

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

# IIEAN



# Optimierung des Betriebspunktes eines UPFC

Masterarbeit von Andreas Kleibner, BSc.

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

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

April 2022

Technische Universität Graz Institut für Elektrische Anlagen und Netze Inffeldgasse 18/I 8010 Graz Austria

#### Institutsleiter

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

#### Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Polster Stefan Christian Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner

#### Reviewer

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

Masterarbeit von Andreas Kleibner

April 2022

# Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am 04.04.2022

Andreas Kleibner, BSc.

## Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei meinem Betreuer Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner für seine finale Unterstützung und Betreuung meiner Masterarbeit bedanken. Weiters möchte ich mich bei meinem weiteren Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Polster bedanken, der mich im ersten Teil der Masterarbeit unterstützt hat.

Ein besonderer Dank ergeht auch an meine Familie, die mich während des gesamten Studiums unterstützt hat, sei es in emotionaler und finanzieller Hinsicht.

Ein ganz großer Dank ergeht auch an alle meinen Studienkollegen und mittlerweile Freunden, die ich im Laufe der Zeit im Dynamobauzeichensaals kennenlernte, für die gemeinsame Zeit und gegenseitige Unterstützung während des gesamten Studiums.

## Abstract

This master thesis is about the optimization of the operating points of a UPFC. The UPFC belongs to the group of FACTS and is essentially a dynamic load flow controller. This can be used in various power transmission networks for load flow control of certain transmission lines. A suitable load flow calculation is set up in the simulation software MATLAB and the corresponding UPFC – model is implemented. To replicate different network operations, various test networks are applied for simulation. Two different networks, which are connected with two parallel lines of different lengths, are simulated. The UPFC is implemented in one of the two lines and simulated at different lengths. The entire possible operating range of each network configuration with the various possible settings of the UPFC is determined to subsequently maximize the transmitted power from one system to the other and, on the other hand, to empirically determine the optimum operating points, with the lowest losses of the overall system, within the possible power transmissions.

## Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit geht es um die Optimierung der Betriebspunkte eines UPFC. Der UPFC gehört zur Gruppe der FACTS und ist im Wesentlichen ein dynamischer Lastflussregler. Dieser kann in verschiedenen Energieübertragungsnetzen Anwendung zur Lastflusssteuerung von bestimmten Übertragungsleitungen finden. Es wird in der Simulationssoftware MATLAB eine geeignete Lastflussberechnung aufgebaut und das entsprechende UPFC – Modell implementiert. Zur Nachstellung unterschiedlicher Netzbetriebe, werden verschiedene Testnetze zur Simulation angewendet. Es werden zwei verschiedene Netze, die mit zwei parallelen Leitungen unterschiedlicher Längen miteinander verbunden sind, nachgebildet. Dabei wird der UPFC in eine der beiden Leitungen implementiert und bei verschiedenen Leitungslängen simuliert. Dabei wird der gesamte mögliche Betriebsbereich jeder Netzkonfiguration mit den verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten des UPFC bestimmt, um anschließend die übertragene Leistung von einem System zum anderen zu maximieren und andererseits innerhalb der möglichen Leistungsübertragungen die optimalen Betriebspunkte, bei den geringsten Verlusten des Gesamtsystems, des UPFC empirisch zu ermitteln.

# Symbolverzeichnis

В	Suszeptanz
E	komplexer Spannungszeiger
Ē	konjugiert komplexer Spannungszeiger
G	Leitwert
i	Knoten i
<u>I</u>	komplexer Strom
<i>l</i> im <sup>calc</sup>	berechneter Imaginärteil des Stromes
<i>l</i> im <sup>sp</sup>	spezifizierter Imaginärteil des Stromes
<u>/</u> p	komplexer Strom Paralleltransformator
/ <sub>re</sub> calc	berechneter Realteil des Stromes
I <sub>re</sub> sp	spezifizierter Realteil des Stromes
<u>/</u> s	komplexer Strom Serientransformator
<i>I</i> s,re	Realteil Strom Serientransformator
<i>I</i> s,re	Imaginärteil Strom Serientransformator
<u>/</u> sp	spezifizierter komplexer Strom
J	Jakobi – Matrix
k	Knoten k
m	Knoten m
n	Anzahl der Iterationen
Pcalc	berechnete Wirkleistung
PG	Wirkleistungseinspeisung
P <sub>ges</sub>	übertragene Gesamtleistung
Pges,max	maximal übertragene Gesamtleistung
PL	Wirkleistungslast
Pp	Wirkleistung Paralleltransformator
Ps	Wirkleistung Serientransformator
Psp	spezifizierte Wirkleistung

VI

PUPFC	Wirkleistung UPFC
P <sub>v,ges</sub>	Gesamtverluste
Q <sup>calc</sup>	berechnete Blindleistung
Q <sub>G</sub>	Blindleistungseinspeisung
QL	Blindleistungslast
Qs	Blindleistung Serientransformator
Qp	Blindleistung Paralleltransformator
Q <sup>sp</sup>	spezifizierte Blindleistung
QUPFC	Blindleistung UPFC
Rs	Wirkwiderstand Serientransformator
SB	Bezugsscheinleistung
SN,UPFC	Nennscheinleistung UPFC
<u>S</u> p	komplexe Scheinleistung Paralleltransformator
<u>S</u> s	komplexe Scheinleistung Serientransformator
<u>S</u> sp	spezifizierte komplexe Scheinleistung
<u>U</u>	komplexe Spannung
U <sub>B</sub>	Bezugsspannung
UDC	Zwischenkreis Gleichspannung
<b>U</b> im	Imaginärteil Spannung
<u>U</u> p	komplexe Zusatzspannung Paralleltransformator
U <sub>re</sub>	Realteil Spannung
<u>U</u> s	komplexe Zusatzspannung Serientransformator
<i>U</i> s,max	maximale Zusatzspannung Serientransformator
Xs	Reaktanz Serientransformator
XUPFC	Reaktanz UPFC
Y	Knotenadmittanzmatrix
Y	Admittanz
<u>Z</u> p	Impedanz Paralleltransformator

<u>Z</u> s	Impedanz Serientransformator
Δ <u>/</u>	komplexe Stromdifferenz
Δ <i>l</i> im	Imaginärteil Stromdifferenz
Δ <i>I</i> <sub>re</sub>	Realteil Stromdifferenz
ΔP	Wirkleistungsdifferenz
ΔQ	Blindleistungsdifferenz
$arphi_{ m s}$	Winkel der Zusatzspannung Serientransformator

#### Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
NR – CIM	Newton-Raphson-Strominjektionsverfahren
pu	Per - Unit
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller

# Inhaltsverzeichnis

1	Einf	führung1		
	1.1	Mot	tivation	1
	1.2	Auf	gabenstellung und Zielsetzung	1
	1.3	Glie	ederung der Arbeit	2
2	2 Theorie			3
	2.1	The	eorie der Lastflusssteuerung	3
	2.1.1	Gru	Indlegende Gleichungen	. 3
	2.1.2	Ber	echnung der Stromdifferenzen	. 4
	2.2	The	orie der Modellierung eines UPFC	6
	2.2.1	Auf	bau	. 6
	2.2.2	Ers	atzschalbild	. 7
	2.2.3	Mo	dell des UPFC	. 7
	2.2	2.3.1	Modell des Serienumrichters (SSSC)	. 8
	2.2	2.3.2	Modell des Parallelumrichters (STATCOM)	10
	2.2	2.3.3	Berechnung der UPFC Parameter	12
	2.3	Imp	elementierung des UPFC - Modells in die Lastflussberechnung (NR – CIM)	13
3	Met	hod	lik1	6
	3.1	Aus	gangsnetz ohne UPFC	16
	3.2	Imp	plementierung des UPFC im Netz	17
	3.2.1	Tes	stnetze mit UPFC	17
	3.2	2.1.1	Szenario 1: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.2 pu	18
	3.2	2.1.2	Szenario 2: FRL 2 = 0,1 pu und FRL 3 = 0.2 pu	19
	3.2	2.1.3	Szenario 3: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.1 pu	20
	3.2.2	Vor	gehensweise der Simulation	20
	3.2	2.2.1	Variationsmöglichkeiten des UPFC	20
	3.2	2.2.2	Leistungsbegrenzung des UPFC	21
	3.2	2.2.3	Flussdiagramm der Simulation in MATLAB	22
	3.2.3	Vor	gehensweise der Auswertung	25
	3.2	2.3.1	Betriebsbereich	25

	3.2.	3.2	Maximal übertragbare Leistung Pges,max	25
	3.2.	3.3	Gesamtverluste P <sub>v,ges</sub>	25
	3.2.	3.4	Optimale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten Pv,ges	25
4 Simulationsergebnisse			ionsergebnisse2	26
2	4.1	Sze	enario 1: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.2 pu	26
	4.1.1	Beti	riebsbereich	26
	4.1.2	Max	kimal übertragbare Leistung P <sub>ges,max</sub>	28
	4.1.3	Ges	samtverluste P <sub>v,ges</sub>	30
	4.1.4	Opt	imale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten $P_{v,ges}$	31
2	4.2	Szenario 2: FRL 2 = 0,1 pu und FRL 3 = 0.2 pu		34
	4.2.1	Beti	riebsbereich	34
	4.2.2	Max	kimal übertragbare Leistung P <sub>ges,max</sub>	35
	4.2.3	Ges	samtverluste P <sub>v,ges</sub>	37
	4.2.4	Opt	imale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten $P_{v,ges}$	38
2	4.3	Sze	enario 3: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.1 pu	40
	4.3.1	Beti	riebsbereich	41
	4.3.2	Мах	kimal übertragbare Leistung P <sub>ges,max</sub>	42
	4.3.3	Ges	samtverluste P <sub>v,ges</sub>	44
	4.3.4	Opt	imale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten P <sub>v,ges</sub>	44
2	4.4	Ver	gleich mit / ohne UPFC – Regelung	47
	4.4.1	P۷	– Kurven ohne UPFC – Regelung	47
	4.4.2	Max	kimal übertragbare Leistung P <sub>ges,max</sub>	49
5	5 Zusammenfassungen und Schlussfolgerungen50			
6	Lite	ratu	ırverzeichnis	53
7	7 Anhang54			
7	7.1	Dia	gramme	54

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Durch die bereits stattfindende Energiewende in Richtung erneuerbarer Energien durch die Erzeugung großer Mengen Energie durch Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen, sowie die Zunahme an der Elektromobilität ist es notwendig, die vorhandenen Energienetze entsprechend zu steuern. Durch große Leistungstransporte zwischen einzelnen Netzen zu unterschiedlichen Zeiten kommt es immer wieder zu Überlastungen diverser Verbindungen und zur Notwendigkeit diese zu vermeiden. Neben den klassischen Phasenschiebertransformatoren bietet der Unified Power Flow Controller, kurz UPFC, eine weitere Möglichkeit zur dynamischen Lastflussteuerungen einzelner Netze bzw. Leitungen. In der vorliegenden Arbeit soll diese Auswirkung des Einbaus eines UPFC in entsprechende Testnetze untersucht und dessen Betriebsbereiche optimiert werden. Mit Hilfe eines UPFC ist es möglich, die Lastflüsse (Wirk- und Blindleistung) auf einer bestimmten Leitung, sowie die Spannung an dem Netzknoten, zu steuern und dadurch Energieflüsse gewünscht zu steuern. [1], [2]

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ein UPFC soll in ein geeignetes Testnetz bei verschiedenen Leitungslängen bzw. Leitungsimpedanzen eingebaut werden und mit Hilfe der Simulationssoftware MATLAB in eine geeignete Lastflussberechnung implementiert werden. Dabei soll sichergestellt werden, dass mit dem implementierten Modell alle Varianten der Lastflussteuerung bewerkstelligt werden können. Mit Hilfe von MATLAB sollen verschiedene Simulationen durchgeführt werden, um die optimalen Betriebspunkte des UPFC bei verschiedenen Leistungsübertragungen zu ermitteln, sowie die übertragbare Gesamtleistung zu erhöhen.

Es handelt sich hierbei also um eine klassische Optimierungsaufgabe mit den Optimierungsvariablen des UPFC:

- Wirkleistung PUPFC
- Blindleistung QUPFC

Die Randbedingung dieser Aufgabe ist es, die Spannungsgrenzen an allen Knoten im Testnetz einzuhalten, welche in einem realen Betrieb ebenfalls eingehalten werden müssen:

• Spannungsgrenzen (0,9 pu bis 1,1, pu)

Das Ziel ist es einerseits die übertragene Gesamtleistung so weit wie möglich zu erhöhen, sowie die optimalen Betriebspunkte des UPFC bei bestimmten übertragenen Leistungen zu ermitteln, bei denen die Verluste im Gesamtsystem am geringsten sind. Die Ermittlung dieser Betriebspunkte soll empirisch erfolgen, also durch Ausprobieren aller möglichen Betriebspunkte, um daraus die geeignetsten Punkte zu ermitteln.

## 1.3 Gliederung der Arbeit

Es wird zur Übersichtlichkeit kurz auf die Gliederung der wichtigsten Kapitel der vorliegenden Arbeit eingegangen:

• Theorie

In Teil 2 der Arbeit wird die verwendete Lastflussrechnung erklärt, welche in MATLAB realisiert wurde, sowie das verwendete UPFC – Modell. Des Weiteren wird erklärt, wie dieses Modell in die Lastflussberechnung implementiert wird.

Methodik

In diesem Kapitel wird erklärt, wie der UPFC in die verschiedenen Testnetze implementiert wird, die zur Lösung der Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. Es wird auch die Vorgehensweise der Simulationen, die zur Ermittlung aller möglichen Betriebspunkte benötigt wird, erklärt und dessen Auswertung zur Ermittlung der optimalen Betriebspunkte.

• Simulationsergebnisse

In Kapitel 4 werden alle Ergebnisse der einzelnen Testfälle gezeigt und erläutert. Dabei handelt es sich um folgende Testfälle: gleiche Leitungslänge, doppelte Leitungslänge und halbe Leitungslänge. Weiters werden diese Fälle auch mit den Ergebnissen ohne aktivierter UPFC – Regelung verglichen und gegenübergestellt.

• Zusammenfassungen und Schlussfolgerungen

Abschließend werden die gewonnen Ergebnisse in Kapitel 5 zusammengefasst und diskutiert.

# 2 Theorie

In diesem Kapitel wird die verwendete Theorie der vorliegenden Arbeit beschrieben und näher darauf eingegangen. Im Speziellen auf die verwendete Lastflussberechnung, sowie auf das implementierte UPFC – Modell.

### 2.1 Theorie der Lastflusssteuerung

#### [3]

Im Folgenden wird das Newton-Raphson-Strominjektionsverfahren (NR-CIM), welches neben anderen Verfahren zur Lastflussberechnung in Energieübertragungsnetzen verwendet wird, beschrieben. Dieses Verfahren kommt in der vorliegenden Arbeit zur Implementierung des UPFC, und der damit verbundenen Aufgabenstellung, zur Anwendung.

Bei diesem Verfahren werden die 2n Strominjektionsgleichung in rechtwinkligen Koordinaten für PQund PV – Knoten angewendet. Für PV – Knoten wird eine zusätzliche Gleichung eingeführt. (siehe [3]). Die resultierende Dimension der Jakobi – Matrix J (2n x 2n) entspricht die der Knotenadmittanzmatrix Y. Abhängig vom jeweiligen Lastmodell an den einzelnen Knoten werden nur die (2 x 2) Elemente in der Hauptdiagonale der J – Matrix bei jeder Iteration verändert.

#### 2.1.1 Grundlegende Gleichungen

Folgende Gleichungen und Herleitungen zur Lastflussberechnung wurden aus [3] und [4] entnommen.

An einem bestimmten Knoten k ergibt sich die komplexe Stromdifferenz zu:

$$\Delta \underline{I}_{k} = \frac{P_{k}^{sp} - jQ_{k}^{sp}}{\underline{E}_{k}^{*}} - \sum_{i=1}^{n} \underline{Y}_{ki} \cdot \underline{E}_{i} = 0$$
(2-1)

mit:

$$P_k^{sp} = P_{G,k} - P_{L,k}$$
(2-2)

$$Q_k^{sp} = Q_{G,k} - Q_{L,k} \tag{2-3}$$

Der Strom in Gleichung (2-1) kann in Real- und Imaginärteil aufgeteilt werden. Daraus ergibt sich:

$$\Delta I_{k,re} = \frac{P_k^{sp} \cdot U_{k,re} + Q_k^{sp} \cdot U_{k,im}}{U_{k,re}^2 + U_{k,im}^2} - \sum_{i=1}^n (G_{ki} \cdot U_{i,re} - B_{ki} \cdot U_{i,im}) = 0$$
(2-4)

$$\Delta I_{k,im} = \frac{P_k^{sp} \cdot U_{k,im} - Q_k^{sp} \cdot U_{k,re}}{U_{k,re}^2 + U_{k,im}^2} - \sum_{i=1}^n (G_{ki} \cdot U_{i,im} + B_{ki} \cdot U_{i,re}) = 0$$
(2-5)

Die Gleichungen (2-4) und (2-5) können wie folgt ausgedrückt werden:

$$\Delta I_{k,re} = I_{k,re}^{sp} - I_{k,re}^{calc}$$
(2-6)

$$\Delta I_{k,im} = I_{k,im}^{sp} - I_{k,im}^{calc}$$
(2-7)

Der auf Gleichung (2-4) und (2-5) angewandte NR – CIM Lösungsalgorithmus ergibt:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{1,im} \\ \Delta I_{1,re} \\ \Delta I_{2,im} \\ \Delta I_{2,re} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta I_{n,im} \\ \Delta I_{n,re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'_{11} & G'_{11} & B_{12} & G_{12} & \cdots & \cdots & B'_{1n} & G'_{1n} \\ G''_{11} & B''_{11} & G_{12} & -B_{12} & \cdots & \cdots & G''_{1n} & B''_{1n} \\ B_{21} & G_{21} & B'_{22} & G'_{22} & \cdots & \cdots & B'_{2n} & G'_{2n} \\ G_{21} & -B_{21} & G''_{22} & B''_{22} & \cdots & \cdots & G''_{2n} & B''_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B'_{n1} & G'_{n1} & B'_{n2} & G'_{n2} & \cdots & \cdots & B'_{nn} & G''_{nn} \\ G''_{n1} & B''_{n1} & G''_{n2} & B''_{n2} & \cdots & \cdots & G''_{nn} & B''_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_{1,re} \\ \Delta U_{1,im} \\ \Delta U_{2,re} \\ \Delta U_{2,im} \\ \vdots \\ \Delta U_{n,re} \\ \Delta U_{n,re} \\ \Delta U_{n,re} \end{bmatrix}$$
(2-8)

mit:

$$B_{kk}' = B_{kk} - a_k \tag{2-9}$$

$$G'_{kk} = G_{kk} - b_k \tag{2-10}$$

$$G_{kk}^{\prime\prime} = G_{kk} - c_k \tag{2-11}$$

$$B_{kk}'' = -B_{kk} - d_k \tag{2-12}$$

Die Koeffizienten  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  und  $d_k$  in Formel (2-9), (2-10), (2-11) und (2-12) können aus [3, p. 7] entnommen werden. Diese Koeffizienten sind abhängig vom jeweiligen Lastmodell, sowie von der angeschlossenen Last bzw. Erzeugung am Knoten k.

#### 2.1.2 Berechnung der Stromdifferenzen

An einem Knoten k ergibt sich die Wirk- und Blindleistungsdifferenz mit:

$$\Delta P_k = P_k^{sp} - P_k^{calc} \tag{2-13}$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{sp} - Q_k^{calc} \tag{2-14}$$

mit:

$$P_k^{calc} = U_{k,re} \cdot I_{k,re}^{calc} + U_{k,im} \cdot I_{k,im}^{calc}$$
(2-15)

$$Q_k^{calc} = U_{k,im} \cdot I_{k,re}^{calc} - U_{k,re} \cdot I_{k,im}^{calc}$$
(2-16)

Die Stromdifferenzen in den Gleichungen (2-6) und (2-7) können durch Umformen der Gleichungen (2-13), (2-14), (2-15) und (2-16) mit den Spannungen und Leistungsdifferenzen am Knoten k dargestellt werden:

$$\Delta I_{k,re} = \frac{U_{k,re} \cdot \Delta P_k + U_{k,im} \cdot \Delta Q_k}{\underline{U}_k^2}$$
(2-17)

$$\Delta I_{k,im} = \frac{U_{k,im} \cdot \Delta P_k - U_{k,re} \cdot \Delta Q_k}{\underline{U}_k^2}$$
(2-18)

mit:

$$\underline{U}_{k}^{2} = U_{k,re}^{2} + U_{k,im}^{2}$$
(2-19)

Diese Berechnungen des Real- und Imaginärteil der Stromdifferenzen gelten für PQ – Knoten. In diesem Fall sind die Wirk- und Blindleistungsdifferenzen am Knoten k bekannt. Für PV – Knoten gilt dies jedoch nicht. Bei diesen ist die Blindleistungsdifferenz am Knoten k unbekannt. Die Stromdifferenzen in den Gleichungen (2-17) und (2-18) werden somit folgendermaßen berechnet:

$$\Delta I_{k,re} = \frac{U_{k,re} \cdot \Delta P_k}{\underline{U}_k^2} \tag{2-20}$$

$$\Delta I_{k,im} = \frac{U_{k,im} \cdot \Delta P_k}{\underline{U}_k^2} \tag{2-21}$$

Weiters gilt für PV – Knoten  $\Delta V_k = 0$ . Somit muss eine zusätzliche Gleichung für  $\Delta Q_k$  eingefügt werden. Diese Formulierungen sind in [3] zu finden.

#### 2.2 Theorie der Modellierung eines UPFC

Im Folgenden wurden der Aufbau und die Modellbeschreibung, samt den mathematischen Herleitungen, aus [5], [1], [2], [6] und [7] entnommen.

Der UPFC (Unified Power Flow Controller) gehört zur Gruppe der FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems), welche bereits ausführlich in diversen Literaturen beschrieben sind. Der UPFC ist einer der wichtigsten Bauteile dieser Gruppe, da man mit diesem den Lastfluss einer Leitung steuern kann, sowie die Spannung oder die Blindleistungseinspeisung an seinem Einsatzort. [5]

Im Folgenden wird der Aufbau, sowie die Funktionsweise und das verwendete Modell des UPFC beschrieben, welches in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommt.

#### 2.2.1 Aufbau

In der folgenden Abbildung 2.1 ist der schematische Aufbau eines UPFC dargestellt. Im Prinzip besteht dieser elektronische Schrägregler aus einem seriellen und einem parallelen Teil. Der serielle Part besteht wiederum aus einem Spannungsserienumrichter und einem Serientransformator, welcher die Kopplung zum Übertragungsnetz herstellt. Der parallele Part beinhaltet einen Spannungsparallelumrichter und einem Paralleltransformator, der wiederum die Kopplung zum sind Netzknoten k herstellt. Diese beiden Umrichter mit einem gemeinsamen Gleichspannungszwischenkreis und einem Kondensator miteinander verbunden. Beide Umrichter haben einen eigenen PWM- (Pulsweitenmodulations-) Regler.



Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines UPFC

Der Serientransformator speist eine Zusatzspannung  $\Delta \underline{U}_s$  mit beliebiger Amplitude und Phasenlage in das System ein, um den Lastfluss (Wirk- und Blindleistung) der Übertragungsleitung zu steuern. Abhängig von dieser Zusatzspannung und dem Laststrom  $\underline{I}_{km}$  kommt es zum Wirkleistungsaustausch über den Gleichspannungszwischenkreis. Diese eingespeiste Wirkleistung des UPFC in das Netz wird in Wirklichkeit über den Paralleltransformator vom Netz bezogen. Die Wirkleistungsaufnahme des

UPFC aus dem Netz entspricht also nur den Verlusten der Umrichter und ihren Transformatoren. Die Blindleistung kann beliebig vom Serienumrichter aus dem Netz bezogen und eingespeist werden, wobei diese durch die Nennleistungen des UPFC limitiert sind. Für den Blindleistungsaustausch des Parallelumrichters gilt dasselbe und diese kann zur Spannungsregelung am Anschlussknoten *k* benutzt werden.

#### 2.2.2 Ersatzschalbild

In der folgenden Abbildung 2.2 ist das Ersatzschaltbild des UPFC mit einer Übertragungsleitung zwischen den Knoten *k* und /dargestellt. Der UPFC wird nahe am Knoten *k* platziert und ein zusätzlicher Hilfsknoten *m* als Referenzpunkt wird benötigt, an dem die Scheinleistung <u>S</u><sub>sp</sub> und somit der Lastfluss auf einen bestimmten Wert, innerhalb der UPFC Leistungsgrenzen, geregelt werden kann. Zusätzlich kann die Spannung <u>U</u><sub>k</sub> am Knoten *k* auf einen bestimmten Wert gehalten werden.



Abbildung 2.2: Ersatzschaltbild eines UPFC mit Übertragungsleitung

Der Serienspannungsumrichter mit dem Serientransformator können als ideale Spannungsquelle  $\underline{U}_s$  mit der zugehörigen Transformatorimpedanz  $\underline{Z}_s$  dargestellt werden. Gleiches gilt für den parallelen Part mit der idealen Spannungsquelle  $\underline{U}_p$  und der Transformatorimpedanz  $\underline{Z}_p$ . Wie bereits erwähnt muss der Wirkleistungsbedarf des parallelen Zweiges den des seriellen Zweiges, abgesehen von den Verlusten, entsprechen. Dies wird im Folgenden näher erläutert.

#### 2.2.3 Modell des UPFC

Prinzipiell kann das Modell des UPFC aus einem SSSC (Static Synchronous Series Compensator) auf der seriellen Seite und einem STATCOM (Static Synchronous Compensator) auf der parallelen Seite betrachtet werden. Im Folgenden werden diese beiden Modelle beschrieben, damit der UPFC in die NR – CIM Lastflussberechnung nach Abschnitt 2.1 eingebaut werden kann.

#### 2.2.3.1 Modell des Serienumrichters (SSSC)

Durch die eingespeiste komplexe Spannung  $\underline{U}_{s}$  kann die komplexe Scheinleistung  $\underline{S}_{sp}$  und damit die Wirk- bzw. Blindleistung am Knoten *m* geregelt werden. Diese Serienspannungsquelle kann im ersten Schritt in eine Stromquelle  $\underline{I}_{s}$  mit der parallelen Transformatorimpedanz  $\underline{Z}_{s}$ , wie in Abbildung 2.3 dargestellt, umgewandelt werden. Der Strom  $\underline{I}_{s}$  kann folgendermaßen berechnet werden:



Abbildung 2.3: Darstellung des Serienumrichters mit Stromquelle

Durch Umwandlung dieser Stromquelle zwischen den Knoten k und m in die Knotenströme an den Knoten k und m ergibt sich folgende Abbildung 2.4.



Abbildung 2.4: Darstellung des Serienumrichters mit Knotenströme

Durch Anwendung der Knotenregel in Abbildung 2.4 ergibt sich der Strom <u>Is</u> zu:

$$\underline{I}_{s} = \underline{I}_{sp} - \underline{I}_{km} \tag{2-23}$$

Daraus ergibt sich weiters:

$$\underline{I}_{s} = \left(\frac{\underline{S}_{sp}}{\underline{U}_{m}}\right)^{*} - \left(\frac{\underline{U}_{k} - \underline{U}_{m}}{\underline{Z}_{s}}\right)$$
(2-24)

$$\underline{S}_{sp} = P_{sp} + jQ_{sp} \tag{2-25}$$

Mit Einsetzen von (2-25) in (2-24) ergibt sich folgende Formel für den Strom Is:

$$\underline{I}_{s} = \left(\frac{P_{sp} + jQ_{sp}}{\underline{U}_{m}}\right)^{*} - \left(\frac{\underline{U}_{k} - \underline{U}_{m}}{\underline{Z}_{s}}\right)$$
(2-26)

Dabei ist  $P_{sp}$  die eingestellte Wirkleistung und  $Q_{sp}$  die eingestellte Blindleistung am Knoten *m*. Weiters gelten folgende Gleichungen:

$$\underline{U}_k = U_{k,re} + jU_{k,im} \tag{2-27}$$

$$\underline{Z}_s = R_s + jX_s \tag{2-28}$$

.

.

Durch Einsetzen von Real- und Imaginärteil der Spannung (2-27) und Real- und Imaginärteil der Trafoimpedanz (2-28) in (2-25) und einige Umformungen, kann der eingespeiste Strom <u>I</u>s ebenfalls mit seinem Real- und Imaginärteil durch folgende Formeln berechnet werden:

$$I_{s,re} = \frac{P_{sp} \cdot U_{m,re} + Q_{sp} \cdot U_{m,im}}{\underline{U}_{m}^{2}} - \frac{R_{s} \cdot (U_{k,re} - U_{m,re}) + X_{s} \cdot (U_{k,im} - U_{m,im})}{\underline{Z}_{s}^{2}}$$
(2-29)  
$$I_{s,im} = \frac{P_{sp} \cdot U_{m,im} - Q_{sp} \cdot U_{m,re}}{\underline{U}_{m}^{2}} - \frac{R_{s} \cdot (U_{k,im} - U_{m,im}) - X_{s} \cdot (U_{k,re} - U_{m,re})}{\underline{Z}_{s}^{2}}$$
(2-30)

Wie aus Abbildung 2.4 ersichtlich ist, werden diese Ströme an den Knoten k und am Hilfsknoten m mit unterschiedlichen Vorzeichen eingespeist. Durch Anwendung der Gleichungen (2-6) und (2-7) aus dem Abschnitt der Lastflussberechnung in 2.1, ergibt sich am Knoten k die Stromdifferenzgleichung folgendermaßen:

$$\Delta I_{k,re} = I_{k,re}^{sp} - I_{k,re}^{calc} - I_{s,re}$$
(2-31)

$$\Delta I_{k,im} = I_{k,im}^{sp} - I_{k,im}^{calc} - I_{s,im}$$
(2-32)

Am Hilfsknoten *m* ergibt sich die Gleichung, mit positivem Vorzeichen der Ströme, folgendermaßen:

$$\Delta I_{m,re} = I_{m,re}^{sp} - I_{m,re}^{calc} + I_{s,re}$$
(2-33)

$$\Delta I_{m,im} = I_{m,im}^{sp} - I_{m,im}^{calc} + I_{s,im}$$
(2-34)

#### 2.2.3.2 Modell des Parallelumrichters (STATCOM)

Die Ersatzschaltung des Parallelumrichters des UPFC ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Am Knoten k wird eine komplexe Scheinleistung <u>S</u><sub>p</sub> in das Übertragungsnetz eingespeist.



Abbildung 2.5: Ersatzschaltbild des Parallelumrichters

Wie bereits erwähnt, bezieht oder injiziert der UPFC keine Wirkleistung. Der Parallelumrichter wird somit im Wesentlichen als Phasenschieber betrachtet (mit P = 0), siehe Abbildung 2.6. Mit der Blindleistung  $Q_p$  kann die Spannung <u>U</u><sub>k</sub> auf einem bestimmten Wert gehalten werden und der Knoten *k* kann als PV – Knoten betrachtet werden.



Abbildung 2.6: Darstellung des Parallelumrichters als Phasenschieber

Am Knoten k wird die Wirkleistung  $P_p$  des Parallelumrichters als Last modelliert. Aus der Tatsache, dass die Wirkleistungsbilanz des UFPFC ausgeglichen sein muss, folgt die Gleichung:

$$P_{austausch} = P_s + P_p = 0 \tag{2-35}$$

Der Parallelumrichter muss also die Wirkleistung  $P_s$  für den Serienumrichter bereitstellen, siehe Abbildung 2.6 und Abbildung 2.2. Daraus folgt:

$$P_p = -P_s \tag{2-36}$$

Die durch den seriellen Part eingespeiste Wirkleistung ergibt sich zu:

$$P_{s} = Re\left[\underline{U}_{s} \cdot \left(\frac{\underline{S}_{sp}}{\underline{U}_{m}}\right)^{*}\right]$$
(2-37)

Aus der Gleichung (2-24) und (2-22) ergibt sich:

$$\underline{U}_{s} = \underline{U}_{m} - \underline{U}_{k} + \underline{Z}_{s} \cdot \left(\frac{\underline{S}_{sp}}{\underline{U}_{m}}\right)^{*}$$
(2-38)

Durch Substituieren von (2-38) in (2-37) erhält man:

$$P_{s} = Re\left[\underline{U}_{s} \cdot \left(\frac{\underline{U}_{k} + \underline{U}_{s} - \underline{U}_{m}}{\underline{Z}_{s}}\right)^{*}\right]$$
(2-39)

Aus der Abbildung 2.6 folgt für den Strom <u>h</u> des Parallelumrichters:

$$\underline{I}_{p} = \left(\frac{P_{p} + j0}{\underline{U}_{k}}\right)^{*}$$
(2-40)

Somit ergibt sich der eingespeiste Strom <u>Ip</u> am Knoten k aus Real- und Imaginärteil folgendermaßen:

$$I_{p,re} = \frac{U_{k,re} \cdot P_p}{\underline{U}_k^2} \tag{2-41}$$

$$I_{p,im} = \frac{U_{k,im} \cdot P_p}{\underline{U}_k^2}$$
(2-42)

#### 2.2.3.3 Berechnung der UPFC Parameter

Die Parameter des Serien- und Parallelumrichters des UPFC werden während des iterativen Prozesses in jedem Schritt bestimmt und in die NR – CIM Lastflussberechnung nach 2.1 miteinbezogen. Dies beninhaltet die berechneten Ströme, die Knotenspannungen und die Impedanz des UPFC.

Die eingespeiste Serienspannung  $\underline{U}_{s}$  des UPFC ergibt sich zu:

$$\underline{U}_{s} = \underline{I}_{s} \cdot \underline{Z}_{s} \tag{2-43}$$

Mit dem Absolutbetrag Us:

$$U_s = \left|\underline{U}_s\right| = \sqrt{U_{s,re}^2 + U_{s,im}^2} \tag{2-44}$$

und dem Winkel der Spannung  $\varphi_s$ :

$$\phi_s = \tan^{-1} \left( \frac{U_{s,im}}{U_{s,re}} \right) \tag{2-45}$$

Durch Verwendung der Maschengleichung erhält man die Spannung des Parallelumrichters Up:

$$\underline{U}_{p} = \underline{U}_{k} + \underline{Z}_{p} \cdot \left(\frac{\underline{S}_{p}}{\underline{U}_{k}}\right)^{*}$$
(2-46)

mit:

$$\underline{S}_p = P_p + jQ_p \tag{2-47}$$

wobei Q<sub>p</sub> folgendermaßen berechnet wird:

$$Q_p = \sum_{i=1}^{n} \left| \underline{U}_k \right| \cdot \left| \underline{U}_i \right| \cdot (G_{ki} \cdot \sin \delta_{ki} - B_{ki} \cdot \cos \delta_{ki}) + Q_{L,n}$$
(2-48)

# 2.3 Implementierung des UPFC - Modells in die Lastflussberechnung (NR – CIM)

#### [5], [1], [2], [6]

Für den Lösungsalgorithmus werden die hergeleiteten Modelle aus den Ersatzschaltbildern des Serienund Parallelumrichters des UPFC aus Abschnitt 2.2 kombiniert und in die Lastflussberechnung (NR – CIM) nach 2.1 implementiert. Im Vergleich zu der konventionellen AC – Lastflussrechnung [8], welche durch die Leistungsdifferenzen an den Knoten beschrieben wird, ist die NR – CIM – Methode wesentlich schneller. Der Hauptgrund liegt darin, dass die meisten Elemente der Jakobi – Matrix nicht iterativ verändert werden müssen, abgesehen von Last- und Generatorknoten. Diese Elemente bleiben gleich; wie die der Admittanzmatrix. Wie bereits erwähnt, werden alle PQ– und PV – Knoten durch zwei Gleichungen beschrieben, den Real- und Imaginärteil der Ströme. Bei den PV – Knoten wird eine zusätzliche Gleichung für die Spannungsdifferenzen eingefügt.

Somit können das UPFC – Model ohne Änderung Jakobi – Matrix in die Lastflussberechnung implementiert werden, durch einfügen der zusätzlich eingespeisten Ströme an den Knoten k und m des UPFC. Dabei wird der Strom  $\underline{I}_s$  des Serienumrichters wie in Abschnitt 2.2.3.1 in Real- und Imaginärteil aufgeteilt. Der Strom  $\underline{I}_p$  des Parallelumrichters wird dabei ebenfalls in diese Komponenten nach Abschnitt 2.2.3.2 aufgeteilt. Die folgenden beiden Gleichungen werden dann an den Knoten des UPFC in die finale NR – CIM Lastflussberechnung in Gleichung (2-8) eingefügt.

Für Knoten k gilt:

$$\Delta I_{k,re} = I_{k,re}^{sp} - I_{k,re}^{calc} - I_{s,re} + I_{p,re}$$
(2-49)

$$\Delta I_{k,im} = I_{k,im}^{sp} - I_{k,im}^{calc} - I_{s,im} + I_{p,im}$$
(2-50)

Für Knoten *m* gilt:

$$\Delta I_{m,re} = I_{m,re}^{sp} - I_{m,re}^{calc} + I_{s,re}$$
(2-51)

$$\Delta I_{m,im} = I_{m,im}^{sp} - I_{m,im}^{calc} + I_{s,im}$$
(2-52)

In den folgenden Abschnitten wird zur besseren Übersichtlichkeit  $P_{sp}$  als  $P_{UPFC}$  und  $Q_{sp}$  als  $Q_{UPFC}$  als bezeichnet.

Der Lösungsalgorithmus ist als Flussdiagramm in der folgenden Abbildung 2.7 dargestellt. Als Erstes werden alle nötigen Netzdaten eingelesen und ein zusätzlicher Hilfsknoten zur Implementierung des UPFC und dessen Transformatorimpedanz Zs eingefügt. Im nächsten Schritt wird die Knotenadmittanzmatrix Y erstellt, sowie alle Spannungen mit den dazugehörigen Winkeln an den einzelnen Netzknoten initialisiert. Dabei wird üblicherweise als Startwert der Betrag der Spannungen mit 1 pu und der Winkel mit 0 Grad angenommen. Durch die Einbindung des UPFC in die Lastflussberechnung, können die Wirkleistung PUPFC und die Blindleistung QUPFC auf der Übertragungsleitung vorgegeben werden, sowie die Spannung  $\underline{U}_k$  am Netzknoten des Parallelumrichters des UPFC. Am Start der Iteration werden die Leistungsdifferenzen  $\Delta P$  und  $\Delta Q$  an den einzelnen Netzknoten berechnet. Diese müssen am Ende der Lastflussberechnungen ausgeglichen sein, sprich nahezu 0 sein. Die Spannungen stellen sich dementsprechend an den Netzknoten ein, entsprechend dieser Bedingung. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, wird die Jakobi - Matrix J, nach Abschnitt 2.1, erstellt und anschließend die entsprechenden Stromdifferenzen aus Real- und Imaginärteil an den Netzknoten unter Einbindung der UPFC Ströme nach Abschnitt 2.2.3 berechnet. Anschließend wird die NR - CIM Lastflussrechnung iterativ gelöst und die Spannungskorrekturen berechnet und für den nächsten Iterationsschritt aktualisiert. Ist die Bedingung für die Leistungsdifferenzen erfüllt, werden die Lastflussergebnisse gespeichert und die finalen UPFC -Parameter nach Abschnitt 2.2.3.3 berechnet. Diese Annahmen gelten nur für einen idealen UPFC, sprich ohne Leistungsbegrenzung. Die für die Arbeit verwendeten Leistungsdaten werden im Folgenden näher erläutert.



Abbildung 2.7: NR - CIM Flussdiagramm mit UPFC - Modell

# 3 Methodik

Im folgenden Kapitel wird auf die verwendeten Testnetze für die Simulation, sowie auf die Implementierung des UPFC in diese eingegangen. Des Weiteren wird die Auswertung der Simulationsdaten in MATLAB erklärt.

### 3.1 Ausgangsnetz ohne UPFC

Als Ausgangsnetz für die folgende Simulationen wurde eine Netzkonfiguration ähnlich wie in [9] und [10] gewählt. In der folgenden Abbildung 3.1 ist das Ausgangsnetz ohne UPFC dargestellt. Dieses Netz stellt das Verhalten von typischen Netzsystemen sehr gut dar, da jede beliebige Netzsituation vereinfacht durch zwei Einspeisungen, die durch zwei parallel verlaufende Leitungen miteinander verbunden sind, reduziert werden kann.



Abbildung 3.1: Ausgangsnetz ohne UPFC

Die Netzkonfiguration besteht aus 4 Netzknoten und einer Bezugsspannung  $U_{\text{B}}$  von 220 kV. Die Bezugsscheinleistung S<sub>B</sub> für die folgenden Simulationen beträgt 100 MVA. Die Impedanzen werden als rein induktiv angenommen, da in Hochspannungsnetzen der ohmsche Anteil der Freileitungen vernachlässigt werden kann. Freileitung 1 und 4 werden mit 0,0055 pu festgelegt. Dies entspricht bei typischen Kennwerten von Freileitungen im Hochspannungsnetz [7] einer Länge von ca. 10 km. Das Netz 1 am Knoten 1 wird dabei als Slack – Knoten modelliert und das Netz 2 am Knoten 4 als Leistungssenke, um einen Leistungstransport von Netz 1 zu Netz 2 zu generieren. Das Hauptaugenmerk liegt auf den beiden parallel verlaufenden Übertragungsleitungen, die den Leistungstransport von Netz 1 zu Netz 2 bewerkstelligen. Diese werden im Ausgangszustand mit 0,2 pu festgelegt, was einer Entfernung von ca. 240km entspricht.

Dieses Ausgangsnetz, mit der Erweiterung der UPFC Impedanz, wird ebenfalls mit verschiedenen Leitungslängen und verschiedenen übertragbaren Gesamtleistungen  $P_{ges}$ , welche in den nächsten Kapiteln näher beschrieben werden, simuliert und mit den Ergebnissen der Netzkonfiguration mit UPFC verglichen. Dabei wird die übertragbare Gesamtleistungen  $P_{ges}$  bei der jeweiligen Netzkonfiguration bis zu ihrem maximal möglichen Betrag erhöht, unter Einhaltung der Spannungsgrenzen an den Netzknoten.

#### 3.2 Implementierung des UPFC im Netz

In diesem Kapitel wird der Einbau des UPFC in ein Übertragungsnetz beschrieben, um die in Abschnitt 1.2 beschriebene Aufgabenstellung zu erfüllen. Dieser Aufbau des Netzes mit UPFC wird in der Simulation der vorliegenden Arbeit mit verschiedenen Variationen verwendet, um die möglichen Betriebspunkte des UPFC bei verschiedenen übertragbaren Leistungen und Netzimpedanzen zu ermitteln und zu vergleichen.

#### 3.2.1 Testnetze mit UPFC

Um die optimalen Betriebspunkte eines UPFC zu bestimmen, wird dieser in das vorher beschriebene Ausgangsnetz implementiert. Dazu wird ein zusätzlicher Hilfsknoten 5, wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, eingefügt. In den folgenden Netzkonfigurationen wird der UPFC zwischen den Netzknoten 2 und 5 eingefügt. Diese beiden Knoten entsprechen den Knoten *k* und *m* aus der Abbildung 2.2. Dadurch kann die Freileitung 3 in den folgenden Simulationen auf die Wirk- und die Blindleistung (*P*<sub>UPFC</sub> und *Q*<sub>UPFC</sub>) geregelt werden. Der UPFC wird dabei mit einer Nennscheinleistung *S*<sub>N,UPFC</sub> von 300 MVA angenommen. Die Transformatorimpedanz  $\underline{Z}_s$  wird im Folgenden als rein induktiv angenommen und mit X<sub>UPFC</sub> = 0,1 pu festgelegt. Diese UPFC Transformatorimpedanz muss für die Lastflussrechnung in das Bezugssystem mit *S*<sub>B</sub> = 100 MVA umgerechnet werden. Daraus ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\tilde{X}_{UPFC} = X_{UPFC} \cdot \frac{U_{N,UPFC}^2}{S_{N,UPFC}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0,1pu \cdot \frac{220kV^2}{300MVA} \cdot \frac{100MVA}{220kV^2} = 0,033pu$$
(3-1)

Aus den folgenden Abbildungen Abbildung 3.2, Abbildung 3.3, Abbildung 3.4 und unter Verwendung von (2-24) erhält man die finale Formel für den vom UPFC eingespeisten Knotenstrom <u>I</u>s für den seriellen Umrichter:

$$\underline{I}_{s} = \left(\frac{P_{UPFC} + jQ_{UPFC}}{\underline{U}_{5}}\right)^{*} - \left(\frac{\underline{U}_{2} - \underline{U}_{5}}{X_{UPFC}}\right)$$
(3-2)

Da die Transformatorimpedanz für die Simulation als rein induktiv angenommen wird, folgt aus Gleichung (2-29) und (2-30):

$$I_{s,re} = \frac{P_{UPFC} \cdot U_{5,re} + Q_{UPFC} \cdot U_{5,im}}{\underline{U}_{5}^{2}} - \frac{(U_{2,im} - U_{5,im})}{X_{UPFC}}$$
(3-3)

$$I_{s,im} = \frac{P_{UPFC} \cdot U_{5,im} - Q_{UPFC} \cdot U_{5,re}}{\underline{U}_{5}^{2}} + \frac{(U_{2,re} - U_{5,re})}{X_{UPFC}}$$
(3-4)

Für den vom parallelen Umrichter eingespeisten Strom folgt aus Gleichung (2-41) und (2-42):

$$I_{p,re} = \frac{U_{2,re} \cdot P_p}{\underline{U}_2^2} \tag{3-5}$$

$$I_{p,im} = \frac{U_{2,im} \cdot P_p}{\underline{U}_2^2}$$
(3-6)

Der implementierte UPFC im Testnetz wird in verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Leitungslängen der parallel verlaufenden Freileitungen simuliert, um verschiedene Netzzustände abzudecken. Draus werden für die jeweilige Netzkonfiguration die optimalen Betriebspunkte des UPFC bei verschiedenen übertragbaren Gesamtleistungen ermittelt. Die übertragene Gesamtleistung über diesen Korridor soll dabei maximiert werden unter Einhaltung des Spannungsbandes an den Netzknoten (0,9 pu bis 1,1 pu) und bei den geringsten Verlusten.

Dabei handelt es sich um die folgenden 3 Szenarien:

- Szenario 1: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.2 pu
- Szenario 2: FRL 2 = 0,1 pu und FRL 3 = 0.2 pu
- Szenario 3: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.1 pu

Durch diese verschiedenen Szenarien werden bei den Simulationen unterschiedliche Leitungsimpedanzen und dadurch unterschiedliche Leitungslängen der parallel verlaufenden Leitungen erreicht. Dies ist in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

#### 3.2.1.1 Szenario 1: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.2 pu

Die folgende Abbildung 3.2 repräsentiert das Szenario für gleiche Leitungslängen. Dabei hat die Freileitung 2 und 3 dieselbe Länge, welche mit einer Impedanz von 0,2 pu definiert wird. Der UPFC ist zischen Knoten 2 und 5 implementiert und besitzt für die Lastflussberechnung eine Impedanz von  $X_{UPFC}$  = 0,033 pu, bezogen auf die Bezugsleistung von  $S_B$  = 100 MVA.

- Freileitung 2 = 0,2 pu entspricht ca. 240km
- Freileitung 3 = 0,2 pu entspricht ca. 240km



Abbildung 3.2: Testnetz – Szenario 1

Bei diesem Fall mit gleichen Leitungslängen ist es anzunehmen, dass die Lastflüsse sich entsprechend der Impedanzverhältnisse gleich aufteilen. Dieser Fall dient also in erster Linie dazu, das implementierte UPFC - Modell in der NR – CIM Lastflussrechnung zu überprüfen und inwieweit der UPFC die übertragene Gesamtleistung, durch Variation der Blindleistungsregelung, erhöhen kann.

#### 3.2.1.2 Szenario 2: FRL 2 = 0,1 pu und FRL 3 = 0.2 pu

Das Szenario 2, bei dem die Freileitung 3 die doppelte Leitungslänge wie die Freileitung 2 aufweist, ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Dabei wird der UPFC auf der regelbaren Freileitung 3 eingebaut, die die doppelte Länge wie die Freileitung 2 hat.

- Freileitung 2 = 0,1 pu entspricht ca. 120km
- Freileitung 3 = 0,2 pu entspricht ca. 240km



Abbildung 3.3: Testnetz – Szenario 2

#### 3.2.1.3 Szenario 3: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.1 pu

In Abbildung 3.4 ist das Szenario 3, wo die Freileitung 3 mit dem UPFC die halbe Leitungslänge wie die Freileitung 2 aufweist, dargestellt.

- Freileitung 2 = 0,2 pu entspricht ca. 240km
- Freileitung 3 = 0,1 pu entspricht ca. 120km



Abbildung 3.4: Testnetz – Szenario 3

#### 3.2.2 Vorgehensweise der Simulation

Im Folgenden wird der Aufbau der Simulation in MATLAB beschrieben, sowie die Variationsmöglichkeiten des UPFC und dessen Leistungsbegrenzungen berücksichtigt.

#### 3.2.2.1 Variationsmöglichkeiten des UPFC

Wie in der Aufgabenstellung in Abschnitt 1 beschrieben, gibt es verschiedene Optimierungsmöglichkeiten (Optimierungsvariablen) des UPFC, die in der Lastflussteuerung zur Anwendung kommen. In der Folgenden Abbildung 3.5 sin diese Variationsmöglichkeiten dargestellt.



Abbildung 3.5: Variationsmöglichkeiten UPFC

Die zwei entscheidenden Parameter zur Lastflussteuerung sind die vorgegebene Wirkleistung  $P_{UPFC}$  und die Blindleistung  $Q_{UPFC}$  am "Ausgang" des UPFC. Diese sind abhängig von den maximal möglichen Leistungen  $P_s$  und  $Q_s$  des Serienumrichters, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden. Durch die

Bedingung aus Gleichung (2-36), dass der Parallelumrichter die Wirkleistung des Serienumrichters bereitstellen muss, und der Annahme eines verlustlosen UPFC folgt:

$$|P_p| = |P_s| \tag{3-7}$$

Für die Simulation wird das Netz 1 als Slack – Knoten implementiert. Aufgrund dessen und der geringen Entfernung bzw. Impedanz der Freileitung 1 von Knoten 1 auf Knoten 2, wie in den vorherigen Abbildungen der Testnetze dargestellt, wird der Knoten 2 des UPFC ebenfalls als PQ – Knoten modelliert. Daher wird auf eine Spannungsregelung des Parallelumrichters bewusst verzichtet, da die Spannung  $\underline{U}_2$  aufgrund der "Nähe" zum Slack – Knoten sich nicht maßgeblich ändern wird, wie bei den Ergebnissen in Abschnitt 4 zu erkennen ist.

Die Blindleistung Q<sub>p</sub> wird in einem Ausmaß eingespeist bzw. entnommen, um die restlichen vorgegeben Bedingungen (Spannungsband und minimale Verluste) und Lastflussvorgaben zu erfüllen. Die Grenze hierfür stellt die Scheinleistungsgrenze des UPFC, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

#### 3.2.2.2 Leistungsbegrenzung des UPFC

#### [1], [7] und [9]

In der vorliegenden Arbeit werden die Simulationen mit einem realen UPFC bewerkstelligt. Das heißt der Serientransformator mit seinem Umrichter und der Paralleltransformator mit seinem Umrichter unterliegen einer Begrenzung. Die Scheinleistungsabgabe bzw. Aufnahme ist somit nur begrenzt möglich und muss bei der Simulation der Lastflussrechnung entsprechend berücksichtig werden. Die folgenden Gleichungen beschreiben die Leistungsbegrenzungen des UPFC hinsichtlich seiner Nennleistung  $S_{N,UPFC}$  von 300 MVA: Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass die vom Serienumrichter eingespeisten Leistungen  $P_s$  und  $Q_s$  nicht gleich der eingestellten Leistungen  $P_{UPFC}$  und  $Q_{UPFC}$  auf Freileitung 5 sind.

$$\underline{S}_s = P_s + jQ_s \tag{3-8}$$

$$S_{s} = \sqrt{P_{s}^{2} + Q_{s}^{2}} \le S_{s,max}$$
(3-9)

$$\underline{S}_p = P_p + jQ_p \tag{3-10}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \le S_{p,max}$$
(3-11)

Weiters gilt bereits:

$$|P_p| = |P_s| \tag{3-12}$$

Dadurch ist die vom Serienumrichter eingespeiste Blindleistung  $Q_{UPFC}$  prinzipiell nur von der maximalen Scheinleistung des Serienumrichters  $S_{s,max}$  abhängig. Die eingespeiste Wirkleistung ist jedoch auch von der maximalen Scheinleistung des Parallelumrichters  $S_{p,max}$  abhängig, aufgrund der Beziehung aus (3-12).

Aufgrund der vorher beschriebenen PQ – Regelung am Knoten des Parallelumrichters, besteht noch die Möglichkeit der Blindleistungseinspeisung bis zur maximal möglichen Blindleistung  $Q_{p,max}$ , welche durch folgende Formel begrenzt ist:

$$Q_{p,max} = \pm \sqrt{S_{p,max}^2 - P_p^2}$$
(3-13)

Diese Leistungsgrenzen werden bei der folgenden Simulation stets überprüft und eingehalten, um einen realitätsnahen Betrieb zu ermöglichen.

#### 3.2.2.3 Flussdiagramm der Simulation in MATLAB

Die in Abschnitt 1 definierte Aufgabenstellung zur empirischen Ermittlung der optimalen Betriebspunkte des UPFC benötigt eine Implementierung in der Simulation, bei der alle möglichen Betriebspunkte des UPFC und die übertragene Gesamtleistung *P*<sub>ges</sub> bis zu ihrem Maximalwert "abgefahren" werden. Das in Abbildung 2.7 dargestellte Standardflussdiagramm mit dem implementierten UPFC – Modell in die NR – CIM Lastflussberechnung muss also entsprechend adaptiert werden, um diese Forderungen zu erfüllen. Dese Adaptierungen sind in der folgenden Abbildung 3.6 als Flussdiagramm der Simulation, welche in MATLAB implementiert wurde, zur besseren Übersicht dargestellt.

Das System bzw. die Knotenadmittanzmatrix **Y** muss entsprechend der Netzkonfiguration nach Abschnitt 3.2.1 erstellt werden. Anschließend werden die Wirkleistung  $P_{UPFC}$  und die Blindleistung  $Q_{UPFC}$ des UPFC jeweils von 0 bis zu ihrem Maximalwert in einer Schleife vorgegeben. Dabei wird bei jeder möglichen Kombination die übertragene Gesamtleistung  $P_{ges}$  ebenfalls von 0 bis zu ihrem Maximalwert bei erhöht. Diese Maximalwerte wurden davor empirisch für die jeweilige Netzkonfiguration ermittelt. Um die übertragbare Gesamtleistung  $P_{ges}$  über die parallel verlaufenden Freileitungen 2 und 3 nachzuahmen, wurde das Netz 2 am Knoten 4 als Last dargestellt, um einen Leistungstransport von Netz 1 zu Netz 2 zu erhalten. Diese wurde dann entsprechend erhöht. Bei all diesen Kombinationen dürfen die Leistungsgrenzen des UPFC nicht überschritten werden. Dafür wurden die entsprechenden Bedingungen nach Abschnitt 3.2.2.2 in jedem Schritt der Simulationen berücksichtigt.

Für jede dieser Kombinationen wird die NR – CIM Lastflussberechnung, welche bereits in Abschnitt 2.3 erläutert wurde, durchgeführt und anschließend alle Ergebnisse in diversen Cell – Arrays gespeichert, für die weitere Auswertung. Damit erhält man für den möglichen Betriebsbereich jeder Netzkonfiguration ein 3D – Bild, welche in Abschnitt 4 dargestellt sind.

Diese Simulationen wurden für alle 3 Netzkonfigurationen durchgeführt und die entsprechenden Ergebnisse sind in Abschnitt 4.4 dargestellt.



Abbildung 3.6: Flussdiagramm der Simulation in MATLAB

#### 3.2.3 Vorgehensweise der Auswertung

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Auswertung der Ergebnisse aus den Simulationen, welche in Abschnitt 3.2.2.3 beschrieben wurden, erläutert. Der Ablauf dafür ist für alle 3 Fälle der Leitungslängen identisch. Das bereits erwähnte Ziel ist es, die übertragbare Gesamtleistung  $P_{ges}$  zu maximieren und gleichzeitig bei vorgegebenen PQ – Einstellungen des UPFC die übertragenen Verluste  $P_v$  im Gesamtsystem, sprich über Freileitung 2 und 3, zu minimieren. Gleichzeitig sollen die Spannungsgrenzen (0,9 pu bis 1,1 pu) an allen Knoten zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden.

#### 3.2.3.1 Betriebsbereich

Um diese Punkte zu erhalten, muss der gesamte Betriebsbereich jeder Netzkonfiguration dargestellt werden. Aus diesen werden im ersten Schritt alle Punkte, bei denen eine Spannungsbandverletzung an den Knoten auftritt, entfernt und in einem extra Diagramm dargestellt. Aus diesen Betriebsbereichen folgt die weitere Auswertung der Daten.

#### 3.2.3.2 Maximal übertragbare Leistung Pges,max

Zum Erhalt der maximal übertragbaren Gesamtleistung  $P_{ges,max}$  wird diese in Kurvenschar – Plots als Funktion über die Wirkleistung  $P_{UPFC}$  bei verschiedenen Blindleistungen  $Q_{UPFC}$  des UPFC dargestellt. Dabei erhält man für jede PQ – Parameter – Kombination des UPFC die maximal übertragbare Leistung über das Gesamtsystem. Diese Punkte wurden für den gesamten Spannungsbereich, sowie innerhalb des Spannungsbereiches dargestellt, um bestimmte Spannungs- bzw. Leistungsgrenzen in den Diagrammen zu erkennen und darzustellen.

#### 3.2.3.3 Gesamtverluste P<sub>v,ges</sub>

Für den Erhalt der optimalsten Betriebspunkte des UPFC bei einer bestimmten übertragbaren Gesamtleistung  $P_{ges}$  werden für jeden Betriebspunkt die Gesamtverluste  $P_{v,ges}$  der parallel verlaufenden Freileitungen berechnet, welche mit 10 Prozent der induktiven Leitungen angenommen werden. Diese sind als sogenannte Contour – Plots, welche den Schnitt durch den als 3D – Plot dargestellten Betriebsbereich bei einer bestimmten übertragenen Gesamtleistung  $P_{ges}$ , farblich dargestellt.

#### 3.2.3.4 Optimale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten Pv,ges

Durch die erhaltenen Gesamtverluste  $P_{v,ges}$  für den gesamten Betriebsbereich, kann in einer Schleifenabfrage für jeden Wert der übertragenen Gesamtleistung von 0 bis zu ihrem Maximalwert die PQ – Einstellung des UPFC gefunden werden, wo diese am minimalsten sind. Dadurch erhält man für jeden Betriebsfall die optimalen Betriebspunkte des UPFC, unter Einhaltung der Spannungsgrenzen.

# 4 Simulationsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung der Simulationen, welche bereits in Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 erläutert wurden, dargestellt und verglichen. Diese werden anschließend mit den Ergebnissen ohne UPFC – Regelung verglichen.

Die Ergebnisse sind für alle 3 Fälle, welche in Abschnitt 3.2.1 dargestellt sind, gezeigt:

- Szenario 1: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.2 pu
- Szenario 2: FRL 2 = 0,1 pu und FRL 3 = 0.2 pu
- Szenario 3: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.1 pu

#### 4.1 Szenario 1: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.2 pu

Die folgenden Diagramme beziehen sich auf die Netzkonfiguration in Abbildung 3.2 mit den dort beschriebenen Parametern für gleiche Leitungslängen der parallel verlaufenen Freileitungen 2 und 3.

#### 4.1.1 Betriebsbereich

Abbildung 4.1 zeigt den Betriebsbereich des gesamten Spannungsbandes der Netzkonfiguration mit gleichen Leitungslängen. Dieser wird als 3D – Plot dargestellt, um das Volumen besser zu repräsentieren. Dabei wird auf der x - Achse die eingestellte Wirkleistung  $P_{UPFC}$  und auf der y – Achse die eingestellte Blindleistung  $Q_{UPFC}$  des UPFC auf Freileitung 3 aufgetragen. Auf der z – Achse wird die übertragene Gesamtleistung  $P_{ges}$  von Freileitung 2 und 3 dargestellt. Diese repräsentiert den Leistungstransport von Netz 1 zum Netz 2. Bei diesem Volumen werden alle minimalen und maximalen Gesamtleistungswerte jeder möglichen PQ – Kombination des UPFC als farbliche Fläche dargestellt. Alle Punkte zwischen den Flächen repräsentieren alle anderen möglichen Werte der zu übertragenen Gesamtleistung  $P_{ges}$ .

Der Maximalwert der übertragenen Gesamtleistung *P*<sub>ges,max</sub> beträgt 395MW bei dieser Netzkonfiguration. Es ist zu erkennen, dass das Volumen nach oben, also zu höheren Leistungen, kleiner wird, was auch zu erwarten war. Aus diesem Betriebsbereich werden nun alle weiteren Daten zur Optimierung ausgewertet.


Abbildung 4.1: Betriebsbereich - Szenario 1 - gesamter Spannungsbereich

In der folgenden Abbildung 4.2 ist der Betriebsbereich innerhalb des Spannungsbandes dargestellt. Dabei werden nur die möglichen Punkte dargestellt, bei denen alle Netzknoten innerhalb der Grenze von 0,9 pu bis 1,1 pu der Bemessungsspannung  $U_b$  von 220 kV liegen. Auf den Achsen sind dieselben Paramater aufgetragen wie bei Abbildung 4.1 bereits beschrieben wurde.

Im ersten Moment ist es noch nicht zu erkennen, dass die Spannungsbegrenzungen eine Auswirkung auf das Volumen haben, da der Maximalwert von  $P_{ges}$  den gleichen Wert besitzt wie beim gesamten Spannungsbereich. Jedoch sind im höheren Bereich der Gesamtleistung weniger PQ – Kombination möglich. Diese sind in den folgenden Abbildungen besser ersichtlich.



Abbildung 4.2: Betriebsbereich - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband

#### 4.1.2 Maximal übertragbare Leistung Pges,max

In den folgenden beiden Abbildungen ist die maximal übertragbare Gesamtleistung  $P_{\text{ges,max}}$  bei bestimmten PQ – Parameter – Kombination des UPFC dargestellt. Das heißt, für jede dieser möglichen Kombination aus  $P_{\text{UPFC}}$  und  $Q_{\text{UPFC}}$  des UPFC wird der Maximalwert  $P_{\text{ges,max}}$  aufgetragen.  $P_{\text{ges,max}}$  wird dabei in Kurvenschar – Plots als Funktion über die Wirkleistung  $P_{\text{UPFC}}$  bei verschiedenen Blindleistungen  $Q_{\text{UPFC}}$  des UPFC dargestellt. In Abbildung 4.3 ist der gesamte Spannungsbereich dargestellt und in Abbildung 4.4 der Bereich innerhalb des Spannungsbandes (0,9 pu bis 1,1 pu) mit eingezeichneten Grenzen, die im Folgenden näher betrachtet werden.

Zur näheren Betrachtung wird die gelbe Kurve bei  $Q_{UPFC}$  von 50MVAr herangezogen. Betrachtet man den gesamten Spannungsbereich in Abbildung 4.3, so ist für diese Kurve für kleinere Wirkleistungen  $P_{UPFC}$  von unter 40 MW auf Freileitung 3 die Serienspannung  $U_{s,max}$  von 0,3 pu des UPFC die Grenze. Vergleicht man diesen Bereich mit dem Spannungsband in Abbildung 4.4, so ist die Grenze bereits bei Werten um 50MW für  $P_{UPFC}$  erreicht, da bei kleineren Werten Die Spannung  $U_5$  am Netzknoten 5, an dem der UPFC die Leistungen regelt, über die Grenze von 1,1 pu ansteigen würde. Der Grund hierfür liegt darin, dass für kleinere Wirkleistungstransporte auf dieser Leistung, bei gleichbleibenden Blindleistungstransport, die Spannung an diesem Knoten zu sehr ansteigen würde. Im Bereich der höchsten übertragbaren Wirkleistungen  $P_{ges,max}$  von 340 MW bei dieser Kurve von  $Q_{UPFC}$  von 50 MVAr bildet die Konvergenzgrenze der Lastflussberechnung die Grenze auf den gesamten Spannungsbereich betrachtet. Im Vergleich dazu ist innerhalb des Spannungsbandes der Wert von  $P_{ges,max}$  bereits bei 320MW erreicht. Die Grenze bildet hierbei die Spannung  $U_4$  am Netzknoten 4, da diese unter den Wert von 0,9 pu fallen würde bei höheren übertragenen Leistungen. Werden die Leistungen *P*<sub>UPFC</sub> auf Freileitungen weiter erhöht, so verringert sich die maximal übertragbare Leistung *P*<sub>ges,max</sub> wieder, aufgrund der Aufteilung der Impedanzverhältnisse der parallelen Freileitungen. Diese Verringerung geht so weit, bis die Konvergenzgrenze erreicht ist, wie in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt ist. Diese erläuterten Grenzen gelten gleichermaßen für alle anderen Kurven mit verschiedenen werten von *Q*<sub>UPFC</sub>. Exemplarisch sind diese für eine Kurve in den Diagrammen dargestellt.

Der absolute Maximalwert  $P_{\text{ges,max}}$  ist in beiden Fällen (gesamter Spannungsbereich, innerhalb Spannungsband) mit 395 MW identisch und nur mit wenigen PQ – Parameter - Kombinationen des UPFC erreichbar, wie in den Abbildungen zu erkennen ist. Jedoch ist innerhalb des Spannungsbandes in Abbildung 4.4 ein Punkt weniger erreichbar, aufgrund der Spannungsgrenze von  $U_4$  von 0,9 pu. Der Maximalwert der Netzkonfiguration mit gleichen Leitungslängen bzw. Leitungsimpedanzen der parallelen Freileitungen wird mit einer eingestellten Blindleistung  $Q_{\text{UPFC}}$  von 110 MVAr und Wirkleistungen  $P_{\text{UPFC}}$  von 180 bis 185 MW erreicht.



Abbildung 4.3: Maximal übertragbare Leistung - Szenario 1 - gesamter Spannungsbereich



Abbildung 4.4: Maximal übertragbare Leistung - Szenario 1 – innerhalb Spannungsband

#### 4.1.3 Gesamtverluste P<sub>v,ges</sub>

Wie in Abschnitt 3.2.3.3 erläutert wurde, werden die Gesamtverluste  $P_{v,ges}$  von beiden parallelen Leitungen als sogenannte Contour – Plots dargestellt. Diese sind in der folgenden Abbildung 4.5 für zwei verschiedene übertragene Leistungen  $P_{ges}$  von 300 MW und 350 MW dargestellt. Im Prinzip wird das 3D – Volumen aus Abschnitt 4.1.1 bei diesen Gesamtleistungen "geschnitten" und farblich mit den Verlusten der beiden Leitungen repräsentiert. Auf der x/y – Achse sind wiederum die Leistungen  $P_{UPFC}$ und  $Q_{UPFC}$  des UPFC aufgetragen. Die beiden oberen Diagramme stellen den gesamten Spannungsbereich (a.S) dar und die beiden unteren den Bereich innerhalb der Spannungsgrenzen (i.S.). Es wird ersichtlich, dass die Flächen, also die möglichen Betriebspunkte des UPFC, zu größeren Werten von  $P_{ges}$  kleiner werden. Dies ist auch schon aus den Diagrammen der vorhergegangen beiden Abschnitten ersichtlich. Die Bestimmung der Verluste im Gesamtsystem ist notwendig, um die optimalen Betriebspunkte des UPFC zu ermitteln, welche im nächsten Abschnitt 4.1.4 dargestellt sind.



Abbildung 4.5: Verluste P<sub>v,ges</sub> bei bestimmten übertragenen Leistungen P<sub>ges</sub>. Szenario 1

#### 4.1.4 Optimale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten Pv,ges

Im folgenden Abschnitt sind die optimalen Betriebspunkte des UPFC repräsentiert. Diese wurden, wie bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, aus den Diagrammen der vorherigen Abschnitte ermittelt. Diese stellen die Betriebspunkte  $P_{UPFC}$  und  $Q_{UPFC}$  bei den minimalsten Verlusten  $P_{v,ges}$  der beiden parallel verlaufenden Freileitungen innerhalb des Spannungsbandes (0,9 pu bis 1,1 pu) dar. Dabei wird die übertragene Gesamtleistung  $P_{ges}$  von 0 bis zu ihrem Maximalwert von 395 MW dargestellt.

In Abbildung 4.6 sind die Wirkleistungen über die gesamte übertragene Wirkleistung  $P_{ges}$  dargestellt. Die rote Kurve repräsentiert die eingestellte Wirkleistung  $P_{UPFC}$  des UPFC auf Freileitung 3 und die blaue Kurve die resultierende Wirkleistung  $P_{23}$  auf der parallel verlaufenden Freileitung 2. Die Wirkleistungsaufteilung bei den geringsten Verlusten ist aufgrund der gleichen Impedanzverhältnisse annähernd gleich, was auch zu erwarten war. Daraus lässt sich zunächst schließen, dass das UPFC – Modell korrekt in die NR -CIM – Lastflussrechnung implementiert worden ist.



Abbildung 4.6: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband

In der folgenden Abbildung 4.7 ist das gleiche Diagramm für die Blindleistungen der Freileitung 2 ( $Q_{UPFC}$  - rot) und Freileitung 3 ( $Q_{23}$  - blau) dargestellt. Diese sind ebenfalls über die Gesamtleistung  $P_{ges}$  aufgetragen. Auf diese Ergebnisse wird in Folge der nächsten Abbildung näher eingegangen.



Abbildung 4.7: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband

Abbildung 4.8 stellt die PV – Kurve der Netzkonfiguration in Szenario 1 mit gleicher Leitungslänge dar. In diesem sind die Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  und  $U_5$  an den jeweiligen Netzknoten über die gesamte übertragene Wirkleistung  $P_{ges}$  dargestellt. Durch diese PV – Kurve wird die Leistungstransportfähigkeit der Netzkonfiguration unter Einhaltung der Spannungsgrenzen überprüft. Zusätzlich wird als rote Kurve die Serienspannung Us des UPFC dargestellt. Würde die UPFC – Regelung deaktiviert werden, würden die Spannungen von Anfang an kontinuierlich sinken, bis die Spannungsgrenze und damit die Leistungstransportgrenze, wie in Abschnitt 4.4 zu sehen ist, erreicht wird. Prinzipiell müsste der UPFC nichts regeln, um die Leistungen gleichmäßig aufzuteilen. Anfangs erhöht der UPFC jedoch seine Blindleistung  $Q_{UPFC}$ , wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, um die Spannung  $U_5$  an seinem Netzknoten zu erhöhen und damit kleinere Ströme bzw. geringere Verluste für bestimmte Wirkleistungen zu erzeugen. Diese Erhöhung der Blindleistung und damit der Spannung wird durch die Einspeisung der Serienspannung  $U_{\rm s}$  bewerkstelligt. Ab einer gewissen Wirkleistungsübertragung  $P_{\rm ges}$  von 200MW steigt jedoch der Blindleistungstransport  $Q_{23}$  auf der parallelen Freileitung 2 in ca. dem gleichen Ausmaß, wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, um den Blindleitungsbedarf an den Netzknoten 3 und 4 abdecken zu können. Da der UPFC bei den Betriebspunkten arbeiten soll, bei denen die Verluste am geringsten sind, wird die Serienspannung nicht noch weiter erhöht. Somit sinkt die Spannung  $U_5$  am Netzknoten 5 und somit auch die Spannung U4 am Netzknoten 4 kontinuierlich bis zum Maximalwert der Leistungsübertragung. Wie in Abbildung 4.8, sowie aus den Abbildungen in Abschnitt 4.1.2, zu erkennen ist, kommt der UPFC nicht an seine Leistungsgrenzen. Die maximale Leistungsübertragung ist durch die Konvergenzgrenze der Netzkonfiguration begrenzt. Der Vergleich zur identischen Netzkonfiguration ohne aktivierte UPFC - Regelung erfolgt in Abschnitt 4.4.



Abbildung 4.8: PV-Kurve - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband

# 4.2 Szenario 2: FRL 2 = 0,1 pu und FRL 3 = 0.2 pu

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für die Netzkonfiguration in Szenario 3, siehe Abbildung 3.3, dargestellt. Dabei hat die Freileitung 3, auf der der UPFC die Leistungen regelt, die doppelte Impedanz von 0,2 pu, während die parallele Freileitung 2 die Impedanz von 0,1 pu aufweist.

Da die Achsenbeschriftungen der folgenden Diagramme identisch sind mit denen aus Abschnitt □, wird auf diesen verwiesen

#### 4.2.1 Betriebsbereich

Die folgende Abbildung 4.9 zeigt den Betriebsbereich des gesamten Spannungsbandes in Szenario 2, der wiederum benötigt wird, um die folgenden Kurven und Diagramme aus dieser Netzkonfiguration zu erhalten. Bei der doppelten leitungslänge beträgt der Maximalwert der übertragbaren Gesamtleistung  $P_{ges} = 620$  MW.



Abbildung 4.9: Betriebsbereich - Szenario 2 - gesamter Spannungsbereich

Aus dem gesamten Spannungsbereich wird wieder der Bereich extrahiert, der innerhalb des erwähnten Spannungsbands von 0,9 pu bis 1,1 pu an den Netzknoten liegt. Dieses Diagramm ist in der folgenden Abbildung 4.10 dargestellt. Liegen die Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  und  $U_5$  an den jeweiligen Netzknoten innerhalb der Grenzen, so verringert sich die maximal übertragbare Gesamtleistung  $P_{ges}$  auf 560 MW. Des Weiteren ist der mögliche Betriebsbereich bei dieser Netzkonfiguration innerhalb des Spannungsbandes stärker eingeschränkt, im Vergleich zum gesamten Spannungsbereich, als bei der Netzkonfiguration mit halber Leitungslänge. Auf diese Grenzen wird im folgenden Abschnitt 4.2.2 näher eingegangen.



Abbildung 4.10: Betriebsbereich - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband

#### 4.2.2 Maximal übertragbare Leistung P<sub>ges,max</sub>

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die maximal übertragene Gesamtleistung  $P_{\text{ges,max}}$  bei der Netzkonfiguration in Szenario 2. Dabei ist bei bestimmten PQ – Parameter – Kombination des UPFC der jeweilige Maximalwert der übertragenen Leistung dargestellt. Es gibt auch Leistungspunkte die kleiner sind und daher darunter liegen, diese sind hier aber nicht dargestellt, sondern in den 3D – Plots in Abschnitt 4.2.1. In Abbildung 4.11 ist die Gesamtwirkleistung  $P_{\text{ges}}$  bei verschiedenen Blindleistungen  $Q_{\text{UPFC}}$  des UPFC für den gesamten Spannungsbereich dargestellt und in Abbildung 4.12 ist nur der Bereich innerhalb des Spannungsbandes (0,9 pu bis 1,1 pu) dargestellt. Betrachtet man den gesamten Spannungsbereich in Abbildung 4.11 näher, so sind die verschiedenen Kurven  $Q_{UPFC}$  auf der "linken" (kleinere Wirkleistungen  $P_{UPFC}$  auf Freileitung 3) und auf der "rechten" (größere Wirkleistungen  $P_{UPFC}$  auf Freileitungen 3) durch die Serienspannung  $U_{s,max}$  des UPFC begrenzt. Das heißt, will man auf diesen Blindleistungskurven kleinere oder größere Wirkleistungen auf dieser besagten Freileitung übertragen, müsste der UPFC eine größere Serienspannung  $U_s > 0,3$  pu einspeisen. Das ist aufgrund seiner Begrenzungen nicht möglich. Im Vergleich dazu ist der gesamte Spannungsbereich bei Szenario 1 in Abbildung 4.3 auf der "rechten" Seite, also für größere Wirkleistungen durch die Konvergenzgrenze begrenzt und nicht durch die Serienspannung  $U_{s,max}$ . Innerhalb dieser beiden Grenzen sind die einzelnen Maximalleistungen  $P_{ges,max}$  durch die Konvergenzgrenze der Netzkonfiguration begrenzt. Der absolute Maximalwert von 620MW könnte jedoch erhöht werden, durch Erhöhung der Serienspannung  $U_s$ .

Vergleicht man nun das Diagramm mit den gesamten Spannungsbereich mit dem Diagramm innerhalb des Spannungsbandes in Abbildung 4.12, so sind die äußeren Grenzen und damit die möglichen Leistungswerte der einzelnen Kurven, durch die Grenze der Serienspannung von  $U_{s,max}$  gleich 0,3 pu identisch. Die Maximalwerte  $P_{ges,max}$  zwischen den beiden Grenzen für die einzelnen PQ – Kombination sind um ein vielfaches kleiner aufgrund der Spannungsgrenze  $U_4$  von 0,9 pu am Netzknoten 4. Der Maximalwert  $P_{ges,max}$  erreicht damit nur noch einen Wert von 560 MW, bei Einhaltung der Spannungsgrenzen, im Vergleich zu den 620 MW im gesamten Spannungsbereich. Im Vergleich zur Netzkonfiguration in Szenario 1, können hier mit mehreren PQ – Parameter – Kombinationen der Maximalwert der übertragenen Leistung erreicht werden.



Abbildung 4.11: Maximal übertragbare Leistung - Szenario 2 - gesamter Spannungsbereich



Abbildung 4.12: Maximal übertragbare Leistung - Szenario 2 – innerhalb Spannungsband

#### 4.2.3 Gesamtverluste P<sub>v,ges</sub>

In der folgenden Abbildung 4.13 sind die Gesamtverluste  $P_{v,ges}$  der beiden parallel verlaufenden Freileitungen 2 und 3 bei bestimmten übertragenen Leistungen  $P_{ges}$  dargestellt. Dabei sind die sind die Diagramme bei  $P_{ges}$  von 400 MW und 500 MW, jeweils über den gesamten Spannungsbereich (a.S.) und innerhalb des Spannungsbandes (i.S.), dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die möglichen Betriebsbereiche, also die möglichen PQ – Parameter – Kombination des UPFC auf der Freileitung 3, zu größeren übertragenen Leistungen  $P_{ges}$  hin abnimmt. Dies geht auch schon aus den vorigen Diagrammen hervor. Diese Verluste werden wiederum von jeden möglichen übertragenen Leistungswert bestimmt, um die optimalen Betriebspunkte des UPFC zu bestimmen, welche im nächsten Abschnitt 4.2.4 repräsentiert sind.



Abbildung 4.13: Verluste P<sub>v,ges</sub> bei bestimmten übertragenen Leistungen P<sub>ges</sub> - Szenario 2

#### 4.2.4 Optimale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten Pv,ges

Die folgenden Diagramme stellen wiederum die optimalen Betriebspunkte, Wirk- und Blindleistung, des UPFC bei allen möglichen übertragen Leistungen für die Netzkonfiguration in Szenario 2 dar. Dabei werden wiederum die PQ – Parameter verwendet, bei denen im Gesamtsystem die geringsten Verluste  $P_{v,ges}$  auftreten. Wie bereits in Abschnitt 4.1.4 erwähnt, werden die Diagramme für die optimalen Betriebspunkte allesamt nur für die möglichen Kombinationen innerhalb des Spannungsbandes repräsentiert.

In Abbildung 4.14 sind die Wirkleistungen der beiden parallel verlaufenden Freileitungen dargestellt. Aufgrund der Impedanzverhältnisse (Leitung 3 gleich 0,2 pu und Leitung 2 gleich 0,1 pu) teilen sich die Wirkleistungen bei den geringsten Verlusten annähernd im selben Verhältnis auf.

In Abbildung 4.15 zeigt die dazugehörigen Blindleistungen dieser beiden Leitungen. Auffallend hier ist, dass sich die Blindleistungen ab einem bestimmten Wert von  $P_{ges}$  ca. 460 MW schneiden und die Blindleistung  $Q_{UPFC}$  einen niedrigeren Wert aufweist, als die Blindleistung  $Q_{23}$  der parallelen Leitung. Dies hat mit damit zu tun, dass die Blindleistung  $Q_{UPFC}$  des UPFC am Anfang stärker ansteigt, um die Spannung  $U_5$  an seinem Netzknoten zu heben, was im nachfolgenden Diagramm der PV- Kurve besser ersichtlich ist. Im Vergleich dazu ist bei der identischen Netzkonfiguration ohne UPFC – Regelung der

Verlauf im Anhang 7.1 dargestellt. Hier steigt von Anfang an die Blindleistungen der Leitung 2 mit geringerer Impedanz im doppelten Verhältnis zur Leitung 3.



Abbildung 4.14: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband



Abbildung 4.15: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - doppelte Leitungslänge - innerhalb Spannungsband

In der folgenden Abbildung 4.16 ist nun die finale PV – Kurve für die optimalen Betriebspunkte des UPFC für Szenario 2 dargestellt. Zusätzlich ist wiederum die Serienspannung  $U_s$  des UPFC eingezeichnet. Wie bereits aus Abschnitt 4.2.2 hervorgeht, kommt der UPFC innerhalb des Spannungsbandes bei den geringsten Verlusten nicht an seine Leistungsgrenzen. Daher erreicht die Serienspannung  $U_s$  auch nicht ihre Grenze von 0,3 pu. Die Begrenzung der maximalen Leistungsübertragung  $P_{ges}$  stellen hierbei die Spannungsgrenzen (0,9 pu bis 1,1 pu) an den Netzknoten dar. Im Speziellen die Spannung  $U_4$  am Netzknoten 4, die bei weiterer Erhöhung der Leistung unter die Grenze von 0,9 pu fallen würde.



Abbildung 4.16: PV-Kurve - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband

### 4.3 Szenario 3: FRL 2 = 0,2 pu und FRL 3 = 0.1 pu

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse für Szenario 3 repräsentiert, welche in Abbildung 3.4 dargestellt ist. Die Leitung 3 mit UPFC weist dabei die halbe Impedanz von 0,1 pu im Vergleich zur parallel verlaufenden Leitung 2 von 0,2 pu auf. Wie aus den folgenden Diagrammen ersichtlich, handelt es sich hierbei um die interessanteste Netzkonfiguration für die Verwendung eines UPFC. Auf dies wird im Folgenden näher eingegangen.

Die Achsenbeschriftungen in den folgenden Diagrammen sind wieder identisch mit denen aus Abschnitt

#### 4.3.1 Betriebsbereich

In Abbildung 4.17 ist der Betriebsbereich der Netzkonfiguration mit halber Leitungslänge am UPFC für den gesamten Spannungsbereich dargestellt. Der Maximalwert der übertragbaren Leistung  $P_{ges}$  erreicht einen Wert von 535 MW.



Abbildung 4.17: Betriebsbereich - Szenario 3 - gesamter Spannungsbereich

In der folgenden Abbildung 4.10 ist der Betriebsbereich innerhalb des Spannungsbandes für die Netzkonfiguration in Szenario 3 dargestellt. Der Maximalwert der übertragenen Leistung  $P_{ges}$  ist mit 535 MW identisch mit dem über den gesamten Bereich. Auch das "Volumen" des Betriebsbereiches in beiden Fällen wirkt nahezu identisch. Daraus lässt sich im ersten Moment schließen, dass bei dieser Netzkonfiguration mit UPFC die Spannungen an den Netzknoten nicht die entscheidende Begrenzung darstellen. Darauf wird in den folgenden Diagrammen näher eingegangen.



Abbildung 4.18: Betriebsbereich - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband

#### 4.3.2 Maximal übertragbare Leistung Pges,max

In diesem Abschnitt werden wieder die maximal übertragenen Gesamtleistungen  $P_{ges,max}$  bei verschiedenen PQ – Parameter – Kombinationen des UPFC dargestellt. Abbildung 4.19 zeigt den gesamten Spannungsbereich und Abbildung 4.20 den Bereich innerhalb des Spannungsbandes, wie bei den Netzkonfigurationen zuvor.

Wie bei den anderen Konfigurationen stellt auch hier die Serienspannung  $U_s$  des UPFC die linke (kleinere  $P_{UPFC}$ ) und rechte (größere  $P_{UPFC}$ ) Grenze auf einer bestimmten Blindleistungskurve  $Q_{UPFC^*}$ , wie in den Abbildungen ersichtlich ist. Diese Aussage gilt für Blindleistungskurven  $Q_{UPFC^*}$ , welche einen höheren Wert als 75 MVAr aufweisen. Bei der Kurve mit 75 MVAr ist im gesamten Spannungsbereich ebenso  $U_s$  die Grenze. Innerhalb des Spannungsbandes ist jedoch die obere Grenze von  $U_5$  ausschlaggebend, wie in Abbildung 4.20 ersichtlich ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Blindleistungstransport auf dieser Leitung für Wirkleistungen kleiner 110 MW zu groß ist und daher die Spannung  $U_5$  am Netzknoten 5 über die 1,1 pu steigen würde. Innerhalb dieser beiden äußeren Grenzen von  $U_s$ , bildet im gesamten Spannungsbereich die Konvergenzgrenze das Limit für die jeweilige maximale Leistung  $P_{\text{ges,max}}$  bei den einzelnen PQ – Kombinationen. Innerhalb des Spannungsbandes liegen diese Werte geringfügig darunter, aufgrund der Spannungsgrenze von  $U_4 < 0.9$  pu. Der absolute Maximalwert  $P_{\text{ges,max}}$  von 535 MW ist in beiden Fällen identisch, was auch schon aus den Betriebsbereich – Diagrammen hervorgeht. Die Grenze für diesen Wert wird durch die Serienspannung  $U_{s,max}$  von 0,3 pu bestimmt und zwar auch innerhalb des Spannungsbandes. Dies ist bei den anderen

Netzkonfigurationen nicht der Fall. Der Grund dafür ist in Abschnitt 4.3.4 besser ersichtlich und es wird hier näher darauf eingegangen.



Abbildung 4.19: Maximal übertragbare Leistung - Szenario 3 - gesamter Spannungsbereich



Abbildung 4.20: Maximal übertragbare Leistung - Szenario 3 – innerhalb Spannungsband

#### 4.3.3 Gesamtverluste P<sub>v,ges</sub>

In Abbildung 4.21 sind wieder repräsentativ die Gesamtverluste  $P_{v,ges}$  der beiden parallelen Leitungen bei bestimmten übertragenen Leistungen  $P_{ges}$  (300MW und 400 MW) dargestellt. Dabei wird wieder jeweils der gesamte Spannungsbereich (a.S.) und der Bereich innerhalb der Spannungsgrenzen (i.S.) gezeigt. Diese Gesamtverluste wurden wieder für jeden möglichen Betriebspunkt bestimmt, welche zur Ermittlung der folgenden Diagramme in Abschnitt 4.3.4 notwendig sind.



Abbildung 4.21: Verluste Pv,ges bei bestimmten übertragenen Leistungen Pges - halbe Leitungslänge

#### 4.3.4 Optimale Betriebspunkte bei minimalen Verlusten Pv,ges

Die folgenden 3 Diagramme stellen, wie bei den Netzkonfigurationen zuvor, die optimalen Betriebspunkte des UPFC in Szenario 3 dar. Dabei wird für jeden möglichen übertragenen Leistungspunkt die beste Einstellung gezeigt. Alle Diagramme sind für Betriebspunkte innerhalb des Spannungsbandes (0,9 pu bis 1,1 pu) an den Netzknoten dargestellt.

Die Abbildung 4.22 ist die Wirkleistung *P*<sub>UPFC</sub> auf Freileitung 3 und die Wirkleistung *P*<sub>23</sub> auf der parallelen Freileitung 2 aufgetragen. Dabei teilen sich anfangs die Wirkleistungen der beiden Leitungen entsprechend der Impedanzverhältnisse, und der Forderung nach den geringsten Verlusten, auf. Um aber die gesamte übertragene Leistung  $P_{ges}$  weiter zu erhöhen, senkt der UPFC auf seiner Leitung die Wirkleistung  $P_{UPFC}$  und im selben Ausmaß steigt die Wirkleistung  $P_{23}$  auf der parallelen Leitung. Wie es dazu kommt, wird anhand der PV – Kurve näher erläutert.



Abbildung 4.22: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband



Abbildung 4.23: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband

Abbildung 4.23 zeigt die dazugehörigen Blindleistungen  $Q_{UPFC}$  und  $Q_{23}$  der beiden Leitungen. Dabei erhöht der UPFC seine Blindleistung  $Q_{UPFC}$  anfangs stärker, währenddessen die Blindleistung  $Q_{23}$  auf der parallelen Leitung sogar leicht sinkt. Im Vergleich dazu ist ohne UPFC – Regelung der Blindleistungsanstieg auf beiden Leitungen annähernd gleich, siehe Abschnitt 7.1.

In der folgenden Abbildung 4.24 ist die dazugehörige PV – Kurve für die Netzkonfiguration in Szenario 3 gezeigt. Zusätzlich ist wiederum die Serienspannung  $U_s$  des UPFC eingezeichnet. Um die Verluste gering zu halten, steigt, wie aus Abbildung 4.23 ersichtlich, die Blindleistung  $Q_{UPFC}$  des UPFC und damit die Spannung  $U_5$  am Netzknoten 5. Da aber ab einen gewissen Wert von  $P_{ges}$  der Blindleistungsbedarf an den Netzknoten 3 und 4 nicht mehr ausreichend gedeckt werden kann, steigt auch die Blindleistung  $Q_{23}$  der parallelen Leitung und die Spannung  $U_5$  am Knoten 5 sinkt wieder. Wie bereits aus den Abbildungen in Abschnitt 4.3.2 ersichtlich, gibt es bei dieser Netzkonfiguration keine Spannungsprobleme an den Netzknoten. Die Spannung  $U_4$  erreicht nicht die untere Grenze von 0,9 pu, wie bei der Netzkonfiguration in Szenario 2. Um die übertragene Leistung weiter zu erhöhen, versucht der UPFC die Serienspannung  $U_5$  zu erhöhen, wie in der PV – Kurve dargestellt. Diese kommt aber bald an ihre Grenze von 0,3 pu und stellt somit die Grenze der Leistungsübertragung für diese Netzkonfiguration dar.



Abbildung 4.24: PV-Kurve - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband

### 4.4 Vergleich mit / ohne UPFC – Regelung

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Netzkonfigurationen für alle 3 Fälle mit UPFC – Regelung mit den Ergebnissen der identischen Netzkonfigurationen ohne UPFC – Regelung verglichen. Diese werden anschließend in Abschnitt 5 diskutiert.

#### 4.4.1 PV – Kurven ohne UPFC – Regelung

Im Folgenden werden die PV – Kurven ohne UPFC – Regelung, aber mit implementierter Transformatorimpedanz, dargestellt. Dabei wurden die Achsen gleich skaliert, wie bei den PV – Kurven mit UPFC Regelung. Daher sind diese Diagramme nicht zur Gänze "ausgefüllt".



Abbildung 4.25: PV-Kurve ohne UPFC Regelung – Szenario 1 - innerhalb Spannungsband

In Abbildung 4.25 ist die PV – Kurve für die Netzkonfiguration für Szenario 1 mit gleichen Leitungslängen / Leitungsimpedanzen dargestellt. Die Spannungen an den Netzknoten fallen ohne UPFC – Regelung kontinuierlich ab und die maximale übertragbare Leistung  $P_{ges,max}$  dieser Konfiguration beträgt 330 MW. Am stärksten fällt die Spannung  $U_4$  am Netzknoten 4. Diese Aussage gilt auch für die nächsten beiden Diagramme bzw. Netzkonfigurationen und daher wird dies nicht extra erwähnt.

Abbildung 4.26 zeigt die PV – Kurve ohne UPFC – Regelung für Szenario 2. Die maximale übertragbare Leistung  $P_{ges,max}$  beträgt hier 480 MW.



Abbildung 4.26: PV-Kurve ohne UPFC Regelung - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband

Abbildung 4.27 zeigt die PV – Kurve ohne UPFC – Regelung für Szenario 3. Die maximale übertragbare Leistung  $P_{\text{ges,max}}$  beträgt hier 430 MW.



Abbildung 4.27: PV-Kurve ohne UPFC Regelung - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband

#### 4.4.2 Maximal übertragbare Leistung Pges,max

In Tabelle 1 werden die gesamten Ergebnisse für die maximale übertragene Gesamtleistung  $P_{ges,max}$  aller Netzkonfigurationen (Szenario 1, Szenario 2, Szenario 3) ohne UPFC – Regelung mit den Ergebnissen mit UPFC – Regelung übersichtlich dargestellt. Diese werden auch jeweils unterteilt in den gesamten Spannungsbereich und in den Bereich innerhalb des Spannungsbandes (0,9 pu bis 1,1 pu) an den Netzknoten. Diese Ergebnisse werden im Folgenden in Abschnitt 5 diskutiert.

		Szenario 1 (FRL 3 = 0,2 pu & FRL 2 = 0,2 pu)			
		ohne UPFC Regelung		mit UPFC Regelung	
		außerhalb U - Band	innerhalb U - Band	außerhalb U - Band	innerhalb U - Band
P <sub>ges,max</sub>	MW	420	330	395	395
		Szenario 2 (FRL 3 = 0,1 pu & FRL 2 = 0,2 pu)			
		ohne UPFC Regelung		mit UPFC Regelung	
		außerhalb U - Band	innerhalb U - Band	außerhalb U - Band	innerhalb U - Band
P <sub>ges,max</sub>	MW	600	480	620	560
		Szenario 3 (FRL 3 = 0,2 pu & FRL 2 = 0,1 pu)			
		ohne UPFC Regelung		mit UPFC Regelung	
		außerhalb U - Band	innerhalb U - Band	außerhalb U - Band	innerhalb U - Band
P <sub>ges,max</sub>	MW	540	430	535	535

Tabelle 1: Ergebnisse der maximal übertragbaren Gesamtleistungen Pges

# 5 Zusammenfassungen und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend wird im folgenden Abschnitt noch einmal auf die einzelnen Themen zurückgeblickt und es wird auf die Ergebnisse der einzelnen Simulationen näher eingegangen.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit war es, die übertragene Leistung über einen Korridor zu maximieren, unter Einhaltung der Spannungsgrenzen (0,9 pu bis 1,1 pu) und Minimierung der Verluste über diesen Korridor. Dabei sollten die optimalen Betriebspunkte des UPFC empirisch ermittelt werden. Dafür wurde in MATLAB die NR - CIM - Lastflussrechnung (Strominjektionsverfahren) implementiert, sowie das dazugehörige UPFC - Modell mittels Knotenströme in diese Berechnung inkludiert. Die Vorgehensweise der Simulationen wurde als Flussdiagramm dargestellt. Anschließend wurde ein Testnetz gewählt, welches den Leistungstransport zweier Energieübertragungsnetze über einen bestimmten Korridor nachstellen sollte. Dabei wurde der UPFC auf einer der beiden "parallelen" Leitungen bei verschiedenen Leitungslängen (Szenario 1, Szenario 2, Szenario 3) eingebaut, um die Auswirkung des UPFC auf die übertragene Leistung zu untersuchen und die optimalen Betriebspunkte für die jeweilige Netzkonfiguration zu ermitteln. Die entscheidenden Parameter zur Lastflusssteuerung mittels UPFC sind dessen Wirkleistung PUPFC und Blindleistung QUPFC auf der nachfolgenden Leitung. Die Spannungsregelung auf der Parallelumrichter - Seite des UPFC spielte bei diesen Netzkonfigurationen keine wesentliche Rolle und wurde daher als PQ - Knoten implementiert. Zusätzlich wurden für die identischen Netzkonfigurationen die maximale übertragene Leistung ohne aktivierter UPFC - Regelung ermittelt.

Vergleicht man für Szenario 1 bei gleichen Leitungslängen, siehe Abbildung 3.2, die erhaltenen Werte für die maximale übertragene Leistung, so erhält man  $P_{ges,max}$  von 330 MW ohne UPFC - Regelung und 395 MW mit UPFC – Regelung innerhalb des Spannungsbandes an den Netzknoten. Es gibt also eine geringfügige Leistungssteigerung um 65 MW, da der UPFC durch die Blindleistungseinspeisung am Knoten 5, die Spannung versucht höher zu halten und somit auch am Knoten 4 anfangs die Spannung anhebt, wie in Abbildung 4.8 zu sehen ist. Die Wirkleistungen an den beiden parallelen Leitungen teilen sich aufgrund der Impedanzverhältnisse und den geringsten Verlusten annähernd gleich auf. Dabei ist zu erkennen, dass der UPFC nicht an seine Leistungsgrenze kommt und die maximale übertragene Leistung  $P_{ges,max}$  der Netzkonfiguration durch die Konvergenzgrenze des Systems begrenzt ist.

Für die Netzkonfiguration in Szenario 2 bei doppelter Leitungslänge an der Leitung des UPFC, siehe Abbildung 3.3, erhält man für  $P_{\text{ges,max}}$  480 MW ohne UPFC – Regelung und 560 MW mit Regelung innerhalb des Spannungsbandes. Betrachtet man die Kurvenschar Plots für die maximal übertragbare

Leistung  $P_{\text{ges,max}}$  bei verschiedenen Blindleistungskurven  $Q_{\text{UPFC}}$  in Abschnitt 4.2.2, so erkennt man, dass die Leistungsübertragung außerhalb des Spannungsbandes erhöht werden kann, jedoch anschließend ihren Maximalwert bei 620 MW erreicht, welcher durch die Leistungsgrenze bzw. die maximale Serienspannung  $U_{\text{s,max}}$  des UPFC mit 0,3 pu begrenzt ist. Die Wirkleistungsaufteilung in Abbildung 4.14 teilt sich wiederum entsprechend der Impedanzverhältnisse und den geringsten Verlusten auf. Der UPFC würde bei dieser Netzkonfiguration nur ohne die Bedingung der Einhaltung des Spannungsbandes von 0,9 pu bis 1,1 pu an seine Leistungsgrenze geraten. Innerhalb dieses Bandes stellen also die Grenzen der Knotenspannungen die Grenze der Maximalleistungsübertragung des Systems dar.

Der zu erwartende interessanteste Fall ist die Netzkonfiguration in Szenario 3, bei der der UPFC bei halber Leitungslänge eingebaut ist, siehe Abbildung 3.4. Dabei steigert sich die übertragene Gesamtleistung  $P_{\text{ges,max}}$  von 430 MW ohne UPFC – Reglung auf 535 MW mit Regelung. In den Kurvenschar – Plots in Abschnitt 4.3.2 ist zu erkennen, dass in- und außerhalb des Spannungsbandes die maximale Serienspannung  $U_{\text{s,max}}$  des UPFC mit 0,3 pu die Grenze für die maximale übertragene Wirkleistung  $P_{\text{ges,max}}$  darstellt. Dies ist auch aus der PV – Kurve mit eingezeichneter Serienspannung  $U_{\text{s}}$ , siehe Abbildung 4.24, zu entnehmen, da die Serienspannung  $U_{\text{s}}$  am Ende von der Gesamtleistung sprunghaft ansteigt. Die Wirkleistungsaufteilung in Abbildung 4.22 erfolgt entsprechend der Impedanzen bis zu dem Wert von ca. 480 MW, welcher leicht über dem Wert ohne Regelung entspricht. Danach versucht der UPFC die Wirkleistung auf seiner Leitung zu reduzieren und somit mehr über die parallele Leitung zu übertragen. Dadurch wird insgesamt gesehen die Leistungsübertragung entsprechend erhöht, bis der UPFC an seine Leistungsgrenze kommt. Die maximale übertragene Leistung  $P_{\text{ges,max}}$  des UPFC begrenzt.

Zusammenfassend erhöht der UPFC in jedem der 3 Fälle der Leitungskonfiguration die übertragene Gesamtwirkleistung durch seine Blindleistungseinspeisung und dadurch verbundene Anhebung der Spannung an den Netzknoten. Bei Szenario 2 mit doppelter Leitungslänge an der Leitung des UPFC hätte ein noch leistungsstärkerer UPFC jedoch keinen Sinn, da die Spannungsgrenzen an den Netzknoten zuvor erreicht sind. Am sinnvollsten ist der Einbau des UPFC bei der halben Leitungslänge, welche im Wesentlichen den "Schwachpunkt" der Schnittstelle von einem System zum anderen darstellt, da hier ansonsten zu viel Leistung übertragen wird. Theoretisch wäre hier die Leistungsübertragung mit einem leistungsstärkeren UPFC erweiterbar. Der Betriebsbereich, also die einstellbaren PQ – Parameter des UPFC, ist am Ende der Leistungsübertragung durch wenige Punkte begrenzt. Bei kleineren Leistungsübertragungen gibt es verschiedene Möglichkeiten der PQ – Einstellungen, welche im Wesentlichen durch die Serienspannung  $U_s$  begrenzt sind. Dies ist in den einzelnen Kurvenschar – Diagrammen erkennbar. Innerhalb dieser Leistungsübertragungen ist es möglich die Betriebspunkte des UPFC zu optimieren. In der vorliegenden Arbeit wurde dies für die geringsten Verluste des Systems bewerkstelligt. Dies wäre aber auch für andere Fälle denkbar und muss für das jeweilige vorliegende Gesamtsystem untersucht werden. Rein technisch betrachtet, ist der Einbau des UPFC bei allen

Leitungsvarianten sinnvoll. Dies muss jedoch mit dem wirtschaftlichen Aspekt der Anforderungen an das Gesamtsystem gegenübergestellt werden.

Schlussfolgernd kann man sagen, um die maximale Leistung in Szenario 1 und 2 zu übertragen, müssen sich die Wirkleistungen entsprechend der Impedanzen der Leitungen aufteilen. In Szenario 3, bei halber Leitungslänge des UPFC, wird die maximale Leistung jedoch bei gleicher Leistungsübertragung an beiden Leitungen erreicht.

Um im gesamten Leistungsübertragungsbereich in Szenario 1 und 2 die geringsten Verluste zu erhalten, sollen sich die Leistungen aufgrund der Impedanzverhältnisse der Leitungen aufteilen. In Szenario 3 erfolgt dies nur bis zu einem gewissen Punkt, an dem der UPFC die Leistung an "seiner" Leitung verringern muss, um die Gesamtleistung weiter zu erhöhen.

Im nächsten Schritt wäre es denkbar den UPFC in verschiedene "reale" Systemkonfigurationen in einer geeigneten Netzberechnungssoftware einzubauen und die Auswirkung der verschieden PQ – Parameter – Einstellungen auf das Gesamtsystem zu untersuchen, um mögliche "Schwachpunkte" des Systems zu erkennen. Aufgrund der bereits stattfindenden und gewünschten Energiewende erfahren diese Art der Steuerungen im Energieübertragungsnetz immer mehr an Bedeutung und können eine wesentliche Rolle spielen, um Leistungsübertragungen von und in verschiedenen Netzen optimal zu bewerkstelligen.

# 6 Literaturverzeichnis

- M. H. Haque and C. M. Yam, "A simple method of solving the controlled load flow problem of a power system in the presence of UPFC," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 55–62, 2003, doi: 10.1016/S0378-7796(02)00211-0.
- [2] S. Kamel, M. Abdel-akher, M. K. El-nemr, and E. Power, "Direct Modeling of UPFC in Newton Raphson Power flow Analysis Based on Current Injections," pp. 769–774, 2010.
- [3] V. M. Da Costa, N. Martins, and J. L. R. Pereira, "Developments in the newton raphson power flow formulation based on current injections," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 19, no. 2, p. 46, 1999.
- [4] V. M. Da Costa, J. L. R. Pereira, and N. Martins, "An augmented Newton-Raphson power flow formulation based on current injections," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 305–312, 2001, doi: 10.1016/S0142-0615(00)00045-4.
- [5] S. Kamel, F. Jurado, and J. A. Peças Lopes, "Comparison of various UPFC models for power flow control," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 243–251, 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2014.11.001.
- [6] S. Kamel, F. Jurado, Z. Chen, M. Abdel-Akher, and M. Ebeed, "Developed generalised unified power flow controller model in the Newton-Raphson power-flow analysis using combined mismatches method," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 9, pp. 2177–2184, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.1247.
- [7] H. Renner, "Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme," 2013, Vorlesungsskriptum der TU Graz.
- [8] P. Schürhuber, "Lastflussrechnung," 2019, Vorlesungsskriptum der TU Graz.
- [9] V. Crastan and D. Westermann, *Elektrische Energieversorgung* 3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [10] P. Kundur, "Power System Stability And Control by Prabha Kundur.pdf," *McGraw-Hill, Inc.* p. 1167, 1994.

# 7 Anhang

# 7.1 Diagramme

In den folgenden Abbildungen sind alle Originaldaten der Simulation und aus diesen die gefitteten Kurven dargestellt. Damit die Simulationen schneller stattfinden wurde in 5 MW - Schritten simuliert und anschließend die gefitteten Werte dargestellt. Weiters sind die vollständigen PV – Kurven über den gesamten Spannungsbereich, sowie die Wirkleistungs- und Blindleistungskurven der parallelen Leitungen innerhalb des Spannungsbandes ohne UPFC – Regelung angehängt.



Abbildung 7.1: PV-Kurve – Szenario 1 - innerhalb Spannungsband - Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.2: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband -Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.3: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband -Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.4: PV-Kurve - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband - Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.5: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband -Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.6: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband -Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.7: PV-Kurve - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband - Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.8: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband -Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.9: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband -Originaldaten + gefittete Daten



Abbildung 7.10: PV-Kurve ohne UPFC Regelung - Szenario 1 - gesamter Spannungsbereich



Abbildung 7.11: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband



Abbildung 7.12: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 1 - innerhalb Spannungsband



Abbildung 7.13: PV-Kurve ohne UPFC Regelung - Szenario 2 - gesamter Spannungsbereich



Abbildung 7.14: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband



Abbildung 7.15: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 2 - innerhalb Spannungsband



Abbildung 7.16: PV-Kurve ohne UPFC Regelung - Szenario 3 - gesamter Spannungsbereich



Abbildung 7.17: Wirkleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband


Abbildung 7.18: Blindleistung über Leitung 2 und 3 - Szenario 3 - innerhalb Spannungsband