}$  der mechanischen Last ME1 auf  $-100\text{kNm}$  gesetzt.

Wenn alle Simulationsparameter in der Main-Datei gesetzt sind, so kann die Simulation durch die Wahl von Menü -> Sim gestartet werden. Falls keine Fehlermeldungen auftreten, so öffnet sich eine

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN

Log-Datei, wo der Simulationsfortschritt gezeigt ist. Anschließend können die Simulationsergebnisse mit dem Programm VISUAL graphisch visualisiert werden.

Die Simulation kann unter Umständen sehr lange dauern. Die Gesamtzeit der Simulation wird durch folgende Faktoren stark beeinflusst:

- die Anzahl und Komplexität von Elementen
- die Zeitkonstanten der Elementen und die daraus folgende Integrationszeit
- die Wahl „Write in Every“ um überflüssige Simulationsergebnisse zu verwerfen

Da die Anzahl und Komplexität von Elementen nicht beeinflusst werden kann, so müssen die anderen Parametern variiert werden. So kann die Simulation durch Vergrößern der Integrationszeit oder der Zeitkonstanten oder durch Speichern von jeden 10ten Elementen beschleunigt werden.

#### 3.5 Grafischer Ausgang - Programm Visual

Um die Simulationsergebnisse graphisch auswerten zu können verfügt SIMSEN über den Programm VISUAL. Im VISUAL können die Ergebnisse entweder gegen die Zeit oder gegen einander geplottet werden. Weiters verfügt VISUAL über Werkzeuge für Post-Processing Analyse, wie zum Beispiel die Fourier-Analyse des Signals.

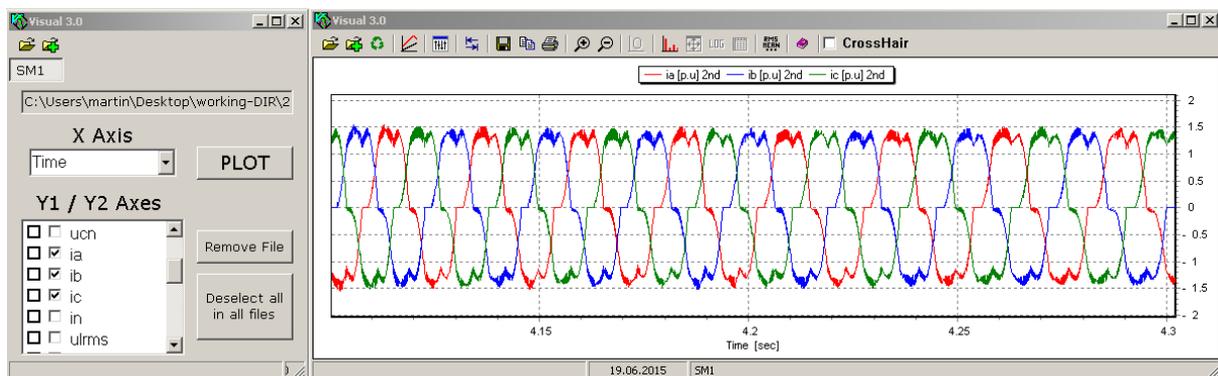


Abbildung 21: Programm VISUAL - links ist das Bedienungdialog, rechts ist die visuelle Ausgabe

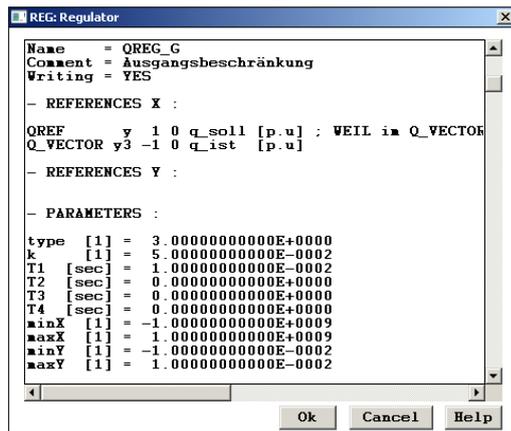
In Abbildung 21 rechts ist der Stromverlauf der Ströme an den Maschinenklemmen der Synchronmaschine SM1 dargestellt. Links ist das Eingabedialog, wo die dargestellten Größen für die Y-Achse, sowie für die X-Achse ausgewählt werden. Dabei ist es auch möglich eine Größe gegenüber einer anderen zu zeichnen, und somit ein Zeigerdiagramm zu bekommen. Als Beispiel ist die Leistungsortkurve zu nennen, wo die Wirkleistung  $P$  auf der X- und die Blindleistung  $Q$  auf der Y-Achse eingetragen sind.

#### 3.6 Darstellung der Elementparametern

In den Abschnitten 3.2 bis 3.4 wurden zahlreiche Bildschirmfotos der Parameterfenster abgebildet. Diese Fenster enthalten alle Informationen über die Elemente, bzw. über die Simulation.

Die Darstellung der Elementparameter mit den Bildschirmfotos ist aber in den meisten Fällen ungünstig. Viele Parameter bleiben nämlich unverändert verglichen mit der Elementvorlage. Andere Parametern können wegen der konstanten Fenstergröße nicht abgebildet werden. Aus diesem Grunde werden nur die veränderten Parameter in einer Tabelle nach Abbildung 22 dargestellt.

### 3. SIMULATIONSSOFTWARE SIMSEN



Parameter	Wert
NAME	QREG_G
x1	$QREF.y * 1 + 0$
x2	$Q\_VECTOR.y3 * (-1) + 0$
type	3
k	0.05
t1	0.01s
minY	-0.01
maxY	0.01

Abbildung 22: Darstellung der Elementparameter: links die Parameterdatei, rechts die Darstellung in der Diplomarbeit mittels einer Tabelle

## 4 Modellimplementierung in SIMSEN

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Modell eines Pumpspeicherkraftwerks in Simulationssoftware SIMSEN implementiert (s. Abbildung 23). Das modellierte Pumpspeicherkraftwerk besteht aus einer Synchronmaschine mit GTO-Vollumrichter. Der Vollumrichter mit einem 40kV-Spannungszwischenkreis ist durch den Transformator an das 150kV Übertragungsnetz gekoppelt. Die Auslegung des elektrischen Untersystems sowie seine Regelung wird in dem Abschnitt 4.1 behandelt.

Der Vollumrichter arbeitet mit der Pulsweitenmodulation (PWM) bei einer Taktfrequenz von 4kHz, was zu einer sehr niedrigen Integrationszeit führt. Aus diesem Grunde sind die Simulationen des vollständigen Modells mit Vollumrichter sehr langsam. Eine Lösung dieses Problems bietet sich durch die Verwendung von Ersatzspannungsquellen, die den netzseitigen und maschinenseitigen Umrichter durch eine dreiphasige sinusförmige Spannungseinprägung ersetzt. Dieser Ansatz wird im Abschnitt 4.2 näher beschrieben. Anschließend wird das vollständige mit dem vereinfachten Modell verglichen.

### 4.1 Das vollständige Modell

Das vollständige Modell ist ein Modell mit dem GTO-Vollumrichter. Es werden zwei GTO-Vollbrücken verwendet, um die Spannungen sowie Ströme beider Polaritäten einspeisen zu können. Mit einem Vollumrichter sind somit ein drehzahlvariabler Motor- sowie auch ein Generatorbetrieb möglich. Die Blindleistung kann bei Bedarf erzeugt oder verbraucht werden.

Die implementierte Regelungsstruktur ermöglicht die Regelung von Blindleistung, Leistungswinkel und von Drehzahl. Die Zwischenkreisspannung wird dabei auf einen konstanten Wert geregelt. Der einzige Unterschied zwischen dem hier behandelten vollständigen Modell und dem vereinfachten Modell aus dem Abschnitt 4.2 liegt in der Verwendung von GTO-Thyristoren (Gate Turn Off-Thyristoren). Sie ermöglichen den PWM-Betrieb um eine annähernd sinusförmige Strom- und Spannungsgestalt zu haben.

<b>Spannungsquelle VS1</b>	<b>Wert</b>
$U_{\text{Netz}}$	110kV
$f_{\text{Netz}}$	50Hz
<b>Übertragungsnetz LN1</b>	<b>Wert</b>
$L_{\text{Netz}}$	1mH
$R_{\text{Netz}}$	10m $\Omega$
<b>Transformator TF1</b>	<b>Wert</b>
$S_{\text{nenn}}$	240MVA
$U_{\text{nenn},1}$	110kV
$U_{\text{nenn},2}$	12kV
Windungsanordnung	Yy0

Tabelle 2: Datenschild der Spannungsquelle VS1, des Übertragungsnetzes und des Transformators TF1

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Die verwendeten Regelungsstrukturen werden ab dem Unterabschnitt 0 näher beschrieben. Die Parametrierung des Übertragungsnetzes ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

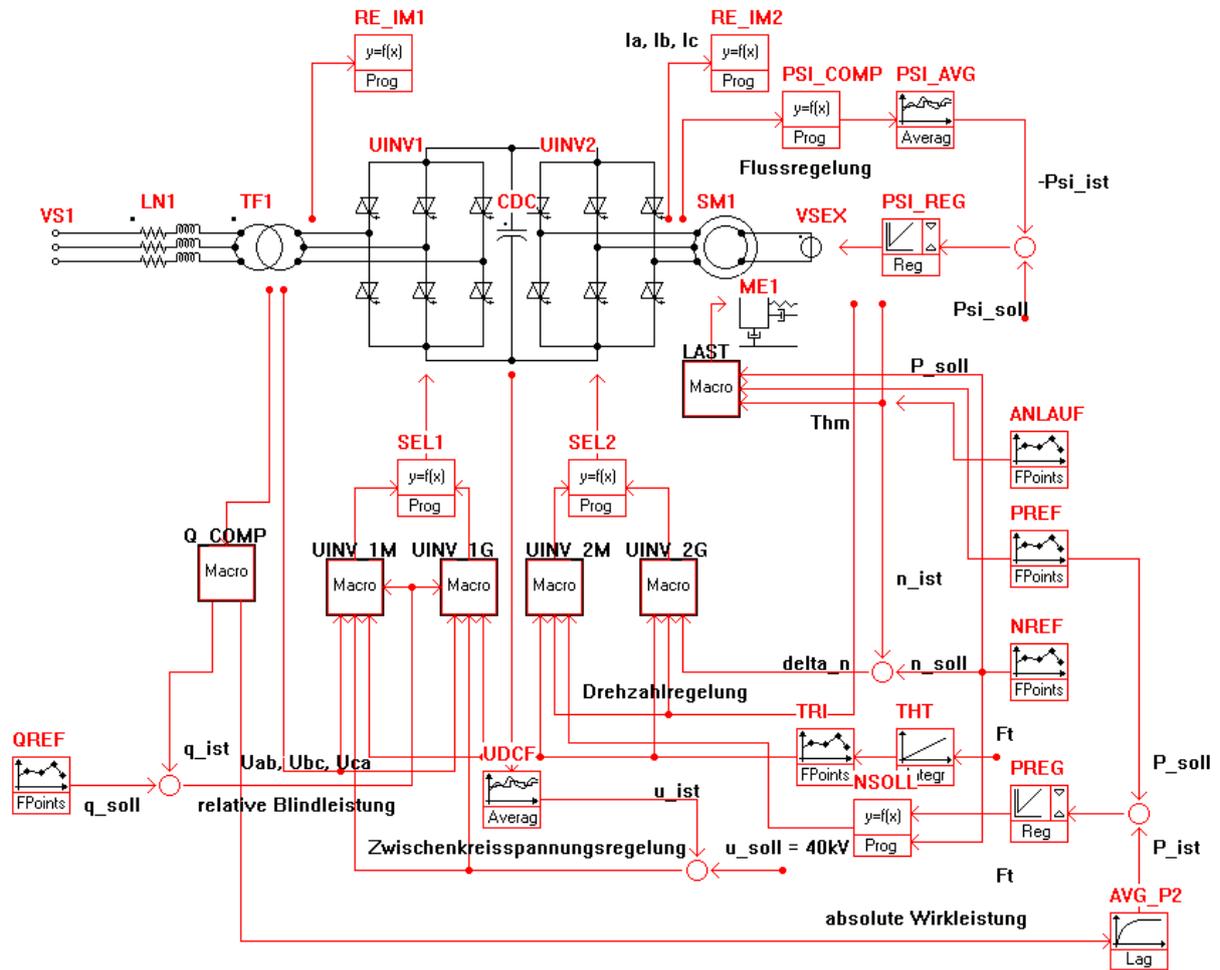


Abbildung 23: Das vollständige Modell des Pumpspeicherkraftwerks

Die Synchronmaschine, der Vollumrichter und die mechanische Last sind in der Tabelle 3 parametrisiert.

Umrichter UINV1, UINV2 und CDC	Wert
Typ	GTOD, PWM
$R_{on}$	0.5mΩ
$R_{off}$	10MΩ
dT	5μs
$C_{DC}$	10mF
Synchronmaschine SM1	Wert
$S_{nenn}$	240MVA
$U_{nenn}$	12kV
Pp	4

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

$I_{fd0}$	10000A -> 500A
<b>SM1 – fortgesetzt</b>	<b>Wert</b>
$r_s$	0.00181 [p.u]
$x_{ss}$	0.11200 [p.u]
$x_{ad}$	1.02700 [p.u]
$r_f$	0.00049 [p.u]
$x_{sf}$	0.21259 [p.u]
<b>Mechanische Last ME1</b>	<b>Wert</b>
$P_{nenn}$	240MW
$N_{nenn}$	750rpm
$J$	$2 \cdot 10^6 \text{kgm}^2$
<b>Erregung VSEX</b>	<b>Wert</b>
Typ	geregelte Gleichspannungsquelle
$U_{nenn}$	237.6V

Tabelle 3: Parametern der Synchronmaschine SM1, der mechanischen Last ME1, der Erregung VSEX und des Spannungszwischenkreisumrichters UINV1, UINV2 + CDC

##### 4.1.1 Arbeitsweise des GTOD-Vollumrichters

Der Vollumrichter ist ein wesentlicher Bestandteil der drehzahlvariablen Antriebe. Der, in dieser Diplomarbeit verwendete Vollumrichter verwendet die GTO-Thyristoren, und ermöglicht einen 4-Quadranten-Betrieb. In diesem Abschnitt wird die verwendete Pulsweitenmodulation samt der Zündreihenfolge für alle Betriebe detailliert erklärt.

Der GTO-Vollumrichter in dieser Diplomarbeit funktioniert wie ein sogenannter Vierquadrantensteller (4QS). Das heißt, dass der Umrichter in allen vier Quadranten arbeiten kann. Unter den „vier Quadranten“ versteht man entweder die vier Quadranten des Spannung/Strom-Diagramms, des Blind- und Wirkleistungsdiagramms oder des Drehmoment/Drehzahl-Diagramms. Die angelegte Wechselspannung  $U_1$  der Frequenz  $f_1$  wird in die Wechselspannung  $U_2$  der Frequenz  $f_2$  umgeformt und umgekehrt. Dabei wird die angelegte Spannung zuerst durch den Gleichrichter UINV1 in die Gleichspannung  $U_{DC}$  umgeformt, und anschließend durch den Wechselrichter UINV2 in die Ausgangsspannung  $U_2$  umgeformt. Wegen des Pulsbetriebs bei der PWM muss die Energie gespeichert werden. Dazu dient der Spannungszwischenkreis mit dem Zwischenkreiskondensator. Die im Zwischenkreis angelegte Spannung  $U_{DC}$  ist wegen der Betriebsart des Gleichrichters höher, als die Eingangsspannung. Diese Betriebsart wird als Hochsetzsteller bezeichnet. Der Wechselrichter wird dagegen als ein Tiefsetzsteller betrieben [10], [11].

Der Generatorbetrieb funktioniert analog zu dem schon erwähnten Motorbetrieb. Der Vollumrichter ist symmetrisch aufgebaut, und er schaut motor- und generatorseitig gleich aus. In diesem Abschnitt werden die Strompfade und die daraus folgende Thyristoransteuerung für vier Fälle beim Motorbetrieb beschrieben. Zuerst wird der Übergang von +Uab nach -Uca beim netzseitigen Umrichter (Hochsetzsteller) beschrieben, und danach von +Uab nach -Uca beim maschinenseitigen

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Umrichter (Tiefsetzsteller). Der Übergang zu den anderen Fällen<sup>3</sup> auf der Netz- und auf der Motorseite erfolgt analog dazu, und braucht nicht behandelt zu werden. Die Funktionsweise von allen leitenden Zuständen kann auf folgenden Fällen vollständig illustriert werden.

Zuerst wird der Fall  $+U_{ab}$  behandelt. In diesem Zustand ist der Spannungsbetrag an der Phase  $U_{ab}$  maximal. Deswegen leiten in der Nutzperiode die Dioden  $D_4$  und  $D_3$  (s. Abbildung 24). In dieser Nutzperiode senkt der Strom und der Zwischenkreiskondensator  $C_{DC}$  wird aufgeladen. Die Induktivität des Transformators ist für die Funktionsweise des Hochsetzstellers ganz wichtig, da sie gemeinsam mit dem Zwischenkreiskondensator das dynamische Verhalten des Hochsetzstellers bestimmt (analog zu dem einphasigen Fall aus [10] Seite 311, Abb. 18-10). Es kann eine Analogie zwischen dem einphasigen Fall aus [10] und dem dreiphasigen Fall aus Abbildung 24 hergestellt werden. Die Speicherdrossel  $L$  wird hier durch die Transformatorinduktivität  $L_{TH}$  bzw. durch die Statorinduktivität  $L_{SM}$  dargestellt. Der Schalter  $S$  wird mit den entsprechenden Thyristoren  $TH_i$ , und die Boost-Diode  $D$  mit den zugehörigen Dioden  $D_i$  repräsentiert. Der Glättungskondensator  $C$  wird logischerweise durch den Zwischenkreiskondensator realisiert [10].

In der Freilaufperiode steigt der Strom mit einer Zeitkonstante  $(L_{TF} + L_{TH}) / (R_{TF} + R_{TH})$ . Es leitet die Diode  $D_4$  und der Thyristor  $TH_5$ . Der Kondensator bleibt aufgeladen. Die Freilauf- und die Nutzperiode werden mit der Taktfrequenz  $f_{PWM} = 4kHz$  wiederholt, und die Ausgangsspannung wird durch das Verhältnis der Nutz- zu der Freilaufperiode bestimmt.

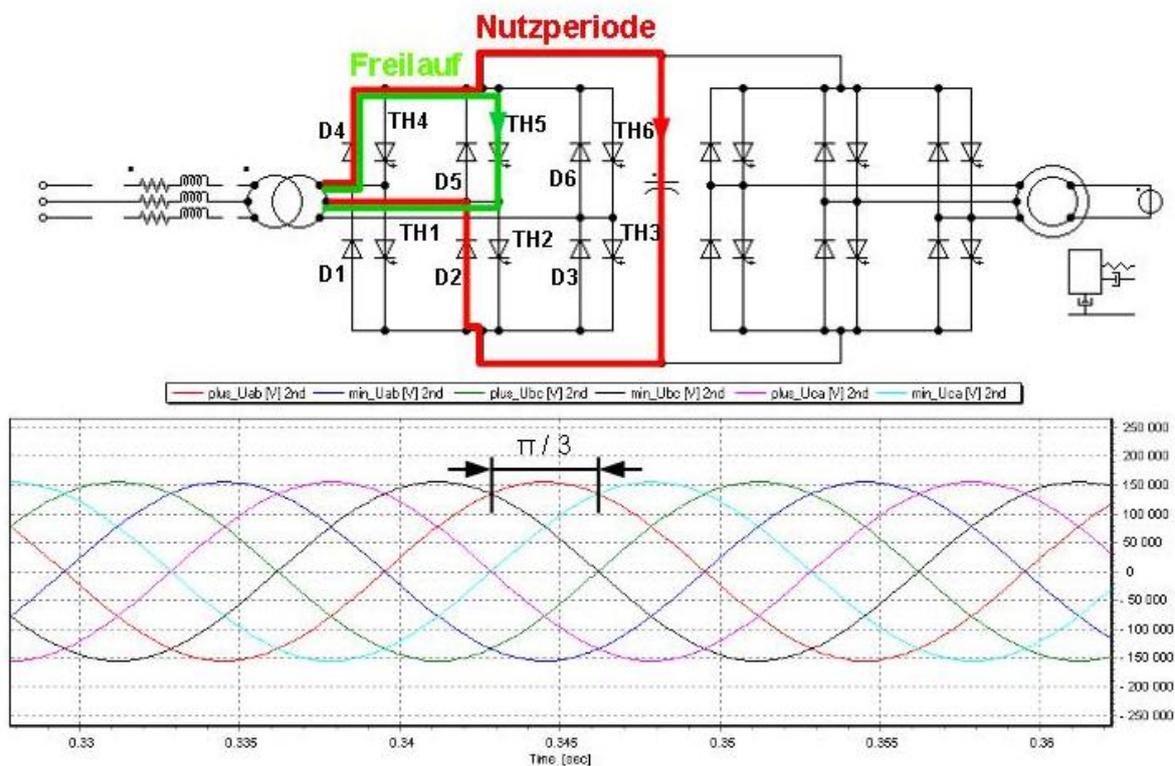


Abbildung 24: Strompfade bei der Nutz- und Freilaufperiode im Hochsetzstellerbetrieb des UINV1 wenn die Spannung  $U_{ab}$  maximal ist

<sup>3</sup> Insgesamt wird zwischen 6 Zuständen geschaltet:  $+U_{ab} \rightarrow -U_{ca} \rightarrow +U_{bc} \rightarrow -U_{ab} \rightarrow +U_{ca} \rightarrow -U_{bc} \rightarrow +U_{ab}$ . Bei jedem Zustand wird zwischen einer Nutzperiode und einer Freilaufperiode mit der Taktfrequenz gepulst umgeschaltet.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

In der Abbildung 24 werden die zwei Strompfade der Nutz- und der Freilaufperiode gezeigt. Weiters sind auch die Zeitverläufe der angelegten Spannungen  $+U_{ab}$ ,  $-U_{ab}$ ,  $+U_{bc}$ ,  $-U_{bc}$ ,  $+U_{ca}$  und  $-U_{ca}$  dargestellt. Die Grundregel dieses Verfahrens ist, dass jeweils die höchste angelegte Spannung weitergeleitet wird. Es sind also 6 Spannungsvektoren möglich, und bilden einen hexagonal rotierenden Spannungszeiger.

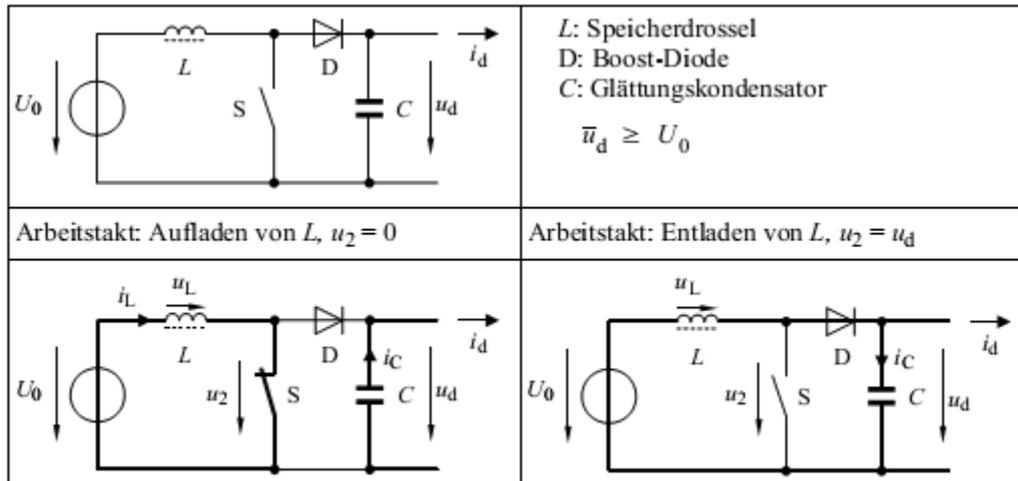


Abbildung 25: Der einphasige Hochsetzsteller mit einem Glättungskondensator und einer Boost-Diode [10]

Nach dem Ablauf der  $U_{ab}$ -Periode wird die  $-U_{ca}$  bzw.  $+U_{ac}$ -Periode angeschaltet. Während der  $-U_{ca}$  Periode wird die Phasenspannung  $U_{ca}$  minimal. In der Nutzperiode leiten die Dioden  $D_4$  und  $D_3$ , und laden den Kondensator auf. Während der Freilaufperiode leitet die Diode  $D_4$  mit dem Thyristor  $TH_3$  und der Strom steigt auf während der Zwischenkreiskondensator aufgeladen bleibt. Die beiden Perioden werden mit der Taktfrequenz von  $4kHz$  gepulst geschaltet.

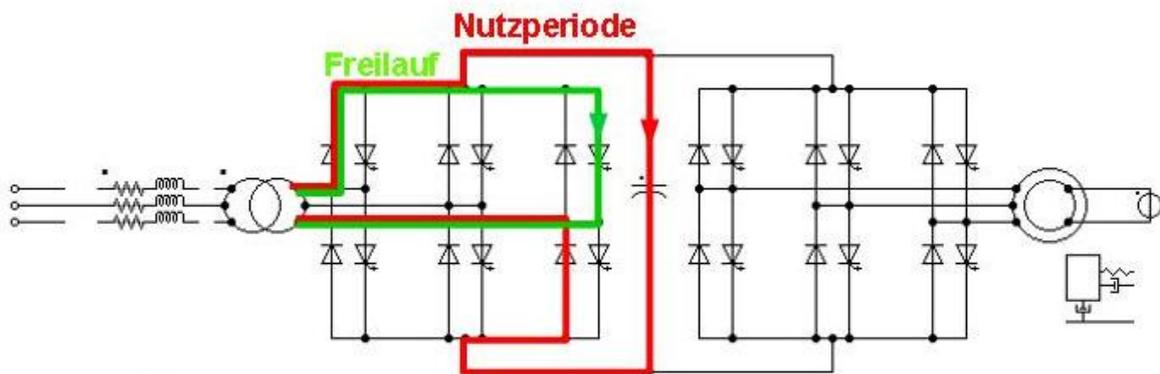


Abbildung 26: Strompfade der Freilauf- und der Nutzperiode in  $U/VN1$  beim Hochsetzstellerbetrieb bei  $U_{ac}$  minimal

Bis jetzt wurde nur der Hochsetzstellerbetrieb des Umrichters beim Motor behandelt. Beim Hochsetzsteller wird der Zwischenkreiskondensator aufgeladen d.h. die Spannung  $U_{DC}$  steigt an. Dieser Anstieg ist jedoch nicht unbegrenzt. Die maximale Kondensatorspannung wird durch die Induktivitäten sowie durch die Umschaltcharakteristik der GTO-Thyristoren und durch das Verhältnis der Nutz- zu der Freilaufperiode gegeben. Durch die Simulation wurde die maximale Spannung  $U_{DC,max}$  auf  $160kV$  festgelegt. Um eine dynamische Funktion des Umrichters bei der  $12kV$  Synchronmaschine zu gewährleisten, wird die Zwischenkreisspannung auf  $40kV$  konstant geregelt.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Der netzseitige Wechselrichter wird beim Motorbetrieb als ein Tiefsetzsteller (TSS) betrieben. Das heißt, dass die Ausgangsspannung des Wechselrichters  $U_{SM}$  kleiner als die Zwischenkreisspannung  $U_{DC}$  ist, und der Kondensator  $C_{DC}$  entladet sich. Als Illustrationsbeispiel werden zwei Fälle +Uab und -Uca behandelt.

Zuerst wird der Fall der maximalen Spannung Uab an den Stator клемmen der Synchronmaschine behandelt. Diese Periode dauert wie im vorherigen Fall des HSS ein Sechstel der  $2\pi$ -Periode, d.h.  $\pi/3$ . Der Start und das Ende der Periode werden durch das Messen des Rotorwinkels bestimmt. Wie beim HSS wird auch beim TSS zwischen der Nutz- und der Freilaufperiode gepulst mit einer Taktfrequenz von 4kHz umgeschaltet. Während der Nutzperiode wird der Zwischenkreiskondensator entladen, und es leiten die Thyristoren TH4 und TH2. Während der Freilaufperiode leitet der Thyristor TH4 und die Diode D5, und der Zwischenkreiskondensator bleibt aufgeladen. Während der Nutzperiode steigt der Strom an den Stator клемmen auf, und während der Freilaufperiode sinkt er (Abbildung 27).

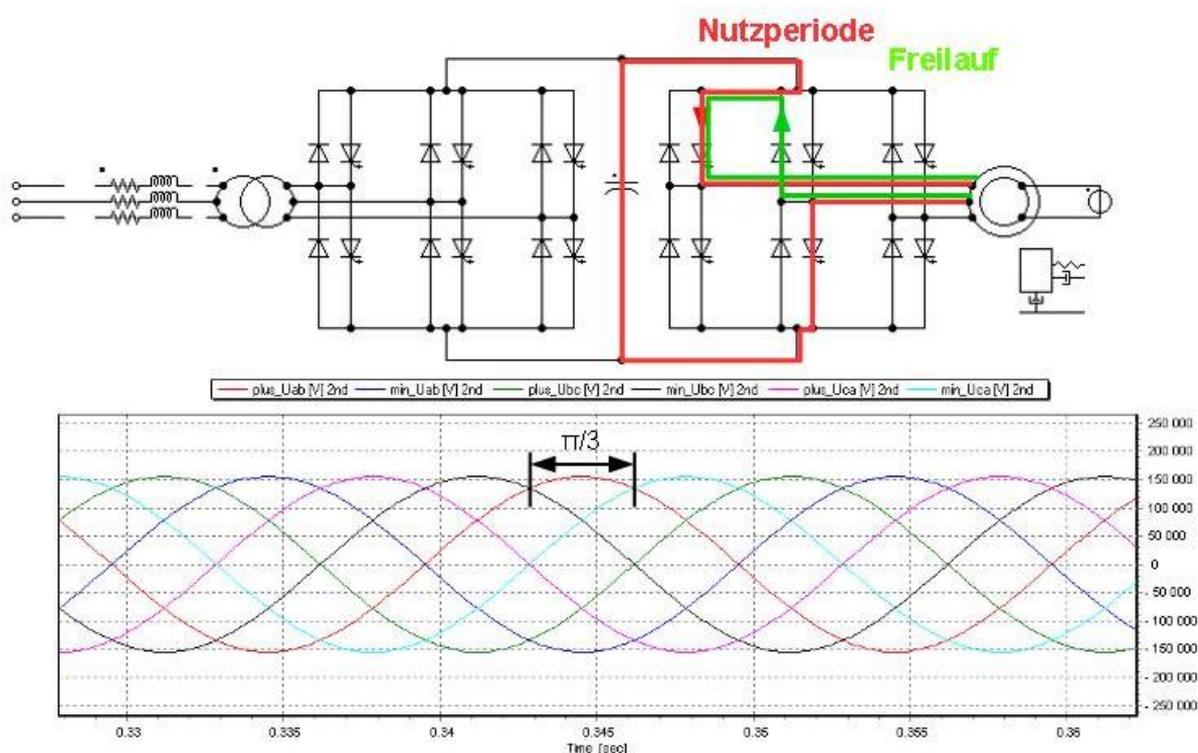


Abbildung 27: der motorseitige Umrichter U/INV2 arbeitet wie ein TSS bei Uab maximal

Nach dem Ablauf der Periode +Uab tritt die Periode -Uca auf. Wieder wird zwischen den zwei Leitzuständen mit der Taktfrequenz 4kHz gepulst. In der Nutzperiode wird der Zwischenkreiskondensator über die Thyristoren TH4 und TH3 entladen. Der Strombetrag steigt dabei mit der Zeitkonstante die durch die Statorinduktivität und den Statorwiderstand gegeben wird. Nach der Nutzperiode wird auf die Freilaufperiode umgeschaltet. Beim Freilauf fließt der Strom durch den Thyristor TH4 und durch die Diode D6 und senkt mit der Zeitkonstante. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 28 dargestellt.

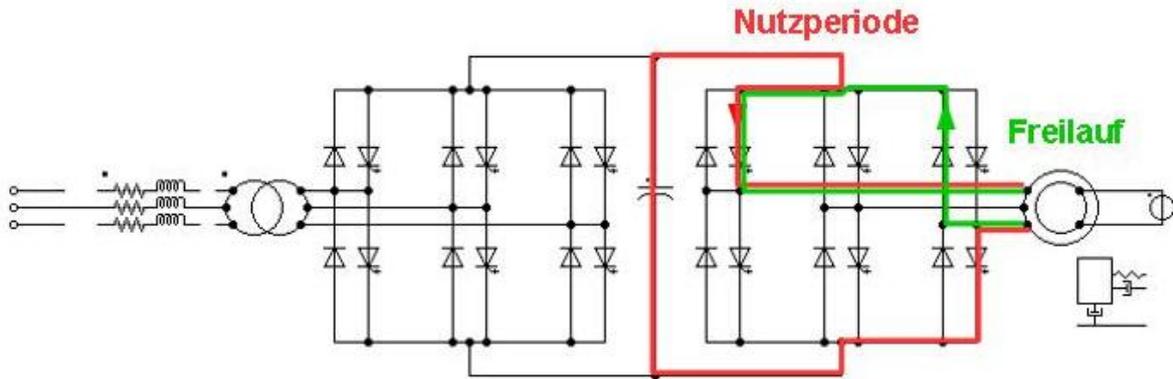


Abbildung 28: Wechselrichter im TSS-Betrieb bei  $-U_{ac}$  maximal

In den vorherigen Abschnitten wurde die Funktionsweise des GTO-Vollumrichters im Motorbetrieb illustriert. Wegen des symmetrischen Aufbaus erfolgt der Generatorbetrieb analog zu dem Motorbetrieb. Die Strompfade des Motorbetriebs brauchen somit nicht näher beschrieben zu werden.

In diesem Abschnitt wurde auch die Entkopplung der Motorfrequenz von der Netzfrequenz gezeigt. Zu diesem Zwecke wird der Spannungszwischenkreis verwendet, wo die Energie gespeichert wird. Dies ermöglicht den drehzahlvariablen Betrieb und den eventuellen Anlauf der Maschine vom Stillstand. Näher wird dies beschrieben in den Abschnitten 4.1.3, 4.1.4, 4.1.6 und 4.1.8.

Ein weiterer Vorteil des GTO-Vollumrichters liegt in der Fähigkeit Blindleistung zu erzeugen oder zu verbrauchen. Blindleistung wird durch die Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Spannung an den Klemmen eines elektrischen Elements erzeugt. In einem Kraftwerk ist es erwünscht die Blindleistung, die in das Netz eingespeist wird regeln zu können. Diese Anforderung wird mit dem netzseitigen Umrichter *UINV1* erfüllt. Die Phase zwischen der Netzspannung und dem Netzstrom kann mit dem Pulsmuster der Pulsweitenmodulation verschoben werden [12]. Dieses Regelungskonzept wird näher beschrieben in den Abschnitten 4.1.5 und 4.1.7.

### 4.1.2 Das Regelungskonzept des Modells

In Abbildung 23 ist das Modell des untersuchten elektromechanischen Teils des Pumpspeicherkraftwerks dargestellt. In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise der einzelnen Blöcke erläutert. In Abbildung 29 sind die 5 Regelschleifen (Maschinenfluss-, Drehzahl-, relative Blindleistungs- und absolute Wirkleistungs- und Zwischenkreisspannungsregelung) und auch andere Elemente (Berechnung von rotierenden Stromraumzeiger oder Betriebswahl) grafisch voneinander abgegrenzt.

Manche Elemente sind multifunktional, und dienen beispielsweise sowohl der Zwischenkreisspannungsregelung als auch der Blindleistungsregelung (Makros *UINV\_1M* und *UINV\_1G*). Deswegen sind diesen Elementen in der Abbildung 29 zwei Farben zugeordnet. Speziell im Falle von den zwei erwähnten Elementen *UINV\_1M* und *UINV\_1G* handelt es sich um die sogenannten Makros. Makros sind keine eigentlichen Elemente, wie Programm „Prog“ oder Regler „Reg“. Makros bergen lediglich andere Elemente in sich und erhöhen somit die Lesbarkeit, da das elektrische Schaltbild nicht überfüllt ist.



#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Spannung  $PWM(t)$  ist in Abbildung 30 schematisch dargestellt. Die Erzeugung des Signals  $UCM$  für den motorseitigen Umrichter wird von den Makros  $UINV\_2M$  und  $UINV\_2G$  übernommen.

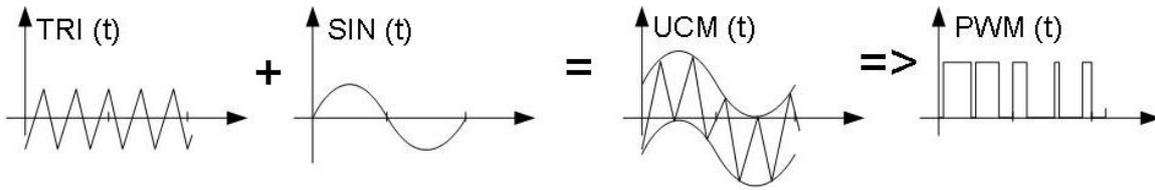


Abbildung 30: ein pulswerten-modulierten Sinus

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die PW-Modulation auch für den netzseitigen Umrichter eingesetzt. Sie ermöglicht eine einfache Regelung der Zwischenkreisspannung. Diese Aufgabe wird von den zwei Makros  $UINV\_1M$  und  $UINV\_1G$  übernommen.

Die beiden Umrichter werden somit mit PWM betrieben. Das gemeinsame Trägersignal  $TRI(t)$  aus Abbildung 30 wird durch den Integrator  $THT$  und durch die Punktfunktion  $TRI$  erzeugt. Im Integrator  $THT$  wird zuerst der Winkel des Trägersignals integriert. Anschließend wird aus dem Winkel  $THT$  ein Dreieckssignal mit der Punktfunktion  $TRI$  gebildet.

Parameter	Wert
NAME	THT
x1	THT 0 0 2*pi*Ft
maxmodY	2*pi

Tabelle 4: Paramtern des Integrators THT

Parameter	Wert
NAME	TRI
x1	THT y 180/pi 0
DATA	X1: 0 y1: 0
	X2: 90 y2: 1
	X3: 270 y3: -1
	X4: 360 y4: 0

Tabelle 5: Parametern der Punktfunktion TRI

Das erzeugte Dreieckssignal wird dann sowohl in dem netz- als auch in dem motorseitigen Umrichter zur  $UCM$ -Bildung eingesetzt. In Abbildung 30 ist das  $UCM$ -Signal für den motorseitigen Umrichter in Motorbetrieb schematisch dargestellt. Die daraus resultierende pulsierende Spannung am Umrichterausgang ist in Abbildung 30 als das Signal  $PWM(t)$  beschriftet.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Bei dem netzseitigen Umrichter schaut das UCM-Signal im Motorbetrieb anders aus. Es wird keine Sinusfunktion moduliert, sondern wird lediglich das Dreieckssignal  $TRI(t)$  um eine Abweichung  $dPWM$  vertikal versetzt und mit einem Fenster für die jeweilige Phase herausgeschnitten. Die vertikale Abweichung  $dPWM$  wird dabei durch den entsprechenden Zwischenkreisspannungsregler  $UREG_M$  berechnet. Diese Berechnung wird schematisch in der Abbildung 31 dargestellt.

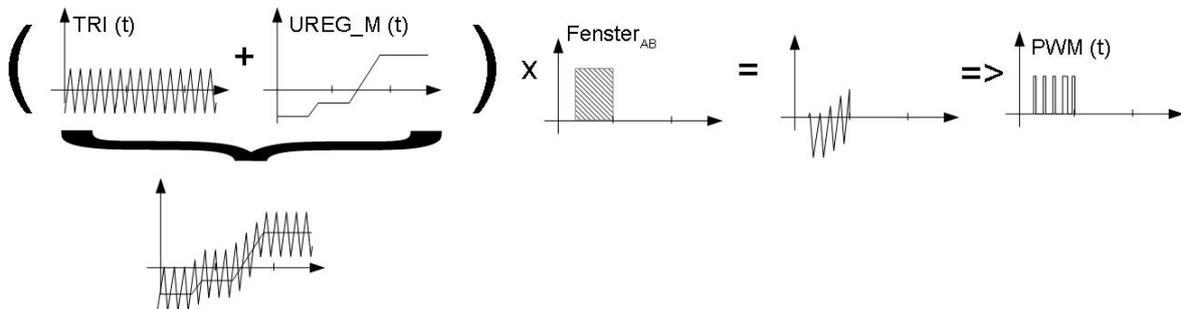


Abbildung 31: ein pulsweiten-modulierter Reglerausgang

Insgesamt wird das PWM-Signal in vier Elementen gebildet; in Programmen  $UI1\_MOT$ ,  $UI1\_GEN$ ,  $UI2\_MOT$  und in  $UI2\_GEN$ . Diese Elemente sind samt den zugehörigen Regelkreisen in den Makros  $UINV\_1M$ ,  $UINV\_1G$ ,  $UINV\_2M$  und  $UINV\_2G$  verborgen.

Um die rotierende Stromraumzeiger zu visualisieren, wurden die Elemente  $RE\_IM1$  und  $RE\_IM2$  entwickelt. Diese Elemente messen die drei Phasenströme  $I_a$ ,  $I_b$  und  $I_c$  und berechnen daraus die zwei orthogonale Komponenten  $I_x$  und  $I_y$ . Bei der Berechnung kommt die sogenannte Park-Transformation zum Einsatz. Park-Transformation ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Regelung von rotierenden Größen in Drehstrommaschinen, und wird auch in der Flussregelung im Element  $PSI\_COMP$  zur Bestimmung des Flussbetrags eingesetzt.

Tabelle 6 zeigt die Parameter des Programms  $RE\_IM1$ . In dem Feld *REFERENCES X* werden die Eingangsgrößen des Programms eingeführt: es sind die drei Phasenströme  $I_a$ ,  $I_b$  und  $I_c$ . Die gemessenen Werte werden mit der konstante 1 multipliziert und 0 wird dazu addiert. Sie stehen als Messwerte  $x1$ ,  $x2$  und  $x3$  zu Verfügung. Im *DATA*-Feld werden die Eingangsgrößen  $x1$ ,  $x2$  und  $x3$  bei der Berechnung von den Ausgangsgrößen  $y1$  und  $y2$  eingesetzt. Dabei entspricht  $y1$  zu  $I_x$  und  $y2$  zu  $I_y$  aus Gleichung (3.3).

$$\begin{aligned}
 I_x &= (I_a - 0.5I_b - 0.5I_c) \frac{2}{3} \\
 I_y &= \left( \frac{\sqrt{3}}{2} I_b - \frac{\sqrt{3}}{2} I_c \right) \frac{2}{3}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	RE_IM1
REFERENCES X	SM1 IIa 1 0 Ia [A]
	SM1 IIb 1 0 Ib [A]
	SM1 IIc 1 0 Ic [A]
DATA	$y1 = (x1 - 0.5*x2 - 0.5*x3)*2/3$
	$y2 = (x2*SQRT(3)/2 - x3*SQRT(3)/2)*2/3$

Tabelle 6: Berechnung der orthogonalen Komponenten eines rotierenden Spannungszeigers im RE\_IM1

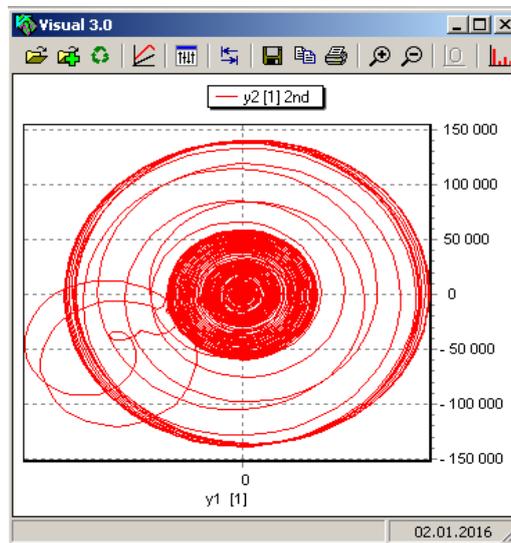


Abbildung 32: der rotierende Spannungsraumzeiger im RE\_IM1

In Abbildung 29 sieht man die gesamte Regelungsstruktur des Pumpspeicherkraftwerks. Es sind fünf Regelschleifen implementiert. Elementen *Q\_VECTOR*, *QREF*, *UINV\_1M* und *UINV\_1G* sind für die Regelung der relativen Blindleistung verantwortlich. Elementen *PSI\_COMP*, *PSI\_AVG* und *PSIREG* sind für die Regelung des Statorflusses zuständig (Abschnitt 4.1.10). Bei der Regelung der Zwischenkreisspannung gibt es zwei parallele Strukturen; eine für den Generator- und die andere für den Motorbetrieb. Gemeinsam ist nur die Meßsignalfilterung mit dem gleitenden Mittelwert *UDCF*. Die eigentliche Regelung ist in dem Makro *UINV\_1M* bzw. *UINV\_1G* verborgen. Die Regelung der absoluten Wirkleistung wird mit den Elementen *PREF*, *PREG* und mit dem Meßsignalfilter *AVG\_P2* gemacht. Kaskadiert mit der Wirkleistungsregelung ist die Drehzahlregelung. Wiedermal sind die tatsächlichen Regelungsstrukturen in den zwei Makros *UINV\_2M* und *UINV\_2G* drinnen versteckt.

Die vier Makros *UINV\_1M*, *UINV\_1G*, *UINV\_2M* und *UINV\_2G* dienen somit der Übersichtlichkeit und Lesbarkeit, und erhöhen auch die Modularität des Programms. Sie trennen auch die fünf Regelschleifen voneinander. Die fünf Regelschleifen sind zwar unabhängig voneinander, es gibt aber nur drei äußeren Eingriffspunkten; die relative Blindleistung (die zu einem Leistungswinkel entspricht), die absolute Wirkleistung und die Drehzahl. Dabei sind im Generatorbetrieb alle drei Angaben relevant, während im Motorbetrieb nur die Angaben *PREF* und *QREF* relevant sind. Die Angabe *ANLAUF* gibt keine Führungsgröße vor. Sie besagt nur, ob man sich im Generator-

## 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Motoranlauf oder im normalen Betrieb befindet. Aus dieser Sicht handelt es sich um eine Zustandsgröße.

Die anderen Regelschleifen (die Zwischenkreisspannungs- und die Statorflussregelung) sind mit einem festen Sollwert realisiert, und stellen somit keinen Eingriffspunkt in das System dar. Die Drehzahlregelung bietet einen Eingriffspunkt in das System nur im Motoranlauf und im Generatorbetrieb an (genauer wird dies im Abschnitt 4.1.12 erklärt). Im Motorbetrieb wird die Drehzahl in Kaskade mit Wirkleistung geregelt. Das heißt, dass der Ausgang des Wirkleistungsreglers die Führungsgröße des Drehzahlreglers darstellt. Der kaskadierte Regelkreis birgt aber zahlreiche Nachteile in sich. Einerseits gibt es Einschränkungen auf das dynamische Verhalten, und der äußere Regelkreis muss deutlich langsamer als der innere sein. Andererseits ist der kaskadierte Regler schwingungsfähig und die Reglerparameter müssen ganz genau eingestellt werden. Dies lässt nur wenige Freiheitsgrade der Reglereinstellungen übrig. Es folgt die detaillierte Beschreibung der Regelkreise.

### 4.1.3 Zwischenkreisspannungsregelung im Motorbetrieb

Die Regelung der Zwischenkreisspannung im Motorbetrieb wird durch die Veränderung des PWM-Musters gemacht (siehe dazu Abschnitt 0). Die PWM-Muster wird dazu um die Abweichung  $dPWM$  vertikal versetzt (Abschnitt 0, Abbildung 31). Diese vertikale Versetzung wird im Element *UI1\_MOT* gemacht (Abbildung 33) und erfolgt nach der Tabelle 7. Im Programm *UI1\_MOT* gibt es also 5 Eingangsgrößen: drei Fenster ( $x1, x2, x3$ ) das Dreieckssignal  $TRI(t)$ , das als der vierte Eingang  $x4$  zugeführt wird, und den Ausgang des Zwischenkreisspannungsreglers  $x5$ . Die Steuerbefehle für die erste GTO-Brücke *UINV1* werden nach der Tabelle 7 erzeugt. Die untere Brückenhälfte (TH1, TH2, TH3) sperrt, und die obere Brückenhälfte wird mit dem Steuerverfahren nach dem *DATA*-Feld aus der Tabelle 7 gesteuert.

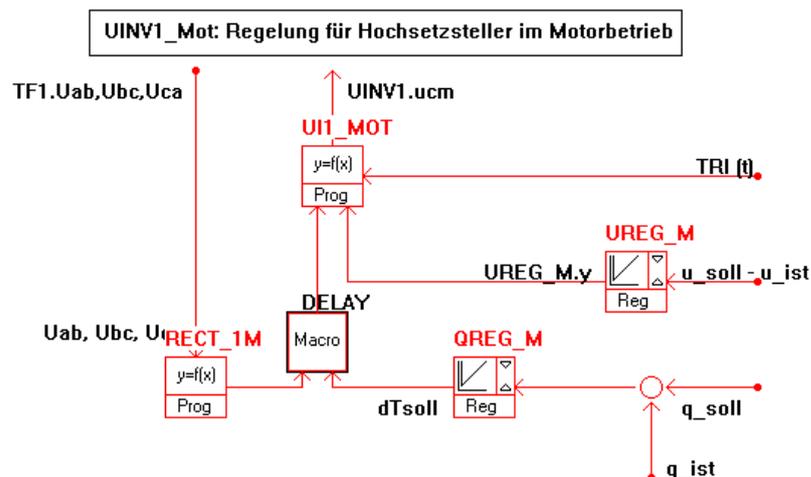


Abbildung 33: Makro UINV1\_MOT

Die Erzeugung der Eingangssignalen  $x1, x2, x3$  und  $x5$  (Fenster für  $TH4, TH5, TH6$  und Reglerausgang) wird im Folgenden beschrieben. Die Erzeugung des Dreieckssignals  $TRI(t)$  wurde schon im Abschnitt 0 ausführlich beschrieben.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	UI1_MOT
x1	DT_R_2 yud 1 0 yud_r [1] ; Fenster für ucm4
x2	DT_S_2 yud 1 0 yud_s [1] ; Fenster für ucm5
x3	DT_T_2 yud 1 0 yud_t [1] ; Fenster für ucm6
x4	TRI y 1 0 tri [1]
x5	UREG_M y 1 0 i_ref [1]
DATA	y1 = 0 y2 = 0 y3 = 0 y4 = x1*(x4+x5) y5 = x2*(x4+x5) y6 = x3*(x4+x5) X3:

Tabelle 7: Programm für die Erzeugung der Steuerbefehle UI1\_MOT

Thyristoren *TH4*, *TH5* und *TH6* müssen synchron mit der Phase der Transformatorspannung sein. Da die Phase der Spannung nicht direkt als eine Messgröße zur Verfügung steht, so muss sie gemessen werden. Die Sekundärspannung ist aber durch das Thyristorschalten stark verzerrt, und kann nicht als Referenz verwendet werden. Deshalb wird die Primärspannung genommen. Die konstante Phasenverschiebung zwischen der Primär- und Sekundärseite wird in dem Makro *DELAY* berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.1.5).

Die Phase wird mit einer statischen Schwelle erkannt. Da die Primärseite 150kV hat, so wird die Schwelle bei 75kV gesetzt. Fensterungsregel wird in dem *DATA*-Feld definiert. Das Fenster wird so erzeugt, dass beide Halbwellen der Spannung genutzt werden. Zum Beispiel ist das Fenster für den Thyristor *TH4* gleich zu eins wenn die Spannung  $U_{ab}$  größer gleich 75kV oder die Spannung  $U_{ca}$  kleiner gleich -75kV ist (Leitzustand). Sonst ist sie gleich zu null (Sperrzustand).

Parameter	Wert
NAME	RECT_1M
x1	TF1 Uab1 1/Uref 0 uab [p.u] ; x1
x2	TF1 Ubc1 1/Uref 0 ubc [p.u] ; x2
x3	TF1 Uca1 1/Uref 0 uca [p.u] ; x3

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

DATA	$y1 = \text{OR}(x1,-x3)$ $y2 = \text{OR}(x2,-x1)$ $y3 = \text{OR}(x3,-x2)$
------	--

Tabelle 8: Fensterung im Programm RECT\_1M

Die drei Fenster werden um die Zeit  $dT$  verschoben, um eine Phasenverschiebung zwischen der Spannung und dem Strom zu erzeugen. Dadurch kann die, durch den Umrichter *UINV1* verbrauchte Blindleistung geregelt werden. Diese Regelschleife wird näher im Abschnitt 4.1.5 behandelt.

Die eigentliche Spannungsregelung wird mit dem PI-Regler *UREG\_M* realisiert. Als Eingang wird die Differenz zwischen der gemessenen Ist-Spannung ( $UDCF.y$ ) und der Sollspannung von 40kV genommen.

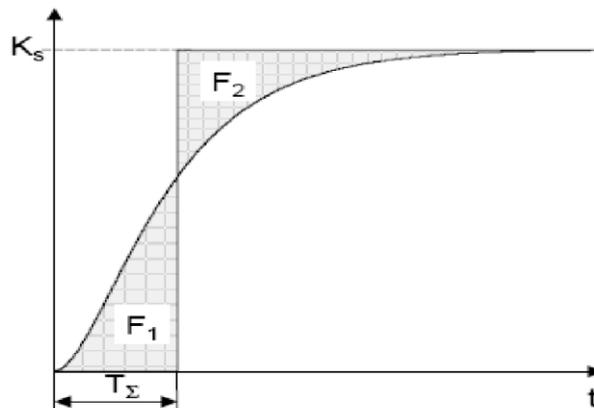


Abbildung 34: Bestimmung der Reglerparameter mit dem Zeit-Summen-Verfahren [13]

Die Reglerparameter sind in der Tabelle 9 zu sehen. Sie wurden nach dem Zeit-Summen Verfahren nach [13] bestimmt. Beim  $T_\Sigma$ -Verfahren werden anhand von der gemessenen Sprungantwort die Reglerparameter bestimmt. Die Sprungantwort wurde als die Aufladekurve des Zwischenkreiskondensators bei der Vollaussteuerung der ersten GTO-Brücke aufgenommen. Die Ausgangsbeschränkungen  $minY$  und  $maxY$  verhindern die Übersteuerung bei der Spannungsregelung. Bei einer Übersteuerung schneidet das Dreieckssignal die x-Achse nicht und es wird kein PWM-Steuersignal erzeugt. Für die Übersteuerung gibt es somit zwei Fälle. Im ersten Falle liegt das Dreieckssignal oberhalb der x-Achse, und die Thyristoren sind immer leitend. Im zweiten Falle liegt das Dreieckssignal unterhalb der x-Achse, und die Thyristoren sperren. In beiden Fällen gibt es keinen PWM-Muster, und somit auch kein Pulsbetrieb.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	UREG_M
REFERENCES X	UDCF y -1/(40000) 1 uDC_ist [p.u] ;
PARAMETERS	type [1] = 3.00000000000E+0000 k [1] = 1.00000000000E+0002 T1 [sec] = 2.00000000000E-0001 minY [1] = -9.50000000000E-0001 maxY [1] = 9.50000000000E-0001

Tabelle 9: Parametern des Zwischenkreisspannungsreglers UREG\_M

#### 4.1.4 Drehzahlregelung im Motorbetrieb

Die Drehzahlregelung im Motorbetrieb ist in dem Makro *UINV\_2M* implementiert (Abbildung 35).

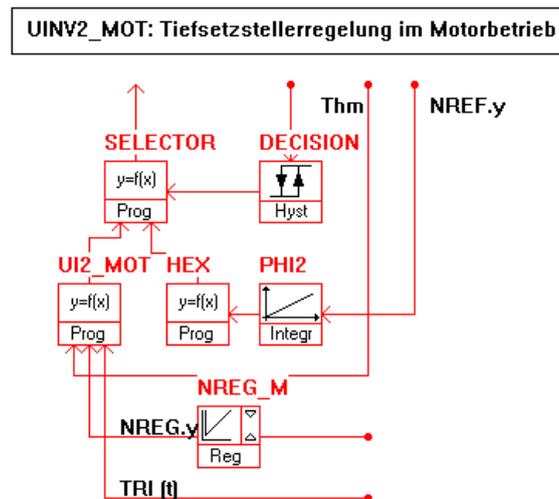


Abbildung 35: Makro UINV\_2M

Bei der Drehzahlregelung wird die Drehzahl mit dem PI-Regler NREG\_M geregelt. Der Regelungsfehler wird als die Differenz zwischen der Ist-Drehzahl ( $SM1.n$ ) und der Soll-drehzahl ( $PREG.y$ ) gebildet (Abbildung 29). Der Ausgang des Reglers NREG\_M wird dem Programm UI2\_MOT zugeführt, wo das eigentliche Steuersignal der Thyristoren erzeugt wird. Das UCM-Signal wird nach dem im Abschnitt 0 erwähnten Verfahren gebildet. Es handelt sich dabei um den modulierten Sinus nach der Abbildung 30. Es gilt, dass der Sinus mit einer steigenden Frequenz der Pulsation bei der PW-Modulation genauer moduliert wird. Die höhere Schaltfrequenz bedeutet aber eine längere Simulationszeit. Schaltungstechnisch ist man durch die Schaltverluste und durch die thermischen Aspekte von oben begrenzt. Als ein Kompromiss zwischen der totalen harmonischen Verzerrung und dem rechnerischen Aufwand wurde eine Pulsationsfrequenz von 4kHz gewählt. Das zugehörige Dreieckssignal wird durch die Leitung  $TRI(t)$  in Abbildung 35 in das Programm UI2\_MOT zugeführt.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Der Steuerungsbefehl  $UCM(t)$  wird in dem Programm  $UI2\_MOT$  wieder aus 3 Signalen gebildet. Erstens wird der Ausgang des PI-Drehzahlreglers  $NREG\_M.y$  zugeführt. Weiters wird der Rotorwinkel  $Thm$  als die Phaseninformation über die Statorspannung eingeführt. Schließlich wird das gemeinsame Dreieckssignal  $TRI(t)$  genommen. Diese drei Signale werden nach dem  $DATA$ -Feld aus der Tabelle 13 verknüpft. Das Ausgangssignal wird anschließend dem Programm  $SELECTOR$  gemeinsam mit dem Ausgang  $HEX.y$  zugeführt. Eine Auswahl des Steuerungsverfahrens (entweder die Drehzahlregelung mit  $UI2\_MOT$  oder reine Steuerung mit  $HEX$ ) erfolgt drehzahlabhängig mit einer Drehzahlhysterese (Hysterese  $DECISION$ ). Die Elemente  $PHI2$ ,  $HEX$ ,  $DECISION$  und  $SELECTOR$  dienen einem sanften Betriebswechsel und einem Betrieb im Bereich der Spannungsanhebung ( $-0.05 \leq n \leq 0.15$ ). Sonst sind sie inaktiv.

Parameter	Wert
NAME	UI2_MOT
x1	SM1 Thm 4 0 phi [deg] ; Polpaarzahl = 4
x2	TRI y 1 0 tri [1]
x3	NREG_M y 1 1 dPwm [1]
DATA	$y1 = -1*(x3*\cos(x1)-x2)-0.5$ $y2 = -1*(x3*\cos(x1-2*\pi/3)-x2)-0.5$ $y3 = -1*(x3*\cos(x1+2*\pi/3)-x2)-0.5$ $y4 = 1*(x3*\cos(x1)-x2)-0.5$ $y5 = 1*(x3*\cos(x1-2*\pi/3)-x2)-0.5$ $y6 = 1*(x3*\cos(x1+2*\pi/3)-x2)-0.5$

Tabelle 10: der Programm  $UI2\_MOT$

Das einzige, noch nicht behandelte Element der Drehzahlregelung ist der Drehzahlregler selbst. Es wird hier ein einfacher PI-Regler eingesetzt (Regler  $NREG\_M$ ). Seine Koeffizienten wurden empirisch eingestellt, und gleichen zu den  $PARAMETERS$  in der Tabelle 11. Die Ausgangsbeschränkung ist zwar sehr restriktiv ( $0.25 \geq y \geq -0.25$ ), es wurde aber beobachtet, dass bei einer Vollaussteuerung die Drehmomente von rund  $T_{em} = 3p.u$  erreicht werden. Der Ausgang zwischen  $-0.25$  und  $+0.25$  ist also völlig ausreichend.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	NREG_M
REFERENCES X	SM1 n -4/(2*pi*50) 0 n_ist [p.u] PREG y 1 0 n_soll [p.u]
PARAMETERS	type [1] = 3.000000000000E+0000 k [1] = 2.000000000000E+0000 T1 [sec] = 5.000000000000E-0002 minY [1] = -2.500000000000E-0001 maxY [1] = 2.500000000000E-0001

Tabelle 11: Der Drehzahlregler NREG\_M

An dieser Stelle sei anzumerken, dass es sich bei der Drehzahlregelung um eine Kaskade mit der Wirkleistungsregelung handelt. Der äußere langsame Regelkreis beinhaltet die langsame Wirkleistungsregelung (Abbildung 29, Elementen *PREF*, *PREG* und *AVG\_P2*), und der schnelle innere Regelkreis gehört der Drehzahlregelung. Bei einer geschachtelten Regelung gibt es jedoch Einschränkungen der Soll-Trajektorie. Eine Kaskade birgt ein Schwingungspotential in sich, und verträgt keine schnellen Änderungen der Soll-Wirkleistung. Es wirkt sich in sehr langen und zeitaufwändigen Simulationen aus.

##### 4.1.5 Regelung der relativen Blindleistung im Motorbetrieb

In den vorherigen Abschnitten wurden die Regelungsschleifen der Drehzahl und der Zwischenkreisspannung beschrieben. Diese Regelgrößen sind aber nur für den Kraftwerksbetreiber interessant. Der Stromverbraucher interessiert sich vielmehr für den gelieferten Strom, Spannung und den Leistungswinkel. Aus diesem Grunde wurden zwei weitere Regelschleifen implementiert – die Regelung der relativen Blindleistung und die Wirkleistungsregelung. In diesem Abschnitt wird die Regelung der relativen Blindleistung  $q$  behandelt.

Messung der relativen Blindleistung  $q$  wird am Transformator *TF1* gemacht (Momentanwerte werden in die Messgrößen *TF1.P1*, *TF1.Q1* geschrieben). Da die Momentanwerte stark schwankend und verrauscht sind, so wird der Mittelwert über ein 40ms-gleitendes Fenster gebildet (Mittelwertbilder *AVG\_Q1* und *AVG\_P1*). Die Fensterlänge von 40ms wurde als das Zweifache der Netzperiode gewählt. Die gefilterten Messgrößen werden anschließend der Berechnungseinheit *Q\_COMP* als Eingang zugeführt. Im Programm *Q\_COMP* (im Makro *Q\_COMP*) werden folgende Größen berechnet:

- $\tan(\varphi)$
- $\varphi$
- $q = \sin(\varphi)$
- $p = \cos(\varphi)$
- $S = P^2 + Q^2$

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Diese Berechnung wird in dem DATA-Feld des Programms *Q\_COMP* ausgeführt (siehe Tabelle 12).

Parameter	Wert
NAME	Q_COMP
REFERENCES X	AVG_P1 y 1 0 P1 [W] AVG_Q1 y 1 0 Q1 [VAr]
DATA	y1 = x2/x1 y2 = 180/pi*ARCTG(x2/x1) y3 = SIN(ARCTG(x2/x1)) y4 = COS(ARCTG(x2/x1)) y5 = SQRT(x1*x1 + x2*x2)

Tabelle 12: Berechnung der relativen Blind-, Wirkleistung, des Leistungswinkels, des Tangens vom Leistungswinkel und der Scheinleistung im Programm *Q\_COMP*

Die eigentliche Regelungsaufgabe wird mit dem PI-Regler *QREG\_M* in dem Makro *UINV\_1M* gelöst (Abbildung 29 und Abbildung 33). Als Reglereingang wird die Differenz zwischen der Ist-Blindleistung (Programm-Ausgang *Q\_COMP.y3*) und der Sollblindleistung (*QREF.y*), die mittels einer Punktfunktion direkt vorgegeben werden kann. Die Reglerparameter wurden empirisch eingestellt und sind der Tabelle 13 zu entnehmen.

Parameter	Wert
NAME	QREG_M
REFERENCES X	QREF y 1 0 q_soll [p.u] Q_VECTOR y3 -1 0 q_ist [p.u]
PARAMETERS	type [1] = 3.000000000000E+0000 k [1] = 5.000000000000E-0001 T1 [sec] = 1.000000000000E-0002 minY [1] = -1.600000000000E+0000 maxY [1] = 7.500000000000E+0000

Tabelle 13: Parametern des Blindleistungsreglers *QREG\_M*

Die Grundidee der Blindleistungsregelung ist die Phasenverschiebung zwischen der Spannung und dem Strom an der Sekundärseite des Transformators. Bei den einfachen Thyristoren geschieht es durch die Zündwinkelvariierung. Bei den GTOD-Thyristoren wird dies durch die Zeitverzögerung des gesamten PWM-Musters gemacht. In Bezug auf die Wicklungsanordnung des Transformators *TF1*

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

und auf die Totzeiten im Regelkreis (*AVG\_P1* und *AVG\_P2*) wurde ein zulässiger Bereich der Zeitverzögerung festgestellt. Die maximale Zeitverzögerung beträgt  $dT_{max} = +7.5ms$  und die minimale Zeitverzögerung ist  $dT_{min} = -1.6ms$ <sup>4</sup>.

Die Verzögerungszeit  $dT$  wird als Ausgang des Blindleistungsreglers *QREG\_M* berechnet. Anschließend wird sie als Eingang dem Zeitverzögerungsmakro *DELAY* zugeführt (Abbildung 33). Das Zeitverzögerungsmakro *DELAY* ist relativ komplex aufgebaut, aber die Grundidee ist einfach. Die drei Fenster (für Thyristoren *TH4*, *TH5* und *TH6*) werden in dem zulässigen Bereich von  $dT_{min} = -1.6ms$  bis  $dT_{max} = +7.5ms$  zeitverzögert. Das Simsen-Element *DELAY* ist jedoch so aufgebaut, dass eine solche Zeitverzögerung mit nur einem Verzögerungselement unmöglich ist. Deswegen werden zwei Zeitverzögerungselementen in Reihe geschaltet (siehe Abbildung 36). Beispielsweise für den Zweig R wird das ursprüngliche Fenster mit der Leitung  $U_{zünd,R}$  in den Zeitverzögerungsglied *DT\_R\_1* zugeführt. Hier wird es zum ersten Mal zeitverzögert – zum Beispiel um  $3ms$ . Das Ausgangssignal von *DT\_R\_1* wird anschließend um weitere  $3ms$  im nächsten Zeitverzögerungsglied *DT\_R\_2* verzögert. In der Summe wird das Zünd-Fenster um  $6ms$  verzögert.

Im Vorherigen Abschnitt wurde erwähnt, dass man auch eine negative Zeitverzögerung braucht – was logischerweise unmöglich ist. Da es sich um ein periodisches Signal handelt, so kann die negative Zeitverzögerung – zum Beispiel  $dT = -1.6ms$  – ganz einfach als  $T_{20} - dT = 20ms - 1.6ms = 18.4ms$  realisiert werden. Diese Implementierung führt aber auch eine Totzeit von  $20ms$  ein, und erhöht

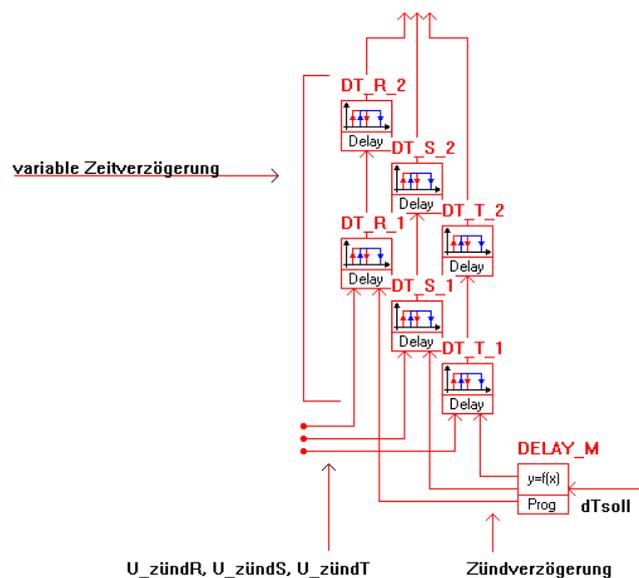


Abbildung 36: Zeitverschiebungsmakro DELAY

somit das Schwingungspotential des Systems. Das Steuern der Verzögerungselemente wird in Abbildung 36 und Tabelle 14 näher erklärt.

Im *DATA*-Feld der Tabelle 14 sieht man den Algorithmus, nach dem die Verzögerungszeit  $dT$  gesetzt wird. Die Blindleistungsregelung ist nur im Toleranzband von  $+38kV...42kV$  aktiv. Damit wird das

<sup>4</sup> An dieser Stelle sei anzumerken, dass die Zeitspanne der Zeitverzögerung  $1.6ms + 7.5ms = 9.1ms$  beträgt. Dies entspricht der halben Netzperiode nicht ( $T_{netz} = 20ms \Rightarrow T_{netz} / 2 = 10ms$ ). Der Grund ist es, dass man bei der Pulsweiten-Modulation die Leistungswinkel von  $\pm 90^\circ$  nur schwer fahren kann. Wenn die Thyristorspannung  $0V$  unterschreitet, so ist ein Zünden nicht möglich. Der zulässige Leistungswinkel ist somit auf ungefähr  $\varphi = 85^\circ \dots +85^\circ$  beschränkt.

## 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

schlechtes Verhalten beim Ent- und Aufladen des Zwischenkreiskondensators vermieden. Es wurde nämlich beobachtet, dass bei starken Schwankungen der Zwischenkreisspannung die Blindleistungsregelung versagt. Aus diesem Grunde werden dem Verzögerungsglied auch die Blindleistungsvorgabe ( $QREF.y$ ), und die Zwischenkreisspannung ( $UDCF.y$ ) als Eingänge zugeführt. Der Messwert der Zwischenkreisspannung (als  $DELAY\_M.x3$  angeführt) wird für die Entscheidung verwendet. Die Blindleistungsvorgabe (die als zweiter Eingang  $DELAY\_M.x2$  angeführt wird) wird bei einem Spannungswert außerhalb des Toleranzbandes als ein Sollwert verwendet. In allen Zeitverzögerungselementen ( $DT\_R\_1$ ,  $DT\_R\_2$ ,  $DT\_S\_1$ ,  $DT\_S\_2$ ,  $DT\_T\_1$  und  $DT\_T2$ ) wird der gleiche Wert von  $dTup$  bzw.  $dTdown$  gesetzt. Das zeitverzögerte Zünd-Fenster wird dann dem Ausgang  $yud$  geschrieben. Wie schon erwähnt, wird dieses Fenster zur Verschiebung des gesamten Pulsmusters verwendet, und verschiebt somit die Phase.

```
- GENERAL DATA :

Name = DELAY_M
...

- REFERENCES X :

QREG_M y 1/1000 0.00212235 dT [s] ; falls 38kV < UDC < 42kV => "Regelung"
QREF y 1/1000 0.0045 dT [s] ; sonst => "Steuerung"
UDCF y 1 0 U_DC [V] ; Entscheidung ob man regelt oder steuert

- REFERENCES Y :

DT_R_1 dTup=y1 1 0
DT_R_1 dTdown=y1 1 0
...
DT_R_2 dTup=y1 1 0
DT_R_2 dTdown=y1 1 0

- DATA :

y1 = x1*AND(x3-38000,1)*AND(42000-x3,1) + x2*OR(x3-42000,38000-x3)
```

Tabelle 14: Programm DELAY\_M, das die Verzögerungselemente ( $DT\_R\_1$ ,  $DT\_R\_2$ ,  $DT\_S\_1$ ,  $DT\_S\_2$ ,  $DT\_T\_1$ ,  $DT\_T\_2$ ) steuert

### 4.1.6 Zwischenkreisspannungsregelung im Generatorbetrieb

In den Abschnitten 4.1.3, 4.1.4 und 4.1.5 wurde die Regelung im Motorbetrieb erklärt. Der Generatorbetrieb wird in den folgenden Abschnitten behandelt. Allgemein gesagt gilt, dass die beiden GTO-Brücken ihre Rollen miteinander vertauschen. Die erste GTO-Brücke UINV1 arbeitet wie ein Tiefsetzsteller und die zweite GTO-Brücke UINV2 arbeitet wie ein Hochsetzsteller. Die Leistung fließt von der Maschine in das Netz hinein. Die Auswahl zwischen den zwei Betrieben wird anhand von der Soll- und der Ist-Drehzahl in den Programmen  $SEL1$  und  $SEL2$  getroffen (s. Abschnitt 4.1.12). Die Steuerbefehle werden dann an die entsprechenden Thyristoren weitergeleitet.

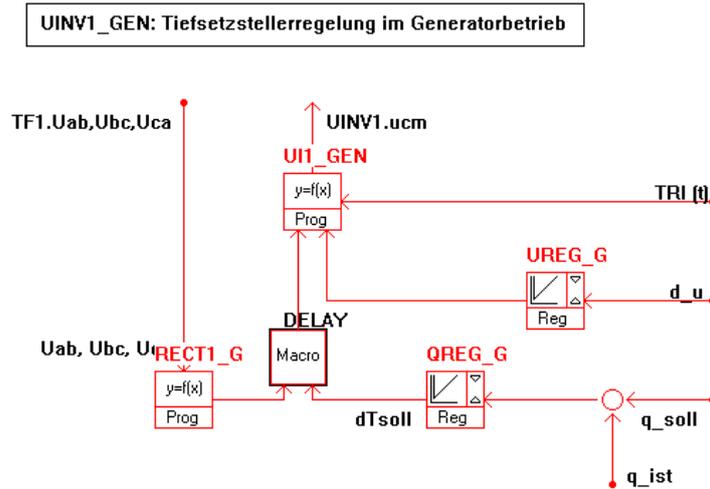


Abbildung 37: Makro UINV1\_GEN

Die zuerst behandelte Regelschleife im Generatorbetrieb ist die Zwischenkreisspannungsregelung. Gemeinsam mit der Blindleistungsregelung befindet sie sich in dem Makro *UINV\_1G* (Abbildung 37). Sie besteht aus dem PI-Regler *UREG\_G* und aus dem Programm *UI1\_GEN*. Im Regler *UREG\_G* wird die Ist-Spannung auf den konstanten Sollwert von  $U_{DC,soll} = 40\text{kV}$  geregelt. Die Reglerparameter ( $k = 100$ ,  $T1 = 0.2\text{s}$ ,  $|y| \leq 0.95$ ) wurden nach dem Zeit-Summen Verfahren nach [13] bestimmt. Das Ausgangssignal wird schließlich in den Programm *UI1\_GEN* zugeführt, wo die eigentlichen Steuerbefehle *ucm1*, *ucm2* ... *ucm6* erzeugt werden.

Tabelle 15 zeigt, wie die Steuerbefehle erzeugt werden. Als Eingang werden die 6 zeitverschobene Fenster für die 6 Thyristoren eingeführt (vgl. mit den 3 Fenstern im Motorbetrieb). Weiters wird das PWM-Trägersignal *TRI(t)* und der Reglerausgang *UREG\_G.y* eingeführt. Eingangsgrößen werden nach dem DATA-Feld der Tabelle 15 verknüpft. Die obere Brückenhälfte *TH4*, *TH5* und *TH6* wird gepulst betrieben. Das Tast-Verhältnis wird dabei durch den gefilterten Reglerausgang *UREG\_GF.y* vorgegeben. Das Dreieckssignal *TRI(t)* wird um diesen Wert vertikal verschoben. Eine „Übersteuerung“ und ein Verlassen der PWM-Modulation wird durch die Ausgangsbeschränkung  $|UREG_G.y| \leq 0.95$  vermieden. Thyristoren der unteren Brückenhälfte *TH1*, *TH2* und *TH3* werden lediglich gefenstert. Die sechs erzeugten Thyristorbefehle *ucm1*, *ucm2* ... *ucm6* werden nicht direkt in diesem Makro gesetzt (das Feld „REFERENCES Y“ ist leer). Stattdessen werden sie im Programm *SEL1* gelesen, und je nach der Betriebswahl werden sie weitergeleitet (detaillierter im Abschnitt 4.1.12).

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	UI1_GEN
x1	DTUCM1_2 yud 1 0 yud_1 [1]
x2	DTUCM2_2 yud 1 0 yud_2 [1]
x3	DTUCM3_2 yud 1 0 yud_3 [1]
x4	DTUCM4_2 yud 1 0 yud_4 [1]
x5	DTUCM5_2 yud 1 0 yud_5 [1]
x6	DTUCM6_2 yud 1 0 yud_6 [1]
x7	TRI y 1 0 tri [1]
x8	UREG_G y -1 0 dPWM [1] ;
DATA	y1 = x1 y2 = x2 y3 = x3 y4 = x4*(x7-x8) y5 = x5*(x7-x8) y6 = x6*(x7-x8)

Tabelle 15: Programm für die Erzeugung der Steuerbefehle UI1\_GEN

##### 4.1.7 Regelung der relativen Blindleistung im Generatorbetrieb

Im Makro *UINV1\_GEN* gibt es aber auch die Elemente *RECT1\_G*, *QREG\_G* und *DELAY* (Abbildung 37). Diese Elemente sind für die Regelung der relativen Blindleistung zuständig. Im Programm *RECT1\_G* werden die sechs Fenster für die sechs Thyristoren generiert. Jedes Fenster ist  $\pi$ -lang, und wird durch die logische ODER-Funktion der zwei zugehörigen Transformatorspannungen gebildet. Für den Thyristor TH1 bedeutet das zum Beispiel, dass (erste Zeile im DATA-Feld der Tabelle 16):

$$ucm_1 = -U_{ab,1} \vee U_{ca,1} \cdot \quad (4.2)$$

Das heißt, dass der Thyristor TH1 genau dann leitet, wenn die Spannung  $U_{ca,1}$  größer als  $0.5p.u$  oder  $U_{ab,1}$  kleiner als  $-0.5p.u$  ist. Ein großer Unterschied zur Fensterung im Motorbetrieb liegt darin, dass im Generatorbetrieb sechs anstelle von drei Fenstern erzeugt werden. Es leiten nämlich die Thyristoren der oberen sowie der unteren Brückenhälfte.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert1
NAME	RECT1_G
x1	TF1 Uab1 1/Uref 0 uab [p.u]
x2	TF1 Ubc1 1/Uref 0 ubc [p.u]
x3	TF1 Uca1 1/Uref 0 uca [p.u]
DATA	$y1 = \text{OR}(-x3, x1)$ $y2 = \text{OR}(-x1, x2)$ $y3 = \text{OR}(-x2, x3)$ $y4 = \text{OR}(-x1, x3)$ $y5 = \text{OR}(-x2, x1)$ $y6 = \text{OR}(-x3, x2)$

Tabelle 16: Programm zur Erzeugung der Fenstern RECT1\_G

Diese drei Fenster werden anschließend im Makro *DELAY* zeitverzögert. Die Zeitverzögerung erfolgt analog zum Motorbetrieb mit dem einzigen Unterschied – anstelle von den drei Fenstern werden sechs generiert. Deswegen gibt es zweimal so viele Verzögerungsglieder wie im Falle des Motorbetriebs (s. Abbildung 38).

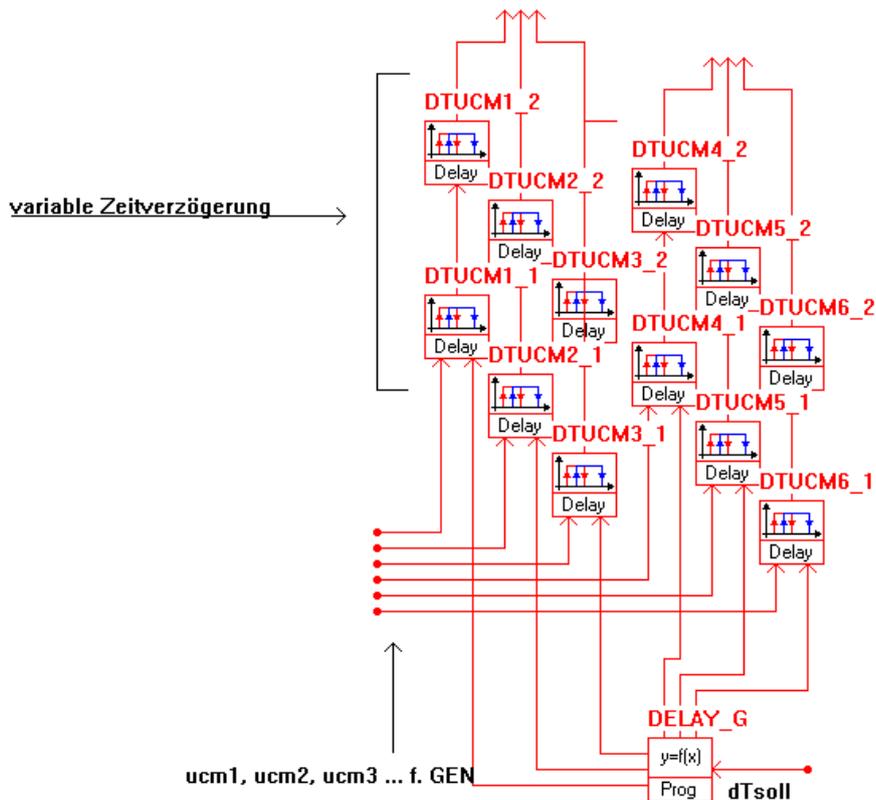


Abbildung 38: Zeitverzögerungsmakro im Generatorbetrieb DELAY

## 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Die Funktionsweise ist aber die gleiche. Die im Blindleistungsregler festgelegte Verzögerungszeit  $dT_{soll}$  wird dem Programm *DELAY\_G* als Eingang zugeführt. Weiters werden die Verzögerungen aller Verzögerungselemente in dem Programm *DELAY\_G* gesetzt (*DTUCM1\_2*, *DTUCM1\_1.dTup*, *dTdown*). Schließlich werden die sechs Fenster als Eingänge *yud* den Verzögerungselementen zugeführt. Die zeitverzögerte Fenster werden dann im Programm *UI1\_GEN* zur Erzeugung der Steuerbefehle eingesetzt.

Das letzte noch nicht behandelte Element dieser Regelschleife ist der Regler selbst. Es wird ein einfaches PI-Regler eingesetzt ( $k = 0.5$ ,  $T1 = 0.01s$ ,  $minY = -1.6$ ,  $maxY = 7.5$ ). Als Eingänge werden die Vorgabe der relativen Blindleistung *QREF.y* und die gemessene Blindleistung *Q\_VECTOR.y3* verwendet.

### 4.1.8 Drehzahlregelung im Generatorbetrieb

Die Drehzahlregelung im Generatorbetrieb befindet sich im Makro *UINV2\_GEN*, und besteht aus den Elementen *UI2\_GEN*, *RECT2\_G* und *NREG\_G* (Abbildung 39). Der Programm *UI2\_GEN* dient zur Erzeugung der Steuerbefehle für die zweite Thyristorbrücke *UINV2*. Als Eingang werden drei Fenster für die drei pulsierende Thyristoren *TH4*, *TH5* und *TH6* genommen. Weiters werden auch das Dreieckssignal *TRI.y* und der Ausgang des Drehzahlreglers *NREG\_G.y* als Eingänge verwendet. Es wird nur die obere Brückenhälfte gepulst betrieben (s. DATA-Feld in Tabelle 17). In der unteren Brückenhälfte leiten nur die Freilaufdioden (während der Nutzperiode). Analog zum Programm *UI1\_MOT* handelt es sich also um einen Hochsetzstellerbetrieb (s. Absatz 4.1.1). Der einzige Unterschied von dem Hochsetzsteller *UINV1* im Motorbetrieb liegt in der Fensterung (vgl. mit Absatz 4.1.3). Die Fenster beim *UINV2* im Generatorbetrieb werden nicht zeitverschoben, weil die Blindleistungsregelung mittels *UINV1* und nicht mittels *UINV2* realisiert wird. Sonst ist aber die Funktionsweise vom Programm *UI2\_GEN* dem *UI1\_MOT* sehr ähnlich, und wird somit an dieser Stelle nicht näher beschrieben.

Name = UI2_GEN
...
- REFERENCES X :
RECT2_G y1 1 0 y_r [1] ; Fenster für ucm4
RECT2_G y2 1 0 y_s [1] ; Fenster für ucm5
RECT2_G y3 1 0 y_t [1] ; Fenster für ucm6
TRI y 1 +0.5 tri [1] ; +0.5 .. Mitte des Arbeitsbereiches
NREG_G y 1 0 dPwm [1]
...
- DATA :
y1=0 ; Im Generatorbetrieb ist die untere Hälfte der Brücke inaktiv
y2=0
y3=0
y4=x1*(x4+x5) ; Fensterung (x1..x3 für ucm4..ucm6) des PWM-Musters (x4)
y5=x2*(x4+x5)
y6=x3*(x4+x5)

Tabelle 17: Programm UI2\_GEN



#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	PREG
REFERENCES X	AVG_P2 y -1/240E6 0 P_ist [p.u] PREF y 1 0 P_soll [p.u]
PARAMETERS	type [1] = 3.00000000000E+0000 k [1] = 1.00000000000E-0001 T1 [sec] = 2.00000000000E-0002 minY [1] = -2.00000000000E+0000 maxY [1] = 2.00000000000E+0000

Tabelle 19: Parametern des Wirkleistungsreglers

Die Regelung der absoluten Wirkleistung wird in Abbildung 29 abgebildet. Sie besteht aus den Elementen *AVG\_P1*, *AVG\_P2* (Messfilter), *PREF*, *PREG*, *UINV\_2M* und *UINV\_2G*. Die Messfilter *AVG\_P1* und *AVG\_P2* wurden schon besprochen, und brauchen nicht näher behandelt zu werden. Die Makros *UINV\_2M* und *UINV\_2G* wurden schon im Rahmen der Abschnitte 4.1.4 und 4.1.8 über die Drehzahlregelung ausreichend beschrieben. Die Regelungselementen *PREF* und *PREG* werden in diesem Abschnitt kurz beschrieben.

Bei der Wirkleistungsregelung handelt es sich um eine Kaskade mit der Drehzahlregelung. Um den kaskadierten Regelkreis stabil zu halten, wird der innere Regler schnell, und der äußere langsam entworfen. Die Koeffizienten des langsamen Wirkleistungsreglers sind der Tabelle 19 zu entnehmen. Es sind nur langsame Änderungen des Sollwerts der Wirkleistung zugelassen. Weiters wird der Reglerausgang *PREG.y* auf die zweifache Nenndrehzahl von *1500rpm* beschränkt ( $|\min Y|, |\max Y| = 2.0$ ).

##### 4.1.10 Flussregelung im Motor- und Generatorbetrieb

Die letzte noch nicht behandelte Regelschleife ist die Regelung des Maschinenflusses. Der Zweck dieser Regelung ist es den Fluss auf einem konstanten Wert von  $\Psi_{\text{soll}} = 1\text{p.u}$  zu halten. Die drei verkettete Flüsse  $\Psi_a$ ,  $\Psi_b$  und  $\Psi_c$  werden normiert und als Messwerte dem Berechnungsprogramm *PSI\_COMP* zugeführt. Im Programm *PSI\_COMP* werden die orthogonale Flusskomponenten  $\Psi_d$  und  $\Psi_q$  mit der Park-Transformation nach Tabelle 20 berechnet. Anschließend wird der Flussbetrag bestimmt, und auf den Ausgang *y3* geschrieben.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	PSI_COMP
REFERENCES X	SM1 Psia 1/(12e3/50/6.28) 0 psia [p.u]
	SM1 Psib 1/(12e3/50/6.28) 0 psib [p.u]
	SM1 Psic 1/(12e3/50/6.28) 0 psic [p.u]
DATA	$y1 = (x1 - 0.5*x2 - 0.5*x3)*2/3$ ; Re $y2 = (x2*SQRT(3)/2 - x3*SQRT(3)/2)*2/3$ ; Im $y3 = SQRT(y1*y1+y2*y2)$

Tabelle 20: Berechnung des Gesamtflusses im Berechnungsprogramm PSI\_COMP

Der Ausgang  $y3$  dient als Eingang des gleitenden Mittelwerts  $PSI\_AVG$  ( $T_{fenster} = 20ms$ ). Der gleitende Mittelwert  $PSI\_AVG$  unterdrückt die Verzerrung wegen der verwendeten Pulsweitenmodulation. Das gefilterte Meßsignal  $\Psi_{ist}$  wird von dem Sollwert  $\Psi_{soll}$  subtrahiert, und dem Regler  $PSI\_REG$  als Eingang zugeführt. Die Parametern des PI-Reglers lauten:  $k = 10$ ,  $T1 = 10$ ,  $|y| \leq 100$ . Der Regler steuert die Erregungsspannung VSEX.

##### 4.1.11 Turbinen- und Pumpenkennlinie

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde nur ein elektromechanisches System modelliert. Um ein realistisches Verhalten des Systems zu erhalten, wurde eine drehzahl- und leistungsabhängige Last als Ersatz des hydraulischen Systems hinzugefügt. Sie ist im Makro LAST implementiert (s. Abbildung 29).

Grundsätzlich unterscheidet sich die Last im Motorbetrieb von der Last im Generatorbetrieb. Im Motorbetrieb wird die sogenannte Pumpenkennlinie gefahren. Pumpenkennlinie stellt einen quadratischen Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Lastmoment dar:

$$T_{ext} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 T_{ext,0} \quad \text{für} \quad n > 0 \quad (4.3)$$

wobei:

- $T_{ext} [Nm]$  ..... Lastmoment
- $T_{ext} [Nm]$  ..... Nennlastmoment
- $n [rpm]$  ..... mechanische Ist-Drehzahl
- $n [rpm]$  ..... mechanische Nenndrehzahl

Im Generatorbetrieb wird hingegen eine Turbinenkennlinie gefahren. Bei der Turbinenkennlinie wird das Lastmoment durch die gewünschte bezogene hydraulische Leistung  $p_{hydr}$  und die Ist-Drehzahl nach der Gleichung (4.2) bestimmt:

$$T_{ext} = \frac{p_{hydr}}{\frac{n}{n_0}} T_{ext,0} \quad \text{für} \quad n < 0 \quad (4.4)$$

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Zusätzlich zu den zwei Betrieben gibt es auch den Motor- und den Generatoranlauf. In dem Motoranlauf wird mit einem Lastmoment  $T_{ext} = 0\text{Nm}$  hochgelaufen. Die Beschleunigung des Rotors wird lediglich durch seine eigene rotatorische Trägheit gehemmt. Beim Erreichen der Nenn Drehzahl wird der Lastmoment rampenförmig eingeschaltet. Die Rampe entspricht der Beschleunigung der Wassermassen in den Wassertunnels.

Dahingegen wird im Generatoranlauf das volle Lastmoment  $T_{ext} = 1\text{p.u}$  die ganze Zeit aufgeschaltet. Beim Erreichen der Generator-Nenn Drehzahl von  $n_0 = -1\text{p.u}$  wird auch das elektromagnetische Drehmoment  $T_{em}$  aufgeschaltet, das den Beschleunigungsprozess beendet, und in den Betriebspunkt bei Nenn Drehzahl bringt.

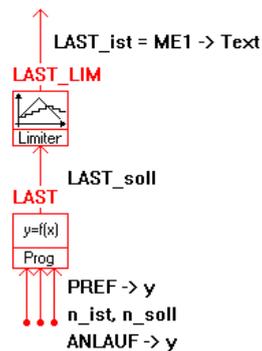


Abbildung 40: das Makro LAST

Die Umschaltung zwischen den vier möglichen Lasten wird im Makro *LAST* mit Programm *LAST* und dem Limiter *LAST\_LIM* realisiert (s. Abbildung 40). Um die Wahl der richtigen Last zu machen, werden die Ist-Drehzahl, die Soll-Wirkleistung und die *ANLAUF*-Variable als Eingang dem Element gegeben. Die, in den Gleichungen (4.3) und (4.4) beschriebene Logik wird im *DATA*-Feld der *LAST* implementiert. Der Ausgang *y1* entspricht der Turbinenkennlinie, *y2* entspricht dem konstanten Moment beim Generatoranlauf und *y3* ist gleich zu dem Lastmoment im Pumpbetrieb. Die Summe dieser drei Ausgänge samt der Umschaltlogik mittels der Variable *ANLAUF.y* wird auf den Ausgang *y10* geschrieben.

Parameter	Wert
NAME	LAST
REFERENCES X	SM1 n 4/(2*pi*50) 0 n_ist [p.u] PREF y 1 0 P_soll [p.u] ANLAUF y 1 0 Anlauf [1]
DATA	y1=-3000000*x2/x1*LT(x1,-0.2) y2=-3000000 y3=x1*x1*(-3000000)*GE(x1,0.25) y10 = EQ0(x3)*(y1 + y3) + LE(x3,-1)*y2 + EQ(x3,1)*0

Abbildung 41: der Programm LAST

## 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Der Ausgang  $y_{10}$  wird anschließend dem Anstiegs-Limiter LAST\_LIM zugeführt. Der Limiter gewährleistet einen stetigen Verlauf des Lastmoments. Der Lastanstieg ist mit einem Höchstwert von 1p.u/15s beschränkt. LAST\_LIM kommt bei den Anlaufen und Betriebswechsel (speziell bei der Aus- bzw. Aufschaltung des Lastmoments) zum Einsatz.

### 4.1.12 Betriebswahl

In den vorhergehenden Abschnitten wurde schon angedeutet, dass die Elemente SEL1, SEL2, NSOLL und eventuell auch LAST zur Betriebswahl dienen. Die genauen Bedingungen für einen Betriebswechsel werden in diesem Abschnitt beschrieben.

Die Auswahl der richtigen Steuerbefehle für die Thyristoren wird in den zwei identisch aufgebauten Selektoren SEL1 und SEL2 gemacht. Im Folgenden wird nur der erste Selektor SEL1 behandelt; das gleiche gilt aber auch für SEL2. Die sechs Steuerbefehle für den Motorbetrieb (UI1\_MOT.y1, y2, .. y6) und die sechs Steuerbefehle für den Generatorbetrieb (UI1\_GEN.y1, y2, .. y6) werden als Eingänge im SEL1 verwendet. Weitere Eingänge sind die Soll-Drehzahl und die Anlaufvariable. Die Betriebsauswahl hängt von der Kombination von ANLAUF.y und NREF.y ab:

- if (( $n_{soll} > 0$ ) && (ANLAUF.y = 0)) => Motorbetrieb (Eingänge x1..x6 weitergeschaltet)
- if (( $n_{soll} < 0$ ) && (ANLAUF.y = 0)) => Generatorbetrieb (Eingänge x7..x12 weitergeschaltet)
- if (ANLAUF.y = -1) => Generatoranlauf ( $ucm_i = 0$  => „Sperrern“)
- if (ANLAUF.y = +1) => Motoranlauf (Eingänge x1..x6 weitergeschaltet)

Die genaue SIMSEN-Vorschrift ist der Tabelle 21 zu entnehmen.

```
Name =SEL2
..

- REFERENCES X :

SELECTOR y1 1 0 ucm1M [1] ;x1 - MOT
SELECTOR y2 1 0 ucm2M [1] ;x2
..

UI2_GEN y1 1 0 ucm1G [1] ;x7 - GEN
UI2_GEN y2 1 0 ucm2G [1] ;x8
..

NREF y 1 0 n_soll [p.u] ;x13
ANLAUF y 1 0 ANLAUF_y [1] ;x14

- REFERENCES Y :

UINV2 ucm1=y1 1 0
UINV2 ucm2=y2 1 0
..

- DATA :

y1=GT(x14,-1)*(GE(x13,0.0)*x1 + LT(x13,0.0)*x7) + 0*LE(x14,-1)
y2=GT(x14,-1)*(GE(x13,0.0)*x2 + LT(x13,0.0)*x8) + 0*LE(x14,-1)
..
```

Tabelle 21: das Programm SEL1 und SEL2

## 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Entsprechend der Betriebswahl wird auch der Lastmoment variiert; und bewegt sich entweder entlang der Pumpen- oder der Turbinenkennlinie oder gleicht zum Nennmoment im Generatoranlauf und zu Null im Motoranlauf (s. auch Abschnitt 4.1.11).

Ein weiterer Selektor ist das Element *NSOLL*. *NSOLL* wird beim Motoranlauf verwendet, um nach dem erfolgten Anlauf die Führungsgröße der Drehzahlregelung von *NREF.y* auf *PREG.y* umzustellen. Diese Änderung wird durch die Variable *ANLAUF.y* hervorgerufen. Die entsprechende SIMSEN-Vorschrift ist der Tabelle 22 zu entnehmen.

Parameter	Wert
NAME	NSOLL
REFERENCES X	PREG y 1 0 PREG_y [p.u]
	NREF y 1 0 NREF_y [p.u]
	ANLAUF y 1 0 Anlauf [1]
DATA	$y1 = x1 * LE(x3, 0) + x2 * GT(x3, 0)$

Tabelle 22: Solldrehzahl-Selektor NSOLL

### 4.2 Das vereinfachte Modell

Im Vergleich mit dem vollständigen Modell aus dem Abschnitt 4.1, verwendet das vereinfachte Modell keinen GTO-Vollumrichter, sondern gesteuerte Spannungsquellen (Abbildung 42). Das Grundprinzip des Vollumrichters ist es eine Wechselspannung der Amplitude  $U_1$  mit der Frequenz  $f_1$  der Primärseite in eine Wechselspannung der Amplitude  $U_2$  und der Frequenz  $f_2$  der Sekundärseite umzuwandeln. Die Umwandlung erfolgt mit Hilfe der Pulsweitenmodulation, die es erlaubt eine (verzerrte) Gleichspannung in eine andere (verzerrte) Gleichspannung umzuwandeln. Die Verzerrung ist durch die Taktfrequenz  $f_{PWM}$  gegeben. Niveaus der zwei Spannungen werden durch das Tastverhältnis und durch die Betriebsart der beiden Vollbrücken bestimmt (Hoch- oder Tiefsetzsteller). Da der Betrieb gepulst ist, verwendet man einen Zwischenkreiskondensator, um die Energie zwischen zu speichern.

Im vereinfachten Modell ist für die Erzeugung des gewünschten Spannungszeigers kein Pulsbetrieb notwendig. Stattdessen werden die Momentanwerte der drei Spannungsquellen direkt vorgegeben, und somit den Spannungszeiger mühelos definieren. Dies wird sowohl an der Netzseite (Sekundärseite vom Transformator *TF1*), als auch auf der Maschinenseite (Stator клемmen der Synchronmaschine *SM1*) gemacht. Der Verbrauch oder die Erzeugung der Blindleistung wird analog zum vollständigen Modell durch die Verschiebung des Spannungszeigers gegenüber dem Stromzeiger am Transformator *TF1* gemacht. Um eine Kopplung zwischen den beiden Ersatzspannungsquellen zu haben, wird ein DC-Link eingeführt. Im DC-Link wird die gelieferte Wirkleistung an der Netzseite mit der verbrauchten Wirkleistung an der Maschinenseite verglichen und geregelt. Um kein Energiedefizit zu erzeugen, wird die Leistung integriert und erst als Energie geregelt. Das Regelungskonzept des vereinfachten Modells ist im Abschnitt 4.2.1 detailliert erklärt. Die eigentlichen Regelschleifen sind in den Abschnitten 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 und 4.2.6 beschrieben.

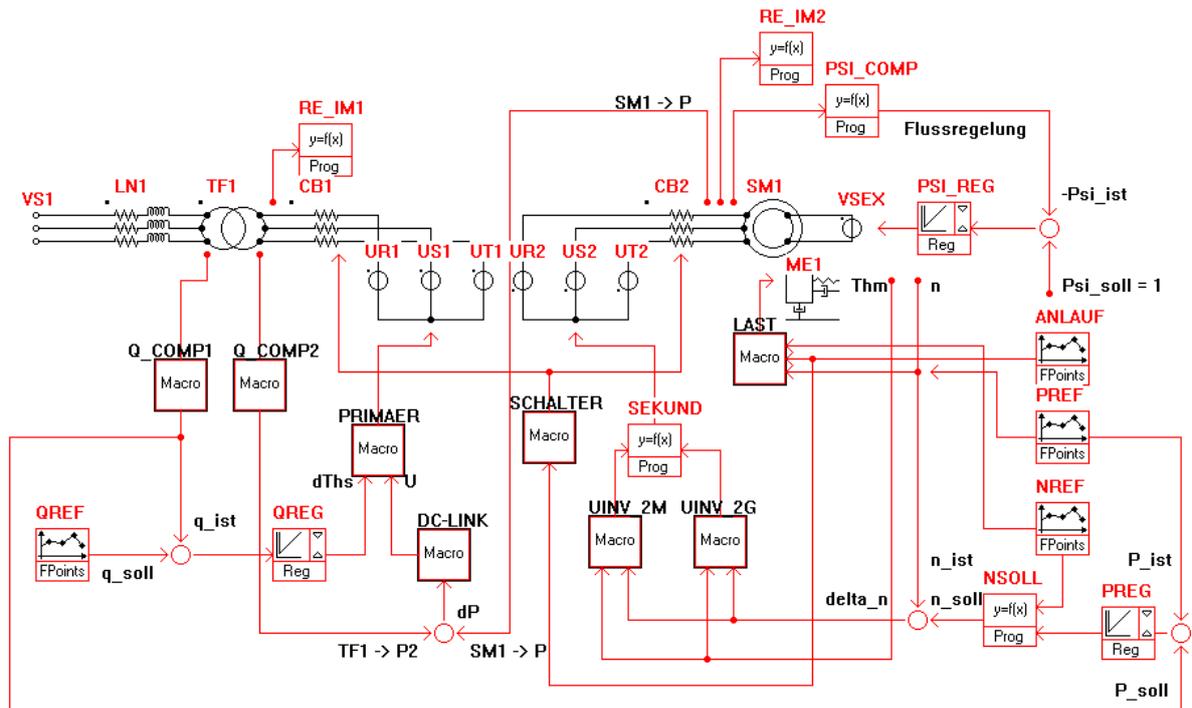


Abbildung 42: Das vereinfachte Modell des Pumpspeicherkraftwerks

### 4.2.1 Das Regelungskonzept des Modells

Verglichen mit dem vollständigen Modell aus dem Abschnitt 4.1 ist das Regelungskonzept des vereinfachten Modells sehr ähnlich. Im vereinfachten Modell entfällt die Erzeugung des PWM-Trägersignals. Weiters wird die Regelung der Zwischenkreisspannung durch den virtuellen Zwischenkreiskondensator DC-Link ersetzt. Zwecks der Übersichtlichkeit werden die zahlreichen Elementen zu mehreren Makros zusammengefasst. Der Spannungsraumzeiger kann direkt vorgegeben werden, und muss nicht über die PWM generiert werden. Aus diesem Grunde werden die beiden Drehzahlregler *NREG\_M* und *NREG\_G* anders parametrisiert.

Das Modell enthält 5 Regelschleifen: Drehzahlregelung, Regelung der absoluten Wirkleistung, Regelung der relativen Blindleistung, Regelung des Maschinenflusses und die Regelung der virtuellen Spannung im DC-Link (Abbildung 43). Es gibt zwei direkte Vorgaben: die total verbrauchte/erzeugte Wirkleistung mittels Punktfunktion *PREF*, und die relative Blindleistung vorgegeben durch *QREF*. Wirkleistung wird an den netzseitigen Klemmen des Transformators *TF1* gemessen. Sie wird dann mit dem Sollwert aus *PREF* verglichen, und im *PREG* geregelt. Der Ausgang des Reglers *PREG* gibt die Solldrehzahl vor<sup>5</sup>, und bildet somit einen Kaskadenregler der Wirkleistung und der Drehzahl. Die Drehzahlregler für den Motor- und Generatorbetrieb sind in den Makros *UINV\_2M* und *UINV\_2G* verborgen. In den Makros *UINV\_2M* und *UINV\_2G* wird der Ausgang des Drehzahlreglers mit dem Rotorwinkel *Thm* verknüpft, und die Statorspannungen werden gebildet. Die Wahl zwischen dem Motor- und Generatorbetrieb wird drehzahlabhängig in dem Programm *SEKUND* getroffen. Bei einer fremderregten Synchronmaschine wird der magnetische Fluss elektrisch erzeugt. Die Flussregelung wird in den Elementen *PSI\_COMP* und *PSI\_REG* gemacht.

<sup>5</sup> Solldrehzahl kann wahlweise durch den Reglerausgang *PREG.y* oder durch die direkte Drehzahlvorgabe *NREF.y* vorgegeben werden. Die Wahl der Solldrehzahlquelle hängt von der Betriebswahl ab. Dies wird näher im Abschnitt 4.2.2 erklärt.

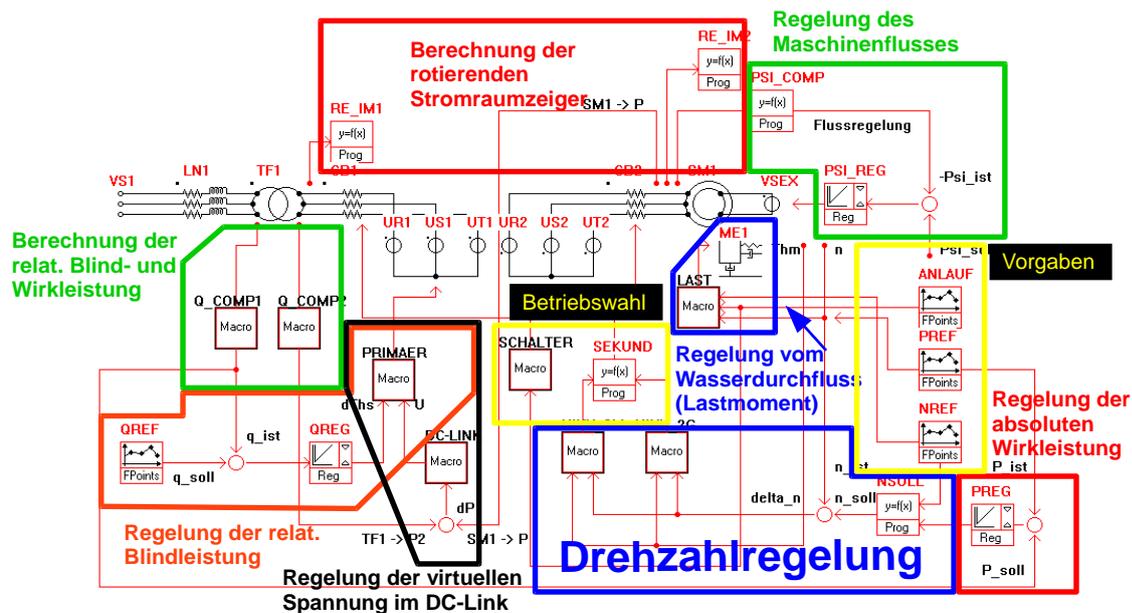


Abbildung 43: Regelungskonzept des vereinfachten Modells

Die restlichen zwei Regelschleifen sind in der Netzseite enthalten. Der vorgegebene Sollwert der relativen Blindleistung aus  $QREF$  wird mit dem Messwert aus dem Makro  $Q\_COMP1$  verglichen, und dem Regler  $QREG$  hinzugefügt. Verglichen mit dem vollständigen Modell werden keine zwei separaten Regelschleifen für den Motor- und Generatorbetrieb notwendig. Der Grund ist es, dass der gewünschte Spannungsvektor mit den drei Spannungsquellen  $UR1$ ,  $US1$  und  $UT1$  direkt und nicht über einen Umrichter erzeugt wird. Beim Umrichter hingegen kamen zwei unterschiedliche Steuerverfahren (Hochsetzsteller für Motor- und Tiefsetzsteller für Generatorbetrieb) zum Einsatz. Am Ausgang des Blindleistungsreglers  $QREG$  wird die Zeitverzögerung  $dT$  dem Makro  $PRIMAER$  zugeführt. Die Verzögerungszeit  $dT$  gibt die Phasenverschiebung der Spannung gegenüber dem Strom – und somit auch die relative Blindleistung vor. Um den totalen Leistungsverbrauch zu regeln, wird die Amplitude der Spannung durch das Makro  $DC-LINK$  vorgegeben. Im Makro  $DC-LINK$  wird die Wirkleistung der Synchronmaschine als der Sollwert, und die Wirkleistung der Transformatorsekundärseite als der Istwert genommen. Die integrierte Leistungsdifferenz gleicht zu der im Kondensator gespeicherten Energie. In den Abschnitten 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 und 4.2.6 folgt eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Regelschleifen.

### 4.2.2 Drehzahlregelung im Motorbetrieb

Analog zum vollständigen Modell ist die Drehzahlregelung des vereinfachten Modells im Motorbetrieb ebenfalls in dem Makro  $UINV\_2M$  implementiert (Abbildung 44). Der wesentliche Unterschied liegt in der Nichtanwendung der Pulsweitenmodulation. Deswegen müssen auch die Reglerparameter im Regler  $NREG\_M$  anders dimensioniert werden. Da die Spannungen direkt mit den drei Spannungsquellen, und nicht mit den Thyristoren des Umrichters generiert werden, so werden auch die Programme  $UI2\_MOT$  und  $HEX$  verändert. Der Programm  $SELECTOR$ , sowie die Hysterese  $DECISION$  sind ohne Veränderung gegenüber dem vollständigen Modell behalten.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

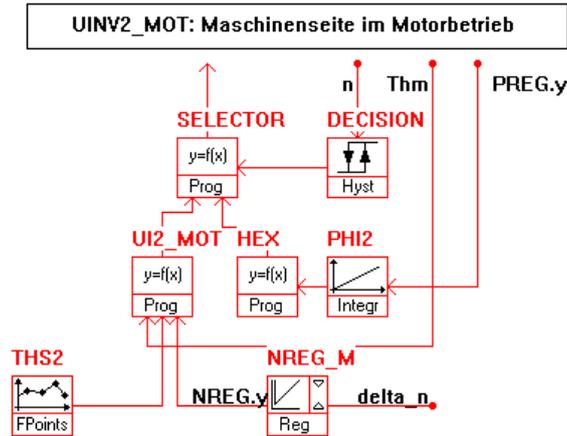


Abbildung 44: Das Makro UINV\_2M

Die Drehzahl wird mit dem PI-Regler *NREG\_M* geregelt (Abbildung 44). Die Reglerparameter sind:  $k = 1.0$ ,  $T1 = 1.0s$ . Der Ausgang wird im Bereich  $minY = 0.0$  und  $maxY = 2.0$  beschränkt. Das bedeutet, dass nur eine positive Drehzahl möglich ist.

Die Statorspannungen werden im Programm *HEX* für den Spannungsanhebungsbereich oder im *UI2\_MOT* für den Linearitätsbereich erzeugt. Sie werden analog mit dem vollständigen Modell gebildet. Der einzige Unterschied ist die Abwesenheit der Pulsweitenmodulation. Tabelle 23 zeigt den Programm *UI2\_MOT*.

Parameter	Wert
NAME	UI2_MOT
REFERENCES X	SM1 Thm 4 0 phi [deg] NREG_M y 1 0 dPwm [1] THS2 y 1 0 Ths [rad]
DATA	$y1 = -x2 * \cos(x1 - x3)$ $y2 = -x2 * \cos(x1 - 2 * \pi / 3 - x3)$ $y3 = -x2 * \cos(x1 + 2 * \pi / 3 - x3)$

Tabelle 23: Das Programm UI2\_MOT

## 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

### 4.2.3 Drehzahlregelung im Generatorbetrieb

Die Drehzahlregelschleife im Generatorbetrieb besteht aus dem Programm *UI2\_GEN* und aus dem PI-Regler *NREG\_G* (s. Abbildung 45). Die Differenz zwischen der Ist- und der Soll-Drehzahl  $\Delta n$  wird dem Drehzahlregler zugeführt, und der Regler *NREG\_G* ändert die Amplitude der Statorspannung dementsprechend. Die Koeffizienten des PI-Reglers *NREG\_G* sind  $k = 100$ ,  $T1 = 1s$  und der Ausgang wird im Bereich  $minY = 0.0$  und  $maxY = 2.0$  beschränkt.

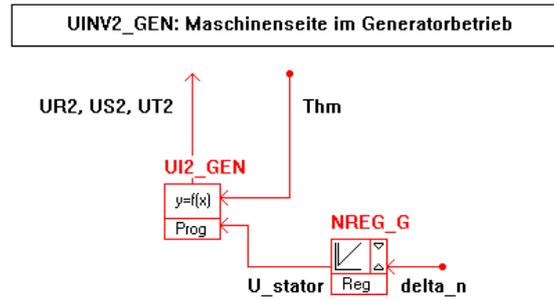


Abbildung 45: Das Makro UINV\_2G

Der Reglerausgang *NREG\_G.y* wird dem Programm *UI2\_GEN* zugeführt. Im Programm *UI2\_GEN* werden die drei um  $120^\circ$  verschobene Phasenspannungen gebildet (Tabelle 24).

Parameter	Wert
NAME	UI2_GEN
REFERENCES X	SM1 Thm 4 0 Thm [rad] NREG_G y 1 0 NREG_G_y [1]
DATA	$y1 = x2 * \sin(x1 - 4 * \pi / 6)$ $y2 = x2 * \sin(x1 - 2 * \pi / 3 - 4 * \pi / 6)$ $y3 = x2 * \sin(x1 + 2 * \pi / 3 - 4 * \pi / 6)$

Tabelle 24: Bildung von Phasenspannungen im Programm UI2\_GEN

### 4.2.4 Regelung der relativen Blindleistung im Motor- und Generatorbetrieb

Die relative Blindleistung wird analog zum vollständigen Modell mit den Elementen *QREF*, *QREG*, *Q\_COMP1* und *PRIMAER* geregelt (s. Abbildung 43). Im Makro *Q\_COMP1* wird die relative Blindleistung als  $q = Q/S$  gerechnet und gefiltert. Sie wird dann von dem Sollwert *QREF.y* subtrahiert und die Differenz wird dem Regler *QREG* zugeführt. Die Reglerparameter lauten:  $PI$ ,  $k = 1$ ,  $T1 = 0.05s$ ,  $minY = -1.0$ ,  $maxY = 2.0$ .

Das einzige wesentlich unterschiedliche Element ist das Makro *PRIMAER*. Makro *PRIMAER* enthält die Punktfunktion *FS*, den Integrator *THS1* und den Programm *PRIMAER*. Punktfunktion *FS* gibt die konstante Netzfrequenz von 50Hz vor. Die entsprechende Winkelgeschwindigkeit wird zu einem Winkel integriert, und den Winkelfunktionen im Programm *PRIMAER* zugeführt.

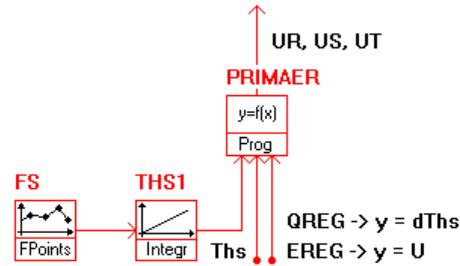


Abbildung 46: Makro PRIMAER

Im Programm *PRIMAER* wird der Winkel *Ths* um *dThs* verändert. Der phasenverschobene Winkel wird dann mit der Spannungsamplitude (*EREG.y*) verknüpft, und die drei Phasenspannungen (*UR1.U*, *US1.U*, *UT1.U*) werden in den *REFERENCES Y* direkt gesetzt. Zusammenfassend bestimmt *dThs* die relative Blindleistung, während *EREG.y* die absolute Wirkleistung (und die Spannungsamplitude) am Transformator *TF1* bestimmt.

Parameter	Wert
NAME	PRIMAER
REFERENCES X	THS1 y 1 0 Ths [rad] QREG y 1 0 dThs [rad] EREG y 100000 0 Uref [V]
REFERENCES Y	UR1 U=y1 1 0 UR1 [V] US1 U=y2 1 0 US1 [V] UT1 U=y3 1 0 UT1 [V]
DATA	$y1 = x3 * \cos(x1 + x2)$ $y2 = x3 * \cos(x1 - 2 * \pi / 3 + x2)$ $y3 = x3 * \cos(x1 + 2 * \pi / 3 + x2)$

Tabelle 25: Programm PRIMAER

#### 4.2.5 Regelung der absoluten Wirkleistung im Motor- und im Generatorbetrieb

Der Stromverbraucher wünscht sich einen Strom mit zwei Kenngrößen: einem Leistungswinkel (behandelt im Abschnitt 4.2.4), und mit einer totalen Wirkleistung *P*. Die Regelschleife für die verbrauchte Wirkleistung *P* wird in diesem Abschnitt behandelt. Sie ist ähnlich zum vollständigen Modell aufgebaut. Die gewünschte Wirkleistung  $P_{soll}$  wird in der Punktfunktion *PREF* vorgegeben. Im Motorbetrieb wird sie dann mit dem gefilterten Istwert *AVG\_P1.y* (versteckt im Makro *Q\_COMP1*) verglichen, und dem Regler *PREG* als Eingang zugeführt (Abbildung 43). Die Koeffizienten des PI-Reglers sind  $k = 0.1$ ,  $T1 = 0.5s$ . Verglichen mit dem Vollständigen Modell wird auf den  $PT_1$ -Lag Filter *AVG\_P2* (in Reihe mit dem gleitenden Mittelwert *AVG\_P1*) verzichtet. Der Grund dafür ist die Abwesenheit der Pulsweitenmodulation, und damit verbundener Verzerrung aller Meßsignale ( $P_{ist}$ ,  $n_{ist}$  und  $q_{ist}$ ).

## 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Im Abschnitt 4.1.11 wurden die Kennlinien der beiden Betriebe beschrieben. In dem oben behandelten Motorbetrieb wird die Last durch die Pumpenkennlinie  $T_{ext} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \cdot T_{ext,0}$  bestimmt.

Die hydraulische Leistung ist dabei gleich zu  $P_{hydr} = n \cdot T_{ext} = \frac{n^3}{n_0^2} T_{ext,0}$ . Das heißt, dass die hydraulische Leistung durch die geregelt Pumpendrehzahl bestimmt wird. Es handelt sich also um eine Wirkleistungsregelung.

Im Generatorbetrieb wird die Turbinenkennlinie  $T_{ext} = \frac{P_{hydr}}{n_{ist}}$  verwendet. Die Ist-Drehzahl  $n_{ist}$  wird dabei separat nach der Vorgabe vom Drehzahloptimierer geregelt (der Drehzahloptimierer wird im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht implementiert => es wird eine optimale Drehzahl von  $n_{soll} = 1$  p.u. angenommen). Die gewünschte hydraulische Leistung  $P_{hydr}$  wird ebenfalls nur vorgegeben, jedoch ohne Rückkopplung. Das heißt, dass es sich im Generatorbetrieb um eine Wirkleistungssteuerung handelt (keine Rückkopplung). Deswegen gibt es im Generatorbetrieb eine bleibende Regelabweichung  $\Delta P = P_{soll} - P_{ist}$ .

Die Betriebswahl (Wirkleistungsregelung im Motorbetrieb oder Wirkleistungssteuerung im Generatorbetrieb) wird in dem Programm *NSOLL* gemacht. Die Entscheidung hängt von der Solldrehzahl und von der Betriebsvorgabe ab, und folgt folgende Logik nach:

- $(n_{soll} \leq 0 \text{ UND ANLAUF.y} = 0) \text{ ODER } (n_{soll} \geq 0 \text{ UND ANLAUF.y} = +1) \Rightarrow NSOLL.y = NREF.y$
- $(n_{soll} \geq 0 \text{ UND ANLAUF.y} = 0) \Rightarrow NSOLL.y = PREG.y$

### 4.2.6 Gesteuerte Spannungsquellen und der „virtuelle Kondensator“

Im vollständigen Modell war das wichtigste Element des Modells der Umrichter. Der Umrichter war für den drehzahlvariablen Betrieb verantwortlich. Im vereinfachten Modell wird diese Aufgabe von den 6 gesteuerten Spannungsquellen übernommen. Die drei Quellen UR1, US1 und UT1 modellieren die Netzseite und UR2, US2 und UT2 modellieren die Maschinenseite des Umrichters. Die Kopplung zwischen der Primär- und Sekundärseite wird durch das Makro *DC-LINK* gewährleistet (Abbildung 43).

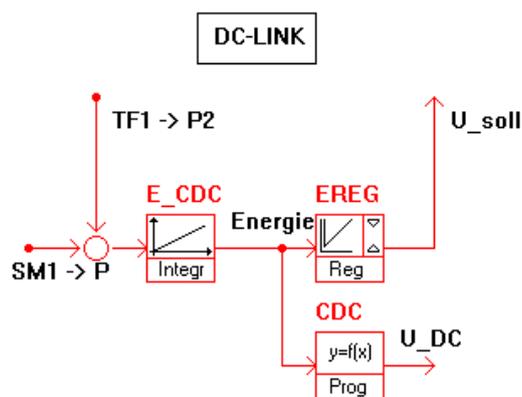


Abbildung 47: das Makro DC-LINK

Der Vollumrichter im vollständigen Modell arbeitet wie ein Hochsetzsteller geschaltet in Serie mit einem Tiefsetzsteller. Er ist also fähig eine Wechselspannung  $U_1$  der Frequenz  $f_1$  in eine konstante Zwischenkreisspannung  $U_{DC}$  umzuformen und anschließend in die Wechselspannung  $U_2$  mit Frequenz  $f_2$  umzuwandeln. Es gilt die Einschränkung, dass  $U_1 \leq U_{DC}$  und  $U_2 \leq U_{DC}$  sind und dass die Wirkleistung

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

im Umrichter erhalten bleibt (mit Einbeziehung der Verluste). Mit dieser Grundidee wurde der Umrichter folgendermaßen modelliert:

Parameter	Wert
NAME	E_CDC
REFERENCES X	AVG_P2 y 1/240000000 0 P_ist [p.u] SM1 P 1/240000000 0 P_soll [p.u]
PARAMETERS	k [1] = 1.0000000000E+0000

Tabelle 26: Berechnung der Zwischenkreisspannungsenergie im E\_CDC

Zuerst wird die Differenz zwischen der Ist- und der Soll-Wirkleistung im DC-Link ermittelt ( $P_{soll} = SM1.P$ ,  $P_{ist} = TF1.P2$ ). Falls zum Beispiel im Motorbetrieb  $P_{soll} > P_{ist}$  ist, so ist der Leistungsverbrauch der Synchronmaschine größer als die, vom Netz gelieferte Leistung. Der virtuelle Zwischenkreiskondensator wird somit entladen. Die Leistungsabweichung wird im nächsten Schritt im Integrator  $E\_CDC$  zu einer Energieabweichung integriert (Tabelle 26). Die Energieabweichung  $E\_CDC.y$  wird danach dem schnellen PI-Regler  $EREG$  als Eingang zugeführt ( $k = 20$ ,  $T1 = 0.5s$ ,  $10 \geq y \geq -10$ ). Sein Ausgang bestimmt die Amplitude der Spannung an der Sekundärseite vom Transformator  $TF1$ . Die eigentliche Erzeugung des rotierenden Spannungsraumzeigers ist im Abschnitt 4.2.4 erklärt.

Das Programm CDC berechnet die Zwischenkreisspannung nach der Formel

$$U_{DC} = \sqrt{\frac{2E_{DC}}{C_{DC}}} + U_{DC,0} = \sqrt{\frac{2 \int P_{DC} dt}{1F}} + 40kV \quad (4.5)$$

Die Formel (4.5) ist im *DATA*-Feld des Programms *CDC* implementiert (Tabelle 27). Um einen Vergleich mit dem vollständigen Modell zu ermöglichen, wird die Kapazität zu 1F gesetzt, und der Sollwert der Zwischenkreisspannung auf 40kV festgelegt – wie im vollständigen Modell.

Ein Unterschied zum vollständigen Modell liegt in der Reglerstruktur selbst. Im vollständigen Modell gab es zwei separate Regelschleifen –  $UREG\_M$  für den Motor- und  $UREG\_G$  für den Generatorbetrieb (s. Abschnitt 4.1.3 und 4.1.6). Trennung vom Generator- und Motorbetrieb war wichtig, weil unterschiedliche Umrichterbetriebsarten zum Einsatz kamen. Im Generatorbetrieb arbeitet die netzseitige Vollbrücke  $UINV1$  wie ein Tiefsetzsteller, während im Motorbetrieb sie als ein Hochsetzsteller arbeitet. In den beiden Betriebsarten werden unterschiedliche Thyristoren mit unterschiedlichen Reglerparametern angesteuert. Im vereinfachten Modell ist dies jedoch nicht nötig, weil der Spannungsraumzeiger durch die drei gesteuerten Spannungsquellen direkt vorgegeben wird. Im vereinfachten Modell gibt es also nur eine Regelschleife für die beiden Betriebe.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	CDC
REFERENCES X	E_CDC y 240000000 800000000 E_CDC [J]
DATA	y1 = SQRT(2*x1/1.00)

Tabelle 27: Berechnung von Kondensatorspannung im Programm CDC

#### 4.2.7 Flussregelung im Motor- und Generatorbetrieb

Die Flussregelung besteht aus den Elementen *PSI\_COMP* und *PSI\_REG*. Verglichen mit dem vollständigen Modell entfällt der gleitende Mittelwert *PSI\_AVG*, weil der Fluss ohne PWM fast rippelfrei ist, und keine Filterung nötig ist. Weiters wird auch die, durch die Filterung eingeführte Totzeit abgeschafft. Die Regelung und das gesamte System werden somit weniger schwingungsfähig und stabiler. Die Parameter des PI-Reglers sind wie im vollständigen Modell:  $k = 0.1$  und  $T1 = 0.1s$ .

#### 4.2.8 Betriebswahl

Das vorgestellte System kann in zwei Betrieben arbeiten: im Generator- und im Motorbetrieb. Weiters können die beiden Betriebe von Null gestartet, bzw. von einem Betrieb in das andere gewechselt werden. Der Motoranlauf (bzw. der GM-Betriebswechsel) erfolgt im vereinfachten Modell gleich wie im vollständigen Modell. Wegen des Generatoranlaufs (bzw. MG-Betriebswechsel) wurde das Modell um zwei dreiphasige Schalter *CB1* und *CB2* erweitert (s. Abbildung 42). Im Generatoranlauf wird der Umrichter vom Netz und von der Maschine elektrisch getrennt, so dass kein Strom fließt. Somit gibt es keinen Drehmoment, und die Maschine wird mit dem vollen Lastmoment  $T_{ext} = 1p.u$  in den Generatorbetrieb gebracht.

Eine plötzliche Aufschaltung der Zwischenkreisspannung auf die Stator клемmen hat erhebliche Stromschwingung (und somit hohe Drehmomentschwingung) verursacht. Dies war kein Problem im vollständigen Modell, wo der Statorstrom durch die Pulsweitenmodulation beschränkt wurde (Der Stromanstieg wurde durch die RL-Zeitkonstante mit  $\tau = L_{stator}/(R_{on}+R_{stator})$  beschränkt). Im vereinfachten Modell stellt es ein wesentliches Problem dar. Deswegen werden anstelle von zwei üblichen Schaltern zwei Rheostaten *CB1* und *CB2* verwendet. Die Strategie des sanften Umschaltens wird im Folgenden kurz erläutert:

- *ANLAUF = -2* ... Generatoranlauf, Spannungsquellen abgetrennt (*CB1, CB2.R<sub>abc</sub> = 100 MΩ*).
- *ANLAUF = -1* ... Generatoranlauf, sanfte Umschaltung. Exponentielles Abklingen der Widerstände *CB1, CB2.R<sub>abc</sub>* mit  $R_{abc} = R_0 e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$
- *ANLAUF = 0* ... Normalbetrieb (*CB1, CB2.R<sub>abc</sub> = 0 Ω*)
- *ANLAUF = 1* ... Motoranlauf (*CB1, CB2.R<sub>abc</sub> = 0 Ω*)

Die Ansteuerung von den Potenziometern *CB1* und *CB2* wird im Makro *SCHALTER* im Programm *R\_REF* gemacht. Als Eingang wird die Betriebsvorgabe *ANLAUF.y* und der Timerausgang *TC.y1* genommen. Die Rolle von *ANLAUF.y* wurde oben erklärt. Der Timer *TC* wird wegen der Exponentialfunktion eingesetzt (um Anfangszeit  $t_0$  bei der fallenden Flanke von *ANLAUF.y* zu detektieren). Die Zeitkonstante  $\tau$  sowie der Startwiderstand  $R_0$  wurden empirisch so eingestellt, dass die Statorstromschwingung minimal wird. Die Logik des Programms *R\_REF* ist der Tabelle 28 zu entnehmen.

#### 4. MODELLIMPLEMENTIERUNG IN SIMSEN

Parameter	Wert
NAME	R_REF
REFERENCES X	TC y1 1 0 GEN_Timer [s] ANLAUF y 1 0 G_ANLAUF [1] R_REF Time 1 0 Time [s]
REFERENCES Y	CB1 Ra=y1 1 0 CB1 Rb=y1 1 0 CB1 Rc=y1 1 0 CB2 Ra=y1 1 0 CB2 Rb=y1 1 0 CB2 Rc=y1 1 0
DATA	$y1 = EQ(x2, -2) * 1E+8 + EQ(x2, -1) * EXP(-5 * x3 + 5 * x1) * 1E+3 + GE(x2, 0) * 0$

Tabelle 28: Ansteuerung von Schalter CB1 und CB2 im Programm R\_REF

## 5 Simulationsszenarien

Das Verhalten des Systems kann am besten an Beispielen von Simulationsszenarien gezeigt werden. In diesem Kapitel werden ausgewählte Betriebsszenarien des vollständigen Modells mit dem vereinfachten Modell verglichen.

### 5.1 Nachfahren einer Wirkleistungstrajektorie im Motorbetrieb

Das wichtigste Betriebsszenario ist das Folgen einer gewünschten Wirkleistungstrajektorie. Dies entspricht der Laständerung – zum Beispiel wenn die Stromnachfrage in Abhängigkeit von der Tageszeit variiert. In dieser Simulation wurde zuerst eine langsame Änderung der Wirkleistung von  $P = 0.7\text{p.u}$  auf  $P = 1.0\text{p.u}$  und danach zurück auf  $0.7\text{p.u}$ .

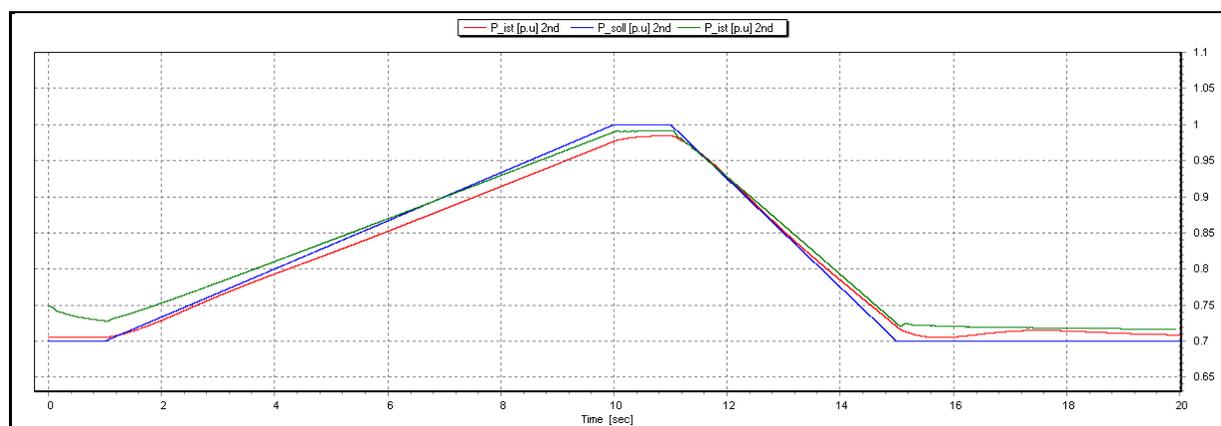


Abbildung 48: Soll-Wirkleistungstrajektorie (blau) nachgefolgt im vollständigen (grün) und im vereinfachten Modell (rot)

In der Abbildung 48 wird der Verlauf der Ist-Leistung im vereinfachten Modell (BLAU), Ist-Leistung im vollständigen Modell (GRÜN) und die Soll-Leistung (ROT) dargestellt. Die Anfangsabweichung der grünen Linie (Ist-Leistung im Vollständigen Modell) ist auf einen falschen Anfangszustand zurückzuführen. Da die Simulationen im vollständigen Modell sehr zeitaufwendig waren, wurde dieser Betriebslauf nicht erneut simuliert, sondern wurde das Ergebnis (aus Abbildung 48) behalten.

Bei der zweiten Leistungsrampe kann das Führungsverhalten der beiden Modelle verglichen werden. Das vollständige Modell (grün) verhält sich sehr aggressiv und reagiert auch auf schnelle Änderungen. Dieses Modell besitzt einen großen P- und D-Anteil. Das vereinfachte Modell (blau) verhält sich dahingegen viel sanfter und auf die Änderungen der Soll-Wirkleistung reagiert es nur wenig aggressiv. Die beiden Systeme versuchen die Regelabweichung zu reduzieren, jedoch mit einer langen Zeitkonstante.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es sich bei der Wirkleistungsregelung um einen kaskadierten Regelkreis handelt, der noch zusätzlich mit anderen Regelkreisen des Modells interagiert, wie zum Beispiel mit der Zwischenkreisspannungsregelung oder der Flussregelung. Bei der Einstellung der Reglerparameter wurde als erster Ansatz das Zeit-Summen Verfahren angewendet. Für eine alleinstehende Regelschleife (zum Beispiel für die n-Regelung ohne der Pn-Kaskade) gab es meistens sehr schönes Verhalten. Wenn die Regelschleife dann in das Gesamtsystem eingebunden wurde, wurde oft ein viel schlechteres Verhalten beobachtet (Einschwingung, dauernde Schwingung oder starke Dämpfung). Die Reglerparameter wurden danach so lange adaptiert bis ein zufriedenstellendes Verhalten erreicht wurde.

## 5. SIMULATIONSSZENARIOEN

Aus diesem Grunde werden auch andere Systemgrößen untersucht. Bei dem oben behandelten Motorbetrieb sind auch die Drehzahl und das Drehmoment interessant. Die Drehzahl und das Drehmoment bilden nämlich die hydraulische Leistung. Der Verlauf der Soll- und der Ist-Drehzahl ist für die beiden Modelle in Abbildung 49 dargestellt.

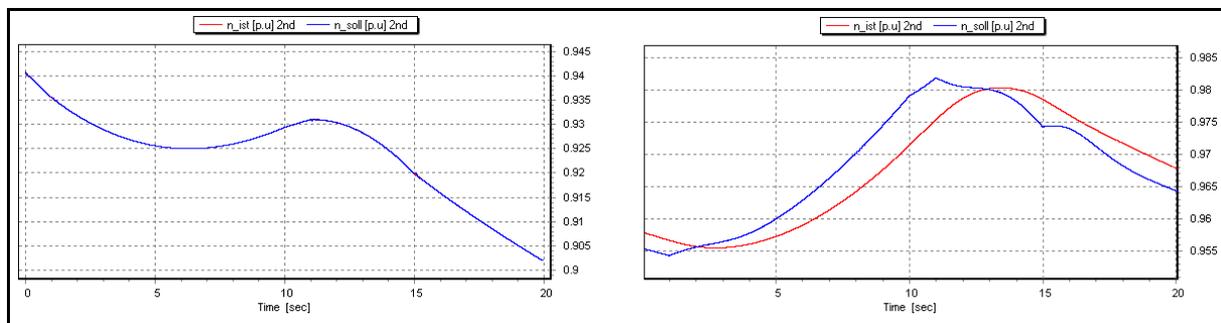


Abbildung 49: Links ist die Ist-Drehzahl (rot) und die Soll-Drehzahl (blau) im vollständigen Modell. Rechts: die Ist-Drehzahl (rot) und die Soll-Drehzahl (blau) im vereinfachten Modell.

Es ist nur eine kleine Drehzahlvariierung zu beobachten. Der Grund dafür liegt in der Pumpenkennlinie (Gleichung (5.1))

$$T_{ext} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 T_{ext,0} \quad (5.1)$$

Eingesetzt in die Gleichung der hydraulischen Leistung liefert sie:

$$P_{hydr} = T_{ext} \Omega = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 T_{ext,0} 2\pi f = \frac{n^3}{n_0^2} T_{ext,0} \frac{\pi}{30} \quad (5.2)$$

Das heißt, dass das Drehmoment auf die Wirkleistungsänderungen quadratisch reagiert. Die Drehzahl reagiert nur linear. Deswegen ist die Drehmomentvariierung aus Abbildung 50 viel höher als die Drehzahlvariierung aus Abbildung 49.

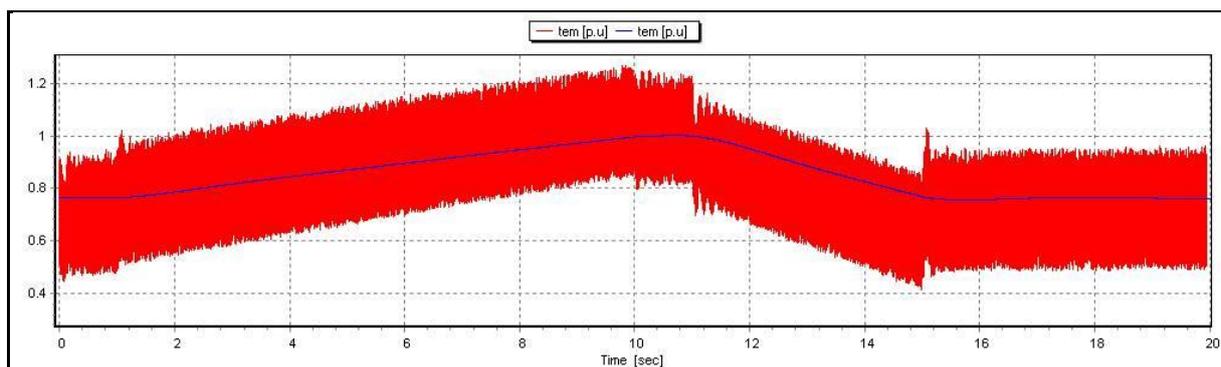


Abbildung 50: das rippelbehaftete Drehmoment im vollständigen Modell (rot), und das Drehmoment im vereinfachten Modell (blau)

In dem obigen Abschnitt wurde das Zusammenspiel der Wirkleistungsregelung mit der Drehzahlregelung beschrieben. Der Ausgang der Wirkleistungsregelung dient als Führungsgröße für die geschachtelte Drehzahlregelung. Durch die Variierung der Drehzahl wird jedoch auch die Spannung im Zwischenkreis beeinflusst. Und die Änderung des Spannungspegels bedingt einen Leistungsfluss zwischen dem Netz und dem Zwischenkreis. Die vom Netz gelieferte/vom Netz

## 5. SIMULATIONSSZENARIEN

aufgenommene Leistung wird an den Transformator клемmen gemessen und in der Wirkleistungsregelung als der Ist-Wert genommen. Deswegen ist auch die Regelung der Zwischenkreisspannung interessant. Der Verlauf der Zwischenkreisspannung im vollständigen und im Vereinfachten Modell ist in der Abbildung 51 gezeigt.

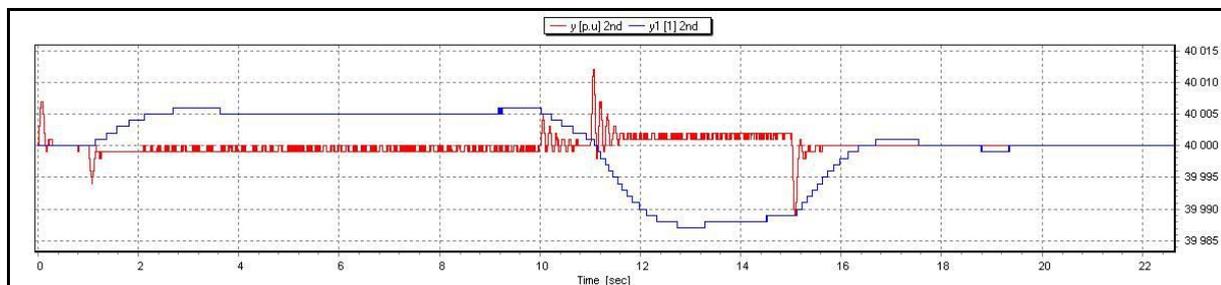


Abbildung 51: Verlauf der Zwischenkreisspannung UDC im vollständigen Modell (rot) und im vereinfachten Modell (blau)

### 5.2 Nachfahren einer Wirkleistungstrajektorie im Generatorbetrieb

Im Generatorbetrieb wird ein anderer Satz von Regler als im Motorbetrieb angewendet. Der gleiche Regler wird nur in der Flussregelung verwendet. Bei dem Folgen von einer vorgeschriebenen Wirkleistungstrajektorie ergibt sich somit unterschiedliches Verhalten als im Motorbetrieb.

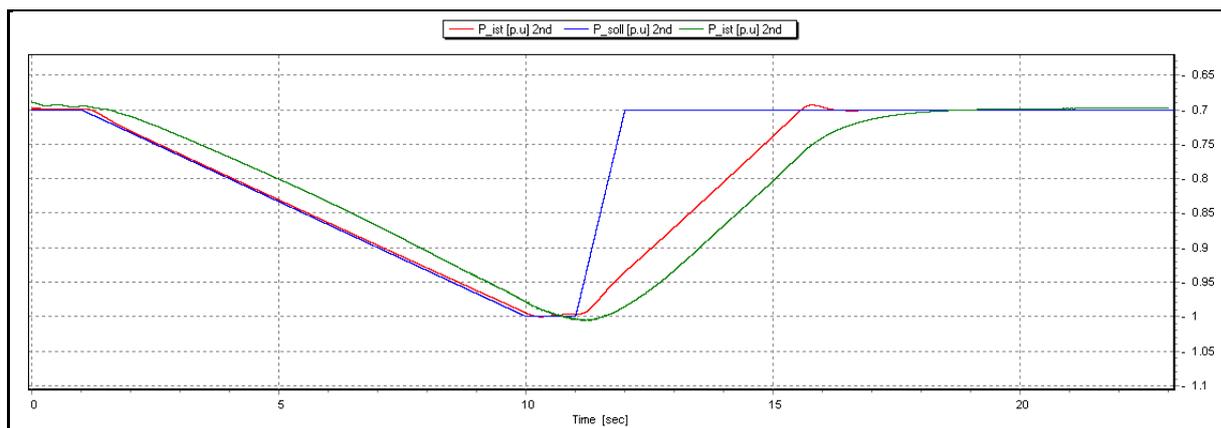


Abbildung 52: Wirkleistungsverlauf im Generatorbetrieb für Vollständiges (rot) und für vereinfachtes Modell (grün)

Absichtlich wurde eine sehr steile Wirkleistungstrajektorie zwischen  $t = 11\text{s}$  und  $t = 12\text{s}$  vorgegeben. Diese schnelle Änderung sollte die Funktionsweise vom Anstiegslimiter  $LAST\_LIM$  demonstrieren.  $LAST\_LIM$  beschränkt den Anstieg des Lastmoments auf  $1\text{p.u./15s}$ . Da die Wirkleistung im Generatorbetrieb proportional zum Drehmoment ist, so ist auch die Wirkleistungsänderung mit  $1\text{p.u./15s}$  beschränkt.

Schließlich wird auch der elektromagnetische Moment  $T_{ext}$  in Abbildung 53 gezeigt. Er ist ebenfalls durch den Anstiegslimiter beschränkt.

## 5. SIMULATIONSSZENARIEN

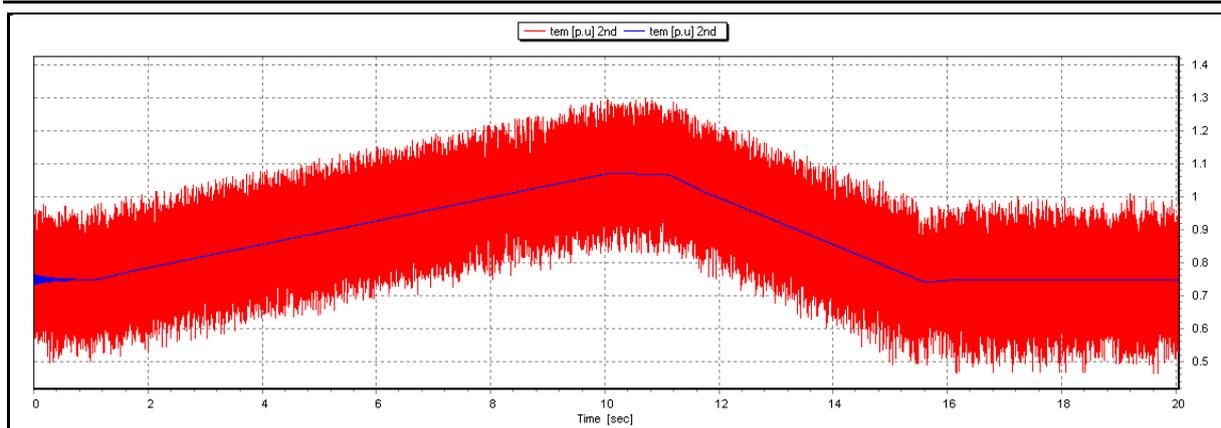


Abbildung 53: Das elektromagnetische Moment im Generatorbetrieb

### 5.3 Nachfahren einer Blindleistungstrajektorie im Motorbetrieb

Der Leistungswinkel (bzw. die relative Blindleistung) ist eine der Anforderungen auf den Stromerzeuger. In Abbildung 54 ist der Verlauf der relativen Ist-Blindleistung für vollständiges Modell (blau) und für vereinfachtes Modell (grün) gezeigt. Im vollständigen Modell gibt es in den steilen Teilen der Soll-Trajektorie große Abweichungen von dem Sollwert.

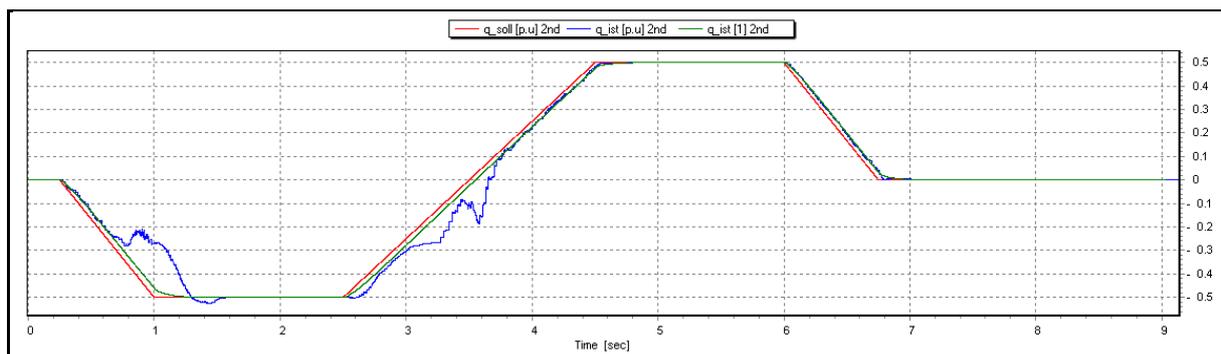


Abbildung 54: Verlauf der relativen Blindleistung im vollständigen Modell (blau) und im vereinfachten Modell (grün)

Diese Regelabweichungen sind durch das Zusammenspiel mit der Zwischenkreisspannungsregelung verursacht. Im vollständigen Modell sind wegen verzerrter Meßsignale zahlreiche Filter vorhanden. In der Zwischenkreisspannungsregelung ist der gleitende Mittelwert UDCF (Abbildung 23) für eine Totzeit von 20ms verantwortlich. Die, über die Totzeit kumulierte Regelabweichung wird dann bei  $t = 0.75s$  geregelt, und verursacht einen steilen Gradient im Zwischenkreisspannungsverlauf (Abbildung 55). Bei solchem Spannungsgradient versagt die Blindleistungsregelung, und weist eine größere Regelabweichung aus. Ähnliches Szenario ereignet sich auch bei  $t = 3.5s$ . Bei einer konstanten Führungsgröße (wie z.B.  $q_{soll} = -0.5$  für  $1.0s \leq t \leq 2.5s$ ) verhält sich der Regelkreis erwartungsgemäß.

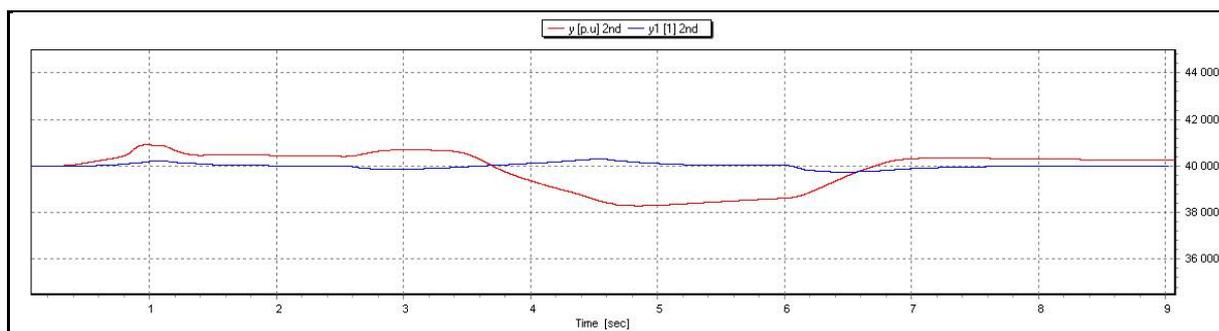


Abbildung 55: Verlauf der Zwischenkreisspannung im vollständigen (rot) und im vereinfachten Modell (blau)

### 5.4 Generatoranlauf

Ein interessanter Betrieb ist der Generatoranlauf. Im Generatoranlauf wird die Funktionsweise mehreren Blöcken vorgeführt.

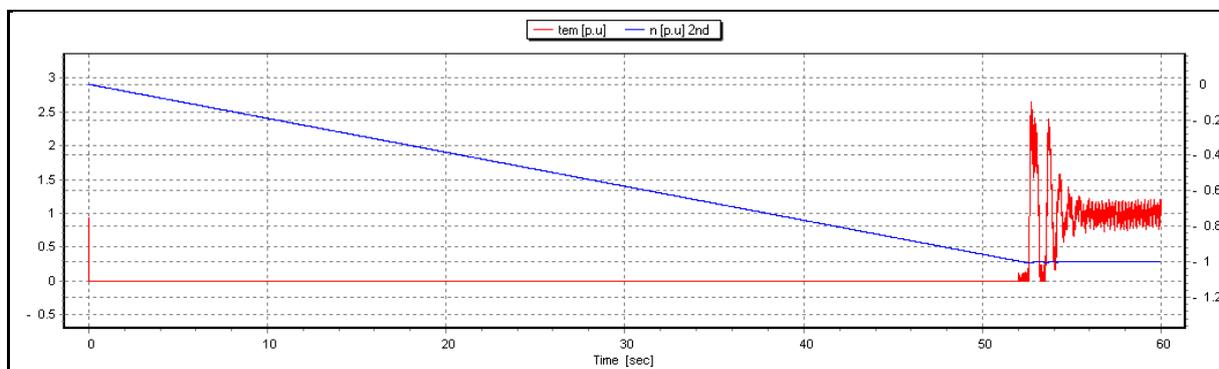


Abbildung 56: Generatoranlauf im vollständigen Modell

Im Generatoranlauf im vollständigen Modell ist die Zustandsvariable zu  $ANLAUF.y = -1$  gesetzt. Dies schaltet die Thyristoren des Umrichters aus, und der Rotor fängt an in die Generatordrehzahl zu beschleunigen. Beim Erreichen der Generatormenndrehzahl wird die Anlaufvariable zu  $ANLAUF.y = 0$  gesetzt, und ein elektromagnetisches Drehmoment wird angelegt. Zum gleichen Zeitpunkt greifen auch alle Regelkreise zu, und bringen die Maschine in den gewünschten Betriebspunkt ( $n_{soll} = -1$ ,  $q_{soll} = 0$ ,  $P_{soll} = -0.7$  wie in Abbildung 56).

Im Generatoranlauf im vollständigen Modell ist dagegen die Zustandsvariable von Anfang an zu  $ANLAUF.y = -2$  gesetzt. In diesem Zustand „sperren“ die Rheostaten CB1 und CB2. Beim Erreichen der Generatormenndrehzahl, ändert sich die Zustandsvariable von  $ANLAUF.y = -2$  auf  $-1$  und die Rheostaten werden „sanft umgeschaltet“. Der Umschaltvorgang dauert 3 Sekunden, und der Widerstand  $R_{abc}$  folgt einer Exponentialfunktion  $R_{abc} = R_0 e^{-(t-t_0)/\tau}$ . Danach gleicht  $ANLAUF.y = 0$ , und die Maschine befindet sich im normalen Generatorbetrieb. Die Rheostaten werden zur verlustlosen Leitung mit  $R_{abc} = 0\Omega$ . Die Regelkreise greifen zu, und bringen die Maschine in den gewünschten Betriebspunkt ( $n_{soll} = -1$ ,  $q_{soll} = 0$ ,  $P_{soll} = -0.7$  wie in Abbildung 57).

## 5. SIMULATIONSSZENARIEN

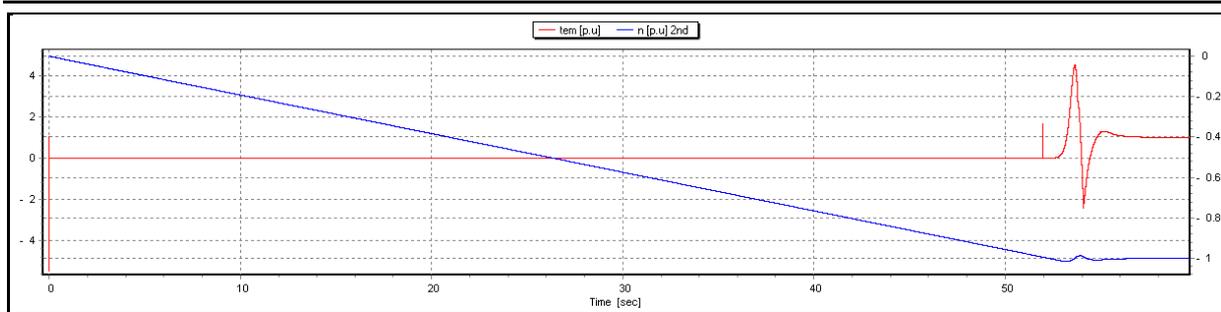


Abbildung 57: Generatoranlauf im vereinfachten Modell

Die Gestalt des Drehmoments im vereinfachten Modell unterscheidet sich von dem vollständigen Modell. Sie wird durch die hohe Stromeinschwingung beim Einschalten des Drehmoments verursacht (s. Abschnitt 4.2.8). Die hohe Stromeinschwingung der Maschine verursacht eine schnelle Umladung des Zwischenkreiskondensators. Dies führt wiederum zu hohen Strömen von der Netzseite und somit zu hoher Wirkleistung am Transformator. Abbildung 58 zeigt die Zwischenkreisspannung, und Abbildung 59 zeigt die Wirkleistung während dieses Vorgangs. In Abbildung 60 ist ein Detail der Wirkleistung beim „sanften Umschalten“ gezeigt.

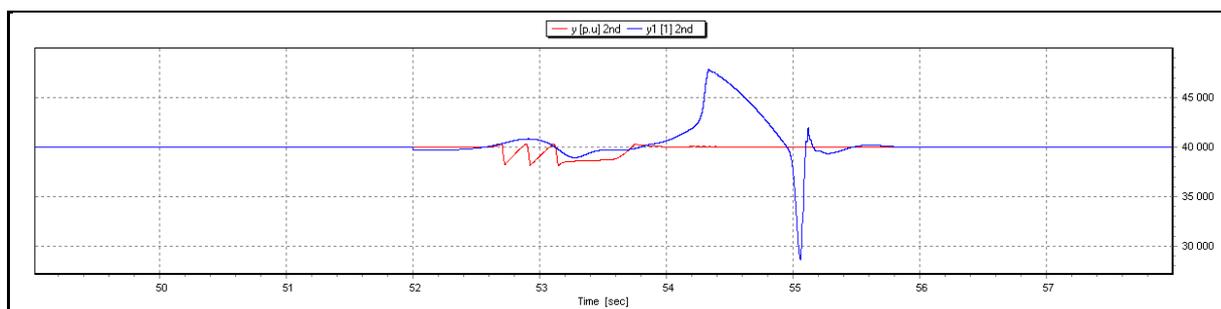


Abbildung 58: Zwischenkreisspannung im vollständigen Modell (rot) und im vereinfachten Modell (blau)

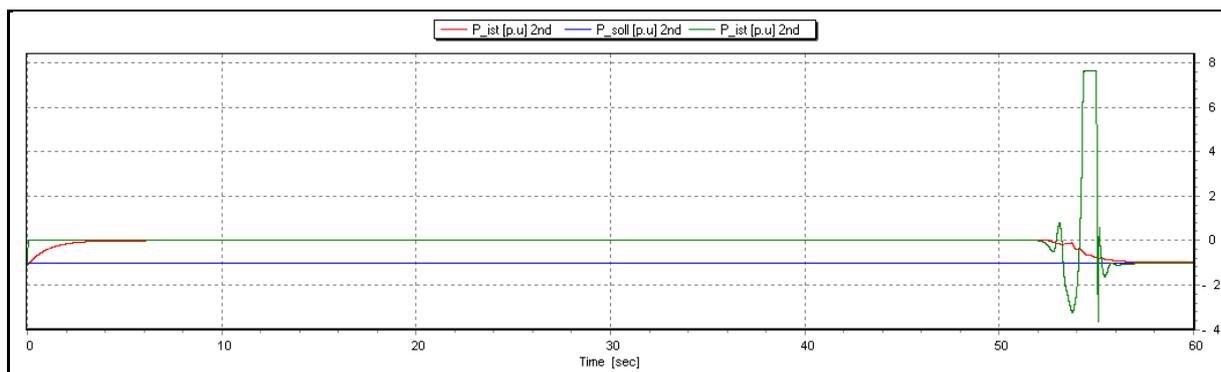
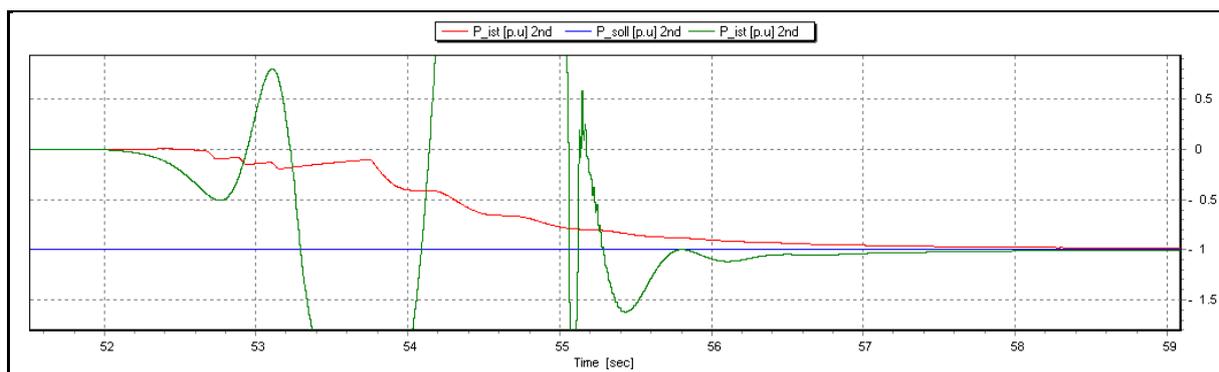


Abbildung 59: Wirkleistungsverlauf während des Generatoranlaufs. Vollständiges Modell (rot), vereinfachtes Modell (grün), Sollwirkleistung (blau).



**Abbildung 60: Detail des Wirkleistungsverlaufs im Generatoranlauf. Vollständiges Modell (rot), vereinfachtes Modell (grün) und Sollwirkleistung ist blau.**

Zusammenfassend wurden im Kapitel 5 mehrere Betriebsszenarien analysiert. Es wurde ein Vergleich zwischen dem Verhalten des vollständigen und des vereinfachten Modells gemacht. Bei den üblichsten Betrieben – beim Folgen einer Wirkleistungstrajektorie – wurden ähnliche Ergebnisse für die beiden Modelle erreicht. Unterschiedliche Reglerparameter wirkten sich in kleinen Abweichungen der Regelgrößen während transienten Vorgängen aus. Stationäre Endwerte wurden jedoch problemlos erreicht.

Der Betrieb der Blindleistungskompensation/-Regelung wurde ebenfalls getestet. In diesem Betrieb wurden ebenfalls bessere transiente Ergebnisse im vollständigen Modell erreicht. Die stationären Sollwerte der Blindleistung wurden in beiden Modellen erreicht.

Während des Generatoranlaufs wurde eine Stromschwingung und daraus folgende Drehmomentschwingung im vereinfachten Modell beobachtet. Der Zwischenkreisumrichter wurde im vereinfachten Modell durch die Ersatzspannungsquellen modelliert, die keine inhärente Strombegrenzung besitzen. Im Vergleich mit dem vollständigen Modell, wo der Stromanstieg durch das Tastverhältnis des Umrichters und durch die Zeitkonstanten des Umrichters und der Maschine beschränkt ist, wurde der Stromanstieg im vereinfachten Modell nur durch die Statorzeitkonstante beschränkt. Um die transiente Drehmomentüberhöhungen abzuschaffen, wird eine Einschaltvorrichtung eingeführt, die die Drehmomentüberhöhungen um einen Faktor 10 verkleinert.

Insgesamt ist das Verhalten des vereinfachten Modells dem vollständigen Modell treu. Es gibt zwar Abweichungen, im Bezug auf den Zweck und Nutzung des Modells sind sie nicht problematisch.

### 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde ein Vergleich zwischen dem vollständigen und dem vereinfachten Modell einer Synchronmaschine mit Vollumrichter gemacht. Das vollständige Modell wurde ausgehend von dem SIMSEN Tutorial 8 (Eine Synchronmaschine mit Thyristorumrichter) entwickelt. Zusätzlich zum Tutorial 8 wurde die Blindleistungsregelung hinzugefügt. Um dies zu ermöglichen, wurde der einfache Thyristorumrichter mit einem GTO-Umrichter ersetzt. Der Erregungsregelkreis wurde von der Spannungsregelung auf eine Flussregelung umgeformt, um die Drehzahl mit der Uf-Kennlinie gemächlich regeln zu können. Die Drehzahlregelung wurde in eine Kaskade mit der Wirkleistungsregelung gebracht. Weiters wurden Hilfselemente implementiert, um in allen vier Quadranten des PQ-Diagramms arbeiten zu können. Um das Verhalten an einem hydraulischen System zu testen, wurde eine Drehzahl und Leistungsabhängige Last implementiert.

Das vereinfachte Modell wurde aus dem vollständigen Modell entwickelt. Deswegen besitzt es die gleiche Regelungsstruktur, wie das vollständige Modell. Der Umrichter wurde aber durch gesteuerte Spannungsquellen ersetzt, um eine höhere Integrationszeit und schnellere Simulationen zu erreichen. Mit diesem Wechsel war auch eine Umformung und neue Parametrierung der Regelkreise nötig. Dank der fehlenden Pulsweitenmodulation konnten zahlreiche Filter entfernt werden. Die Regelkreise wurden einfacher. Ein Nachteil war die Unmöglichkeit den Strom an den Spannungsquellen zu steuern. Dies führte bei manchen Betriebsszenarien zu einem schlechteren Verhalten.

Um die Implementierung des vereinfachten Modells zu validieren, wurden mehrere Betriebsszenarien simuliert. Es wurde die Funktionalität der Regelschleifen ausprobiert, und Ergebnisse des vereinfachten Modells wurden mit dem vollständigen Modell verglichen. Aus den Simulationen folgt, dass die Modellierung des Umrichters durch die gesteuerten Spannungsquellen gültig ist, und in dem Motor- und Generatorbetrieb ähnliche Ergebnisse ergab. Bei dem Motor- und Generatoranlauf gab es jedoch Einschränkungen, die hauptsächlich durch die gesteuerten Spannungsquellen verursacht wurden. Insbesondere bei den dynamischen Vorgängen wie beim Anlauf konnte der Strom nicht direkt vorgegeben werden, und resultierte in unerwünschte transiente Vorgänge. Das nicht-ideale Verhalten könnte durch eine andere Parametrierung der Regler oder durch die Verwendung anderer Reglertypen vermieden werden. Es wäre auch möglich das einfache Uf-Steuerungsverfahren durch eine fortgeschrittene Regelungsmethode wie zum Beispiel eine feldorientierte Regelung zu ersetzen.

Dieses Modell bietet zwei Schnittstellen nach außen: einerseits den Lastmoment, und andererseits die Klemmen des Übertragungsnetzes. Die, im System modellierte Last kann durch ein echtes hydraulisches System ersetzt werden, um das Systemverhalten realistischer zu machen. Das System kann aber auch durch die Klemmen des Übertragungsnetzes in ein bestehendes Netz von Verbraucher und Erzeuger integriert werden, um Netzstabilität zu untersuchen.

## Literaturverzeichnis

- [1] K. Krüger und J. Koutnik, „Dynamic Simulation of Pump-Storage Power Plants with different variable speed configurations using the Simsen Tool,“ *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, pp. 334-345, 2009.
- [2] C. Nicolet, A. Beguin, B. Kawkabani, Y. Pannatier, A. Schwery und F. Avellan, „Variable Speed and Ternary Units to Mitigate Wind and Solar Intermittent Production,“ EPFL, Lausanne, 2014.
- [3] C. Nicolet, A. Beguin, B. Kawkabani, C. Landry und F. Avellan, „Contribution of Pumped Storage Units to Mixed Islanded Power Network Stability,“ EPFL, Lausanne, 2012.
- [4] D. Shively, J. Gardner, T. Haynes und J. Ferguson, „Energy Storage Methods for Renewable Energy Integration and Grid Support,“ Boise State University, Atlanta - USA, 2008.
- [5] S. Soter und R. Wegener, „Development of Induction Machines in Wind Power Technology,“ *IEEE - Transactions on Energy Conversions*, pp. 1490-1495, 2007.
- [6] B. Kawkabani, *Machines Electriques - Vorlesungsskriptum*, Lausanne: EPFL, 2013.
- [7] ABB Industrie AG, „A Guide to Standard Medium Voltage Variable Speed Drives,“ Turgi - Schweiz.
- [8] Power Vision Engineering, „SIMSEN - Simulation software for the analysis of electrical power networks, adjustable speed drives and hydraulic systems,“ 2013 . [Online]. Available: [http://wiki.epfl.ch/simsen/documents/pubsim\\_hydro\\_13\\_2013.pdf](http://wiki.epfl.ch/simsen/documents/pubsim_hydro_13_2013.pdf). [Zugriff am 13 Juni 2015].
- [9] Power Vision Engineering, „SIMSEN,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.simsen.epfl.ch>. [Zugriff am 13 Juni 2015].
- [10] J. Specovius, *Grundkurs Leistungselektronik*, Wiesbaden: Vieweg, 2008.
- [11] D. Schröder, *Leistungselektronische Bauelemente*, München: Springer, 2006.
- [12] F. Jenni und D. Wüest, *Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter*, Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1995.
- [13] B. Bate, „Spezialgebiete der Steuer- und Regelungstechnik,“ FH Dortmund, Dortmund, 2008.
- [14] A. Hodder, J.-J. Simond und A. Schwery, „Doble-Fed Asynchronous Motor-Generator Equipped With a 3-level VSI Cascade,“ *IAS 2004*, pp. 2762-2769, 2004.
- [15] M. Tazil, V. Kumar, R. Bansal, S. Kong, Z. Dong, W. Freitas und H. Mathur, „Three-phase doubly fed induction generators: an overview,“ *IET Electric Power Applications*, pp. 75-89, 2009.
- [16] I. Boldea, „Control of Electric Generators: A Review,“ *IEEE*, pp. 972-980, 2003.

- [17] Y. Pannatier, B. Kawkabani, C. Nicolet, J.-J. Simond, A. Schwery und P. Allenbach, „Investigation of Control Strategies for Variable-Speed Pump-Turbine Units by Using a Simplified Model of the Converters,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 3039-3049, 2010.
- [18] ABB Semiconductors AG, „Leistungselektronik für Hochleistungsanwendungen“. *ABB Review*.
- [19] ABB Industrie AG, „IGCT - eine neue Zukunftsweisende Technik für kostengünstige Hochleistungsumrichter“. *ABB Technik*.
- [20] C. Nicolet, Y. Pannatier, B. Kawkabani, A. Schwery, F. Avellan und J.-J. Simond, „Benefits of Variable Speed Pumped Storage Units in Mixed Islanded Power Network during Transient Operation,“ EPFL, Lausanne, 2009.
- [21] J.-. Ardanuy, J. Wilhelmi, J.-. Mora und J. Perez, „Variable-Speed Hydro Generation: Operational Aspects and Control,“ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 569-574, Juni 2006.
- [22] Y. Pannatier, B. Kawkabani, C. Nicolet, J.-J. Simond, A. Schwery und P. Allenbach, „Investigation of Control Strategies for Variable-Speed Pump-Turbine Units by Using a Simplified Model of the Converters,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 3039-3049, September 2010.
- [23] A. Hodder, Double-fed Asynchronous Motor-Generator Equipped with a 3-Level VSI Cascade, Lausanne: EPFL, 2004.
- [24] D. Schröder, Elektrische Antriebe - Grundlagen, 4. Auflage, München: Springer Verlag, 2009.
- [25] B. Wu, High-Power Converters and AC-Drives, Toronto: IEEE Press, 2006.
- [26] D. Schröder, *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*, München: Springer Verlag, 2009.
- [27] ENTSOE, *Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators*, Brussel: ENTSOE, 2011.
- [28] A. Rufer, *Systèmes d'électronique de puissance*, Lausanne: EPFL, 2010.
- [29] G. Brauner, *Energieversorgung - Vorlesungsskriptum*, Wien: TU WIEN, 2011.
- [30] T. Wolbank, *Simulation Elektrischer Maschinen und Antriebe - Vorlesungsskriptum*, Wien: TU WIEN, 2015.
- [31] A. Kugi, *Automatisierung - Vorlesungsskriptum*, Wien: TU WIEN, 2011.
- [32] F. Rodriguez-Bobada, P. Ledesma, S. Martinez, L. Coronado und E. Prieto, „Simplified Wind Generator Model for Transmission System Operator Planning Studies,“ 2008.
- [33] K. Hermann, Vorlesungsskriptum zu Digital Signal Processing, Wien: TU WIEN, 2010.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typischer Zeitverlauf der Solarbestrahlung während eines (a) sonnigen und (b) während eines bewölkten Tages [3].....	- 1 -
Abbildung 2: Inselnetzwerk mit regenerativen und thermischen Energiequellen [2].....	- 2 -
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks mit ternärem Satz [3].....	- 4 -
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks mit dem Umrichter [5].....	- 5 -
Abbildung 5: Zwei elektrische Ausführungen eines drehzahlvariablen Pumpspeicherkraftwerks [5].	- 6 -
-	
Abbildung 6: Querschnitt einer mittelgroßen Synchronmaschine [6] .....	- 6 -
Abbildung 7: Zweistufiger Spannungszwischenkreisumrichter links, und ein dreistufiger Direktumrichter ohne Zwischenkreis rechts [7].....	- 8 -
Abbildung 8: Der lastgeführte Umrichter LCI6 mit Stromzwischenkreis [1] .....	- 9 -
Abbildung 9: Doppelt-Gespeiste Asynchronmaschine mit Direktumrichter [1] .....	- 10 -
Abbildung 10: Doppelt-Gespeiste Asynchronmaschine mit GTOD-Vollumrichter [1] .....	- 11 -
Abbildung 11: Synchronmaschine mit selbstgeführtem Wechselrichter.....	- 12 -
Abbildung 12: Entwicklungsumgebung von SIMSEN.....	- 13 -
Abbildung 13 Regelkreise in SIMSEN.....	- 15 -
Abbildung 14: Programm PSI_COMP .....	- 15 -
Abbildung 15: Mittelwertbilder PSI_AVG.....	- 17 -
Abbildung 16: Regelung mit einer Z-Übertragungsfunktion .....	- 18 -
Abbildung 17: Punktfunktion F-Pts als Trajektorievorgabe .....	- 19 -
Abbildung 18: Regulator Reg als ein PI-Regler .....	- 20 -
Abbildung 19: Berechnung des Anfangszustandes mit INISIM .....	- 21 -
Abbildung 20: Simulationsparameter .....	- 21 -
Abbildung 21: Programm VISUAL - links ist das Bedienungsdialog, rechts ist die visuelle Ausgabe	- 23 -
Abbildung 22: Darstellung der Elementparameter: links die Parameterdatei, rechts die Darstellung in der Diplomarbeit mittels einer Tabelle .....	- 24 -
Abbildung 23: Das vollständige Modell des Pumpspeicherkraftwerks.....	- 26 -
Abbildung 24:Strompfade bei der Nutz- und Freilaufperiode im Hochsetzstellerbetrieb des <i>UINV1</i> wenn die Spannung $U_{ab}$ maximal ist .....	- 28 -
Abbildung 25: Der einphasige Hochsetzsteller mit einem Glättungskondensator und einer Boost-Diode [10].....	- 29 -
Abbildung 26: Strompfade der Freilauf- und der Nutzperiode in <i>UINV1</i> beim Hochsetzstellerbetrieb bei $U_{ac}$ minimal.....	- 29 -
Abbildung 27: der motorseitige Umrichter <i>UINV2</i> arbeitet wie ein TSS bei $U_{ab}$ maximal.....	- 30 -
Abbildung 28: Wechselrichter im TSS-Betrieb bei $-U_{ac}$ maximal .....	- 31 -
Abbildung 29: Regelungskonzept des Modells .....	- 32 -
Abbildung 30: ein pulsweiten-modulierte Sinus .....	- 33 -
Abbildung 31: ein pulsweiten-modulierter Reglerausgang.....	- 34 -
Abbildung 32: der rotierende Spannungsraumzeiger im RE_IM1.....	- 35 -
Abbildung 33: Makro <i>UINV1_MOT</i> .....	- 36 -
Abbildung 34: Bestimmung der Reglerparameter mit dem Zeit-Summen-Verfahren [13] .....	- 38 -
Abbildung 35: Makro <i>UINV_2M</i> .....	- 39 -

Abbildung 36: Zeitverschiebungsmakro DELAY.....	- 43 -
Abbildung 37: Makro UINV1_GEN .....	- 45 -
Abbildung 38: Zeitverzögerungsmakro im Generatorbetrieb DELAY.....	- 47 -
Abbildung 39: Makro UINV_2G .....	- 49 -
Abbildung 40: das Makro LAST.....	- 52 -
Abbildung 41: der Programm LAST .....	- 52 -
Abbildung 42: Das vereinfachte Modell des Pumpspeicherkraftwerks .....	- 55 -
Abbildung 43: Regelungskonzept des vereinfachten Modells .....	- 56 -
Abbildung 44: Das Makro UINV_2M .....	- 57 -
Abbildung 45: Das Makro UINV_2G .....	- 58 -
Abbildung 46: Makro PRIMAER.....	- 59 -
Abbildung 47: das Makro DC-LINK .....	- 60 -
Abbildung 48: Soll-Wirkleistungstrajektorie (blau) nachgefolgt im vollständigen (grün) und im vereinfachten Modell (rot).....	- 64 -
Abbildung 49: Links ist die Ist-Drehzahl (rot) und die Soll-Drehzahl (blau) im vollständigen Modell. Rechts: die Ist-Drehzahl (rot) und die Soll-Drehzahl (blau) im vereinfachten Modell. ....	- 65 -
Abbildung 50: das rippelbehaftete Drehmoment im vollständigen Modell (rot), und das Drehmoment im vereinfachten Modell (blau).....	- 65 -
Abbildung 51: Verlauf der Zwischenkreisspannung UDC im vollständigen Modell (rot) und im vereinfachten Modell (blau).....	- 66 -
Abbildung 52: Wirkleistungsverlauf im Generatorbetrieb für Vollständiges (rot) und für vereinfachtes Modell (grün).....	- 66 -
Abbildung 53: Das elektromagnetische Moment im Generatorbetrieb .....	- 67 -
Abbildung 54: Verlauf der relativen Blindleistung im vollständigen Modell (blau) und im vereinfachten Modell (grün).....	- 67 -
Abbildung 55: Verlauf der Zwischenkreisspannung im vollständigen (rot) und im vereinfachten Modell (blau) .....	- 68 -
Abbildung 56: Generatoranlauf im vollständigen Modell.....	- 68 -
Abbildung 57: Generatoranlauf im vereinfachten Modell.....	- 69 -
Abbildung 58: Zwischenkreisspannung im vollständigen Modell (rot) und im vereinfachten Modell (blau) .....	- 69 -
Abbildung 59: Wirkleistungsverlauf während des Generatoranlaufs. Vollständiges Modell (rot), vereinfachtes Modell (grün), Sollwirkleistung (blau). ....	- 69 -
Abbildung 60: Detail des Wirkleistungsverlaufs im Generatoranlauf. Vollständiges Modell (rot), vereinfachtes Modell (grün) und Sollwirkleistung ist blau.....	- 70 -

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von einer Doppelt-Gespeisten Asynchronmaschine mit einer Synchronmaschine [1], [7] .....	- 7 -
Tabelle 2: Datenschild der Spannungsquelle VS1, des Übertragungsnetzes und des Transformators TF1 .....	- 25 -
Tabelle 3: Parametern der Synchronmaschine SM1, der mechanischen Last ME1, der Erregung VSEX und des Spannungszwischenkreisumrichters UINV1, UINV2 + CDC .....	- 27 -
Tabelle 4: Parametern des Integrators THT .....	- 33 -
Tabelle 5: Parametern der Punktfunktion TRI .....	- 33 -
Tabelle 6: Berechnung der orthogonalen Komponenten eines rotierenden Spannungszeigers im RE_IM1 .....	- 35 -
Tabelle 7: Programm für die Erzeugung der Steuerbefehle UI1_MOT .....	- 37 -
Tabelle 8: Fensterung im Programm RECT_1M .....	- 38 -
Tabelle 9: Parametern des Zwischenkreisspannungsreglers UREG_M .....	- 39 -
Tabelle 10: der Programm UI2_MOT .....	- 40 -
Tabelle 11: Der Drehzahlregler NREG_M .....	- 41 -
Tabelle 12: Berechnung der relativen Blind-, Wirkleistung, des Leistungswinkels, des Tangens vom Leistungswinkel und der Scheinleistung im Programm Q_COMP .....	- 42 -
Tabelle 13: Parametern des Blindleistungsreglers QREG_M .....	- 42 -
Tabelle 14: Programm DELAY_M, dass die Verzögerungselemente (DT_R_1, DT_R_2, DT_S_1, DT_S_2, DT_T_1, DT_T_2) steuert .....	- 44 -
Tabelle 15: Programm für die Erzeugung der Steuerbefehle UI1_GEN .....	- 46 -
Tabelle 16: Programm zur Erzeugung der Fenstern RECT1_G .....	- 47 -
Tabelle 17: Programm UI2_GEN .....	- 48 -
Tabelle 18: Programm RECT2_G .....	- 49 -
Tabelle 19: Parametern des Wirkleistungsreglers .....	- 50 -
Tabelle 20: Berechnung des Gesamtflusses im Berechnungsprogramm PSI_COMP .....	- 51 -
Tabelle 21: das Programm SEL1 und SEL2 .....	- 53 -
Tabelle 22: Solldrehzahl-Selektor NSOLL .....	- 54 -
Tabelle 23: Das Programm UI2_MOT .....	- 57 -
Tabelle 24: Bildung von Phasenspannungen im Programm UI2_GEN .....	- 58 -
Tabelle 25: Programm PRIMAER .....	- 59 -
Tabelle 26: Berechnung der Zwischenkreisspannungsenergie im E_CDC .....	- 61 -
Tabelle 27: Berechnung von Kondensatorspannung im Programm CDC .....	- 62 -
Tabelle 28: Ansteuerung von Schalter CB1 und CB2 im Programm R_REF .....	- 63 -