

Lastflussregelung im elektrischen Netz

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
TU Graz

Betreuer:

A.o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Herwig Renner

Autor:

Christopher Mittermüller, BSc

Head of Institute: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

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

Graz / Februar 2012



Danksagung

Diese Masterarbeit wurde im Jahr 2011/12 am Institut für Elektrische Anlagen an der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Ich möchte mich bei meinem Betreuer Prof. Renner für die tatkräftige Unterstützung bedanken. Außerdem möchte ich einen besonderen Dank an die KELAG Netz GmbH richten, die mir die Masterarbeit ermöglicht hat und immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

An dieser Stelle auch ein herzliches Dankeschön an meine Familie für die Unterstützung während meines Studiums und meiner Masterarbeit.

Graz, im Februar 2012

Christopher Mittermüller

Abstract

The liberalization of the electricity market has led to take special measures for the electrical power flow to regulate accordingly. This is mainly achieved with regulating transformers. It examines how different regulating transformers work on the various electrical networks. It is also to investigate how different switching states of the network affect the power flow control. The simulations are performed with the network calculation program *NEPLAN*. The modelling of the electrical networks of varying complexity can be simulated from a principle network up to a real network. The load flow simulations are evaluated by using the program *MATLAB* and shown in corresponding graphs. The simulations show that the active power flow is best controlled with a cross regulator or a 60-degree diagonally regulator. The reactive power can be regulated mainly by the longitudinal control. These results depend a lot on the line impedances and are representative only for purely or mainly inductive lines. If the line impedance changes to a more ohmic conductor the respective control angle changes to have the greatest influence on the active and reactive power.

Kurzfassung

Die Liberalisierung des Strommarktes hat zu stärkeren Netzauslastungen geführt, die eine Beeinflussung des elektrischen Lastflusses erfordern. Dies wird vornehmlich mit Regeltransformatoren realisiert. Dabei wird untersucht, wie sich unterschiedliche Regeltransformatoren auf die verschiedenen elektrischen Netze auswirken. Des Weiteren soll untersucht werden wie sich unterschiedliche Schaltzustände des Netzes auf die Lastflussregelung auswirken. Die Simulationen werden mit dem Netzberechnungsprogramm *NEPLAN* durchgeführt. Die Modellierungen der elektrischen Netze werden in unterschiedlicher Komplexität von einem Prinzipnetz bis zu einem realen Netz nachgebildet. Die Lastflusssimulationen werden mit dem Programm *MATLAB* ausgewertet und in entsprechenden Diagrammen dargestellt. Aus den Simulationen geht hervor, dass der Wirkleistungsfluss am besten mit einer Quer- oder 60°-Schrägregelung regelbar ist. Die Blindleistung lässt sich wiederum vornehmlich durch die Längsregelung beeinflussen. Diese Ergebnisse hängen allerdings stark von den Leitungsimpedanzen ab und sind nur für rein oder mehrheitlich induktive Leitungen repräsentativ. Ändert sich die Leitungsimpedanz zu einer eher ohmschen Leitung, so ändert sich auch der jeweilige Spannungswinkel, welcher den größten Einfluss auf die Wirk- und Blindleistung hat.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources or resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Eidesstattliche Erklärung

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

Ort

Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 2 |
| I. Theorie der Lastflussregelung im elektrischen Netz | 4 |
| 2. Modellierung der Netzkomponenten | 5 |
| 2.1. Netzstruktur | 5 |
| 2.2. Hochspannungsleitung | 5 |
| 2.3. Leistungstransformator | 8 |
| 2.3.1. Transformatormodell | 9 |
| 2.3.2. Transformatorregelung | 10 |
| 2.3.3. Transformatorparallellauf | 13 |
| 3. Elektrischer Lastfluss | 14 |
| 3.1. Lastflussberechnung | 14 |
| 3.2. Prinzip der Lastflussverschiebung | 15 |
| 4. Lastflussregler | 18 |
| 4.1. Phasenschiebertransformator | 18 |
| 4.2. UPFC | 19 |
| 4.3. TCSC | 20 |
| 4.4. SSSC | 21 |
| II. Simulation der Lastflussregelung | 22 |
| 5. Basisnetz | 23 |
| 6. Prinzipnetz | 25 |
| 6.1. Leitungen niederohmig | 26 |
| 6.2. Leitungen ohmsch-induktiv | 29 |
| 6.3. Leitungen ohmsch | 32 |
| 6.4. Leitungen induktiv | 35 |
| 6.5. Wirkleistungsregelbarkeit | 38 |
| 6.6. Blindleistungsregelbarkeit | 38 |
| 7. Vereinfachtes Modell ohne VIS | 40 |
| 7.1. Regelung in DMH | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 7.2. Regelung in OSI | 43 |
| 7.3. Regelung in DMH und OSI | 45 |
| 8. Vereinfachtes Modell mit VIS | 47 |
| 8.1. Netztrennung - Regelung in VIS | 49 |
| 8.2. Netztrennung - Regelung in VIS, DMH und OSI | 53 |
| 8.3. Netzkopplung - Regelung in VIS | 55 |
| 8.4. Netzkopplung - Regelung in DMH | 57 |
| 8.5. Netzkopplung - Regelung in OSI | 58 |
| 9. Vollständiges Modell ohne VIS | 59 |
| 9.1. Regelung in DMH - Starklast | 61 |
| 9.2. Regelung in DMH - maximale Erzeugung | 63 |
| 9.3. Regelung in DMH - maximaler Pumpbetrieb | 65 |
| 10. Vollständiges Modell mit VIS - Netztrennung | 67 |
| 10.1. Regelung in VIS - Starklast | 69 |
| 10.2. Regelung in VIS - maximale Erzeugung | 73 |
| 10.3. Regelung in VIS - maximaler Pumpbetrieb | 77 |
| 11. Vollständiges Modell mit VIS - Netzkopplung | 81 |
| 11.1. Regelung in VIS - Starklast | 83 |
| 11.2. Regelung in VIS - maximale Erzeugung | 85 |
| 11.3. Regelung in VIS - maximaler Pumpbetrieb | 87 |
| | |
| III. Diskussion der Simulationsergebnisse | 89 |
| | |
| 12. Diskussion | 90 |
| 12.1. Diskussion - vereinfachtes/ vollständiges Netz | 90 |
| 12.2. Diskussion - unterschiedliche Belastungen (vollständiges Netz) | 92 |
| 12.3. Diskussion - Leitungsbelastung | 93 |
| 12.4. Abschlussempfehlung | 94 |
| | |
| Literaturverzeichnis | 95 |

Vorwort

Elektrische Energie wird bereits seit mehr als einem Jahrhundert genutzt, allerdings hat sie noch nie eine so hohe Bedeutung gehabt, wie derzeit. Vor allem die industrialisierte Welt ist enorm von der elektrischen Energie abhängig. Daher ist es im öffentlichen Interesse verfolgt, eine sichere und wirtschaftliche Stromversorgung zu gewährleisten. Das elektrische Netz ist dabei ein wesentlicher Bestandteil um dies zu ermöglichen. Die typischen Ausbaugegebenheiten des elektrischen Netzes wie Kostenintensität und Langlebigkeit haben dazu geführt, dass man zu neuen Technologien greifen muss um den Betrieb aufrecht zu halten.

Seit der Liberalisierung des Strommarktes werden die Erzeugung, der Transport und die Verteilung der elektrischen Energie von unterschiedlichen Verantwortungsbereichen wahrgenommen. Der Betrieb des elektrischen Netzes muss für eine zuverlässige Energieversorgung sorgen, allerdings ohne in die Energieerzeugung eingreifen zu können. Um den Lastfluss im elektrischen Netz gezielt zu steuern und Teile des Netzes zu entlasten, bedient man sich der Lastflussregelung.

Die möglichen Auswirkungen der Lastflussregelung werden in der Masterarbeit "*Lastflussregelung im elektrischen Netz*" mit theoretischen Ausführungen und Simulationen erläutert.

1. Einleitung

Seit der Liberalisierung des Strommarktes ist die Erzeugung, Vermarktung, Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie voneinander getrennt. Dadurch kann nicht mehr über die Einspeisungen Einfluss auf den Lastfluss genommen werden, allerdings ist es aus technoökonomischen Gründen wichtig, dass eine Beeinflussung des Lastflusses durch den Netzbetreiber möglich ist. In der Masterarbeit "*Lastflussregelung im elektrischen Netz*" wird dabei untersucht, wie sich unterschiedliche Regeltransformatoren auf diverse Netzvarianten auswirken.

Die Berechnungen des Lastflusses erfolgen mit dem Programm *NEPLAN*. Im ersten Teil wird die Theorie der Lastflussregelung erläutert und im zweiten sind die Ergebnisse der Lastflusssimulation dargestellt. Aus den Simulationen soll ersichtlich sein wie sich die Regeltransformatoren bei unterschiedlichen Belastungen auf die Lastflussregelung auswirken. Außerdem soll untersucht werden, wie sehr die Lastflussergebnisse des *vereinfachten Netzes* mit dem *vollständigen Netz* übereinstimmen. Abschließend soll eine Empfehlung abgegeben werden welche Ausführung der Regeltransformator haben soll und ob eine weitere 220/110-kV-Netzabstützung sinnvoll ist. Die unterschiedlichen Netzvarianten werden im Folgenden beschrieben.

Im *Basisnetz* wird noch nicht die eigentliche Lastflussregelung untersucht, sondern es soll simuliert werden wie sich unterschiedliche Regelwinkel auf die Spannung an der Sammelschiene auswirken. Dabei wird das System ohne Last und Generatoren abgebildet und es wird im Stichtrieb gearbeitet. Es soll vor allem untersucht werden, wie sich die Regelung auf der Primär- und Sekundärseite des Regeltransformators, auf die Spannungszeiger auswirkt. Die Leitungen werden möglichst kurz und niederohmig gehalten um deren Einfluss auf die Ergebnisse gering zu halten.

Die Simulationen im *Prinzipnetz* dienen der Untersuchung wie sich die Regelwinkel bei unterschiedlichen Leitungsimpedanzen auf den Lastfluss auswirken. Dabei wird eine Last ins Ringnetz eingefügt und die Leitungsimpedanzen variiert. Es wird die Wirk- und Blindleistungsregelbarkeit bei niederohmigen, ohmschen, induktiven und ohmsch-induktiven Leitungsimpedanzen simuliert. Die Simulationen sollen vornehmlich dazu dienen, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen der Lastflusstheorie und den simulierten Lastflüssen herzustellen. Aus diesem Grund ist das Modell so einfach wie möglich zu halten.

Das *vereinfachte Netz* ist eine reduzierte Abbildung eines realen 110-kV-Netzes. Dabei wird darauf geachtet, dass die grundlegenden Parameter der Leitungen oder Transformatoren dem realen Netz entsprechen. Damit soll die Lastflusssimulation zu ähnlichen Ergebnissen wie im realen Netz kommen. Diese Simulation soll vornehmlich durchgeführt werden, um schnell einen Überblick für unterschiedliche Regeltransformatoren zu erhalten und die Simulationen im

vollständigen Netz auf Plausibilität zu überprüfen. Durch die vereinfachte Struktur gegenüber dem *vollständigen Netz* können auch die Zusammenhänge zwischen Regelung und Lastfluss einfacher bestimmt werden. Des Weiteren soll der Einfluss einer zusätzlichen 220/110-kV-Netzabstützung mit zwei Transformatoren simuliert werden.

Im *vollständigen Netz* wird ein reales 110-kV-Netz in *NEPLAN* abgebildet. Dabei werden möglichst alle Sammelschienen, Leitungen, Schalter, Transformatoren, Lasten und Generatoren mit ihren realen Parametern dargestellt. Bei der Simulation wird der Einfluss unterschiedlicher Regelwinkel auf den Wirk- und Blindleistungsfluss bei unterschiedlichen Netzbedingungen untersucht. Die Netzbedingungen beinhalten unterschiedliche Schaltzustände und verschiedene Belastungsvarianten wie Starklast, maximale Erzeugung und maximaler Pumpbetrieb. Des Weiteren wird untersucht, wie sich eine zusätzliche 220/110-kV-Netzabstützung mit zwei Transformatoren auf den Lastfluss auswirkt.

Teil I.

**Theorie der Lastflussregelung im
elektrischen Netz**

2. Modellierung der Netzkomponenten

2.1. Netzstruktur

Die 110-kV-Netzebene wird als Hochspannungsnetz (Netzebene 3) bezeichnet und dient als überregionales Verteilnetz. Dabei wird die elektrische Energie zumeist aus dem übergeordneten Höchstspannungsnetz über Leistungstransformatoren bezogen.

2.2. Hochspannungsleitung

Die Leitungen, im Hochspannungsnetz, bestehen vornehmlich aus Freileitungen. Die Modellierung der Freileitung erfolgt in *NEPLAN* mit dem π -Ersatzschaltbild einer Leitung.

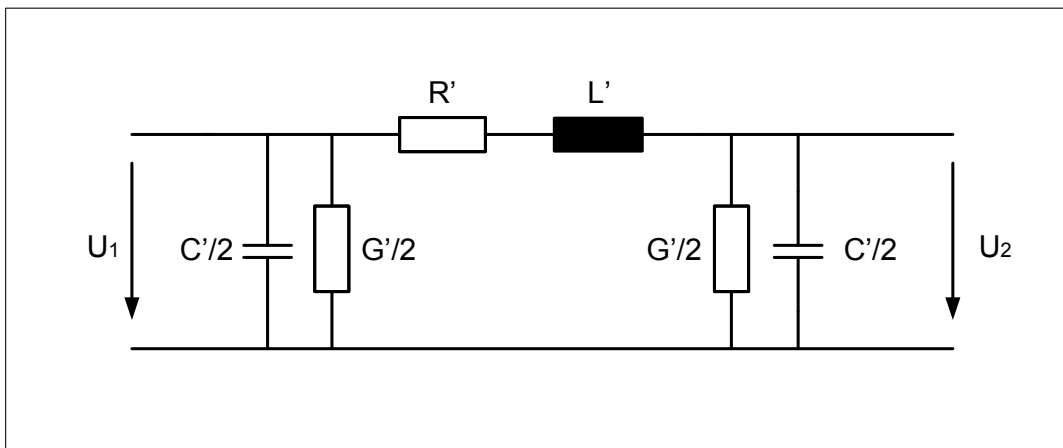


Abbildung 2.1.: π -Ersatzschaltbild einer Leitung

| | |
|-------|----------------------------|
| U_1 | Spannung am Leitungsanfang |
| U_2 | Spannung am Leitungsende |
| R' | Wirkwiderstandsbelag |
| L' | Induktivitätsbelag |
| C' | Kapazitätsbelag |
| G' | Ableitungsbelag |

Um die Parameter für eine Hochspannungsfreileitung zu berechnen kann exemplarisch der Leitungstyp 243-AL1/39-ST1A nach EN 50182:2001 genommen werden, welcher ein Aluminium-Stahl Leiter mit einem Aluminiumquerschnitt von 243mm^2 ist.

Folgende Werte sind typische Parameter der Hochspannungsfreileitung:

Wirkwiderstandsbelag

$$R' = \rho \cdot \frac{1}{A} \quad (2.1)$$

| | |
|--------|-------------------------|
| R' | Wirkwiderstandsbelag |
| ρ | Spezifischer Widerstand |
| A | Leiterquerschnitt |

Beim Leitungstyp 243-AL1/39-ST1A ergibt sich laut DIN 48204, somit ein Wirkwiderstandsbelag von $0,12\ \Omega/\text{km}$.

Induktivitätsbelag

Die Induktivität der Leitung wird durch das Magnetfeld im Inneren des Leiters und jenes um den Leiter herum bestimmt. Dabei ist vornehmlich das Magnetfeld außerhalb des Leiters die maßgebende Größe für den Induktivitätsbelag. Die Berechnung der Induktivität wird mit folgender Formel durchgeführt. [1, Seite 188ff]

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right) \quad (2.2)$$

| | |
|---------|---------------------------|
| L' | Induktivitätsbelag |
| μ_0 | Magnetische Feldkonstante |
| d | Mittlerer Leitungsabstand |
| r | Leiterradius |

Bei einem mittleren Leitungsabstand von 4m ergibt sich für den Leitungstyp 243-AL1/39-ST1A ein Induktivitätsbelag von $1,25\ \text{mH}/\text{km}$ bzw. $0,4\ \Omega/\text{km}$.

Kapazitätsbelag

Der Kapazitätsbelag ergibt sich aus den Teilkapazitäten zwischen den Leitern und der Erdkapazität, welche zwischen den Leitern und der Bezugs Erde auftritt. Für die Berechnung des Kapazitätsbelags kann folgende Formel genommen werden. [1, Seite 199]

$$C' = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{d \cdot 2h}{r \cdot D}} \quad (2.3)$$

| | |
|-----------------|---------------------------|
| C' | Kapazitätsbelag |
| ε_0 | Elektrische Feldkonstante |
| d | Leitungsabstand |
| h | Leitungshöhe |
| r | Leiterradius |
| D | Abstand zur Spiegelladung |

Bei einem Leitungsabstand von 4m und einer Leiterhöhe von 10m über Bezugs Erde ergibt sich ein Kapazitätsbelag von 9,3nF/km bzw. 342kΩ/km.

Ableitungsbelag

Der Ableitungsbelag umfasst die Verluste, welche durch das Dielektrikum verursacht werden. Dabei bezieht man sich auf das Dielektrikum zwischen den Leitern und zwischen Leiter und Bezugs Erde. Der Wert des Ableitungsbelages ist bei Freileitungen wetterabhängig und befindet sich im Bereich von 50nS/km. [1, Seite 202]

Modellvereinfachung

Aus den einzelnen exemplarischen Leitungsparametern ist ersichtlich, dass für den Leitungstyp 243-AL1/39-ST1A der Kapazitätsbelag und der Ableitungsbelag unberücksichtigt bleiben können. Aus dem Verhältnis zwischen Wirkwiderstandsbelag und Induktivitätsbelag ist ersichtlich, dass die Induktivität die dominierende Größe für das Modell einer Freileitung ist.

| | |
|-------|----------------------------|
| U_1 | Spannung am Leitungsanfang |
| U_2 | Spannung am Leitungsende |
| R' | Wirkwiderstandsbelag |
| L' | Induktivitätsbelag |

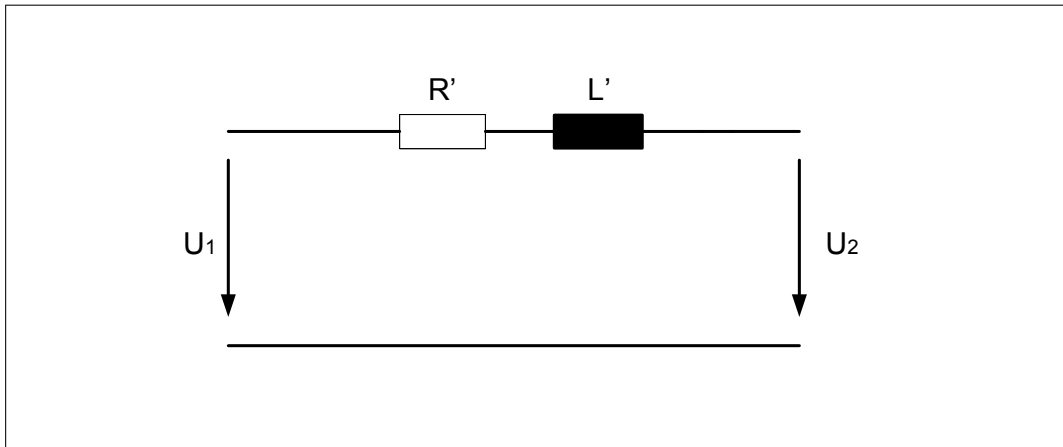


Abbildung 2.2.: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Leitung

2.3. Leistungstransformator

Um das 110-kV-Netz an das 220-kV-Übertragungsnetz zu koppeln, werden Leistungstransformatoren eingesetzt. Die eingesetzten Transformatoren sind als Regeltransformatoren ausgeführt. Durch eine spezielle Verschaltung wird auf der Ober- oder Unterspannungsseite eine zusätzliche Spannung eingefügt. Steht die Zusatzspannung in einem Winkel von 0° oder 180° , zur Bezugsspannung wird dies als Längsregelung bezeichnet. Bei einem Winkel von $\pm 90^\circ$ wird es als Querregelung bezeichnet und jeder andere Winkel bedeutet eine Schrägregelung.

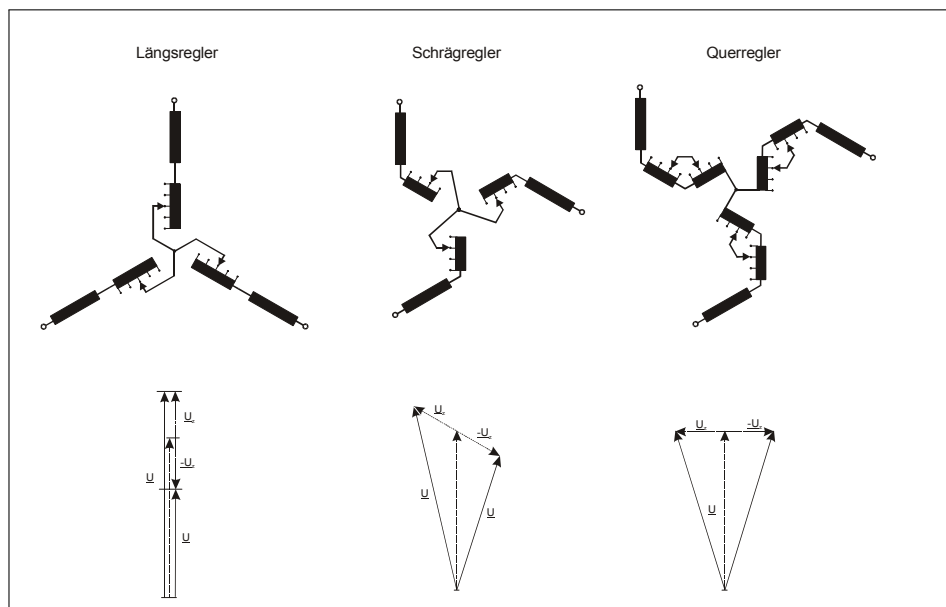


Abbildung 2.3.: Schaltzustände und Zeigerdiagramme des Regeltransformators[2, Seite 11]

U Hauptspannung
 U_z Zusatzspannung

2.3.1. Transformatormodell

In *NEPLAN* wird der Transformator für die Lastflussberechnung als π -Ersatzschaltbild nachgebildet und durch folgende Parameter und Formeln beschrieben.

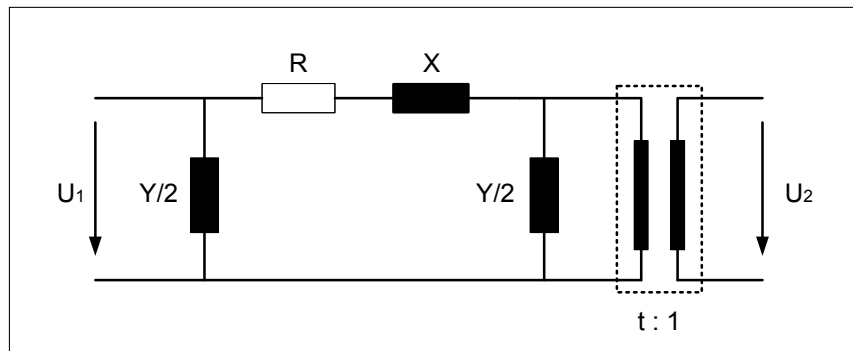


Abbildung 2.4.: *NEPLAN* Transformatormodell

U_1 primärseitige Spannung
 U_2 sekundärseitige Spannung
 R Längsresistanz
 X Längsreaktanz
 Y Quersuszeptanz
 t Übersetzungsverhältnis

$$Z = U_{kr}(1) \cdot \frac{U_{r1}^2}{(S_r \cdot 100)} \quad (2.4)$$

$$R = U_{Rr}(1) \cdot \frac{U_{r1}^2}{S_r \cdot 100} \quad (2.5)$$

$$X = \sqrt{(Z^2 - R^2)} \quad (2.6)$$

$$Y_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{U_{r1}^2} \quad (2.7)$$

$$Y_0 = I_0 \cdot \frac{Sr}{100 \cdot Ur1^2} \quad (2.8)$$

$$Y = Y_{Fe} - j \cdot \sqrt{Y_0^2 - Y_{Fe}^2} \quad (2.9)$$

| | |
|----------|----------------------------------|
| Z | Scheinwiderstand |
| $Ukr(1)$ | Kurzschlussspannung im Mitsystem |
| $Ur1$ | primärseitige Bemessungsspannung |
| Sr | Bemessungsleistung |
| R | Wirkwiderstand |
| $URr(1)$ | Kupferverluste im Mitsystem |
| X | Blindwiderstand |
| Y_{Fe} | Eisenadmittanz |
| P_{Fe} | Eisenverluste |
| Y_0 | Leerlaufadmittanz |
| I_0 | Leerlaufstrom |
| Y | Gesamtadmittanz |

2.3.2. Transformatorregelung

Bei der Transformatorregelung werden Teilspannungen anderer oder gleicher Phasenlage zur Bezugsspannung addiert, wodurch sich eine Quer-, Schräg- oder Längsregelung ergibt. Dabei wird die Amplitude der Zusatzspannung durch die aktuelle Stufenstellung des Regeltransformators bestimmt.

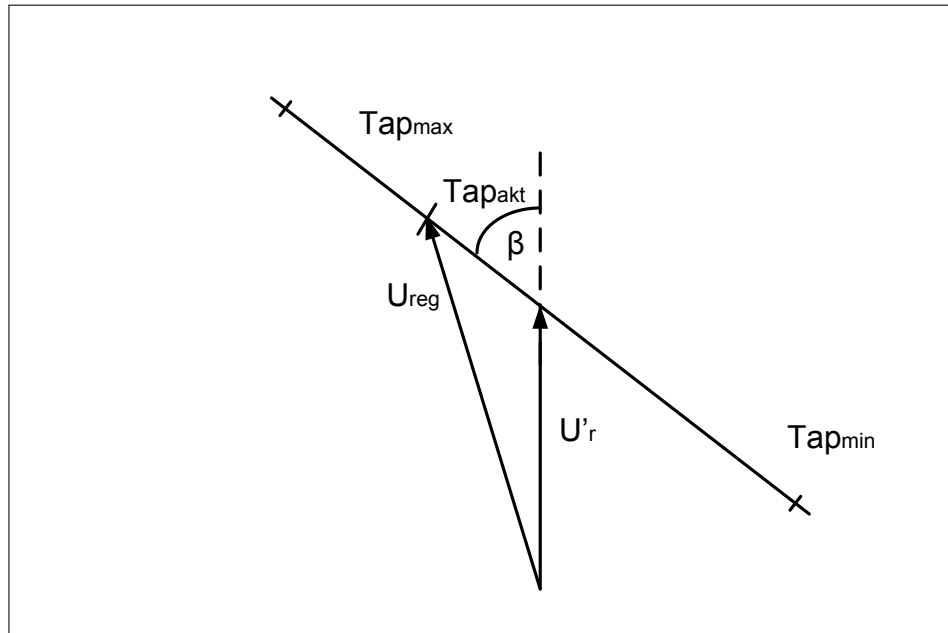


Abbildung 2.5.: Regelung der Spannung in Neplan

Tap_{max} Maximale Stufenstellung

Tap_{min} Minimale Stufenstellung

Tap_{akt} Aktuelle Stufenstellung

U'_r Spannung an der nicht geregelten Seite, bezogen auf die geregelte Seite mit Nennübersetzungsverhältnis (Mittelstellung)

U_{reg} Spannung an der geregelten Seite

β Winkel der Zusatzspannung

Die Regelung der Spannung kann entweder auf der Primär- oder Sekundärseite des Transformators erfolgen. Dabei ist im Allgemeinen die Regelung auf der Oberspannungsseite zu bevorzugen, da somit geringere Ströme geschaltet werden müssen.

Regelung auf der Primärseite

$$U_1 = U'_2 \cdot \left(1 + (Tap_{akt} - Tap_r) \cdot \frac{\Delta U}{100} \cdot [\cos(\beta) + j \cdot \sin(\beta)]\right) \quad (2.10)$$

$$U'_2 = U_1 \cdot \frac{1}{\left(1 + (Tap_{akt} - Tap_r) \cdot \frac{\Delta U}{100} \cdot [\cos(\beta) + j \cdot \sin(\beta)]\right)} \quad (2.11)$$

Wird die Sekundärspannung U'_2 konstant gehalten, liegt die Primärspannung U_1 bei Variation der Transformatorstufe auf einer Geraden, deren Winkel durch β bestimmt wird (Glg. 2.10 und Abb. 2.5). Wird die Primärspannung U_1 konstant gehalten, liegt die Sekundärspannung U'_2 auf einem Kreissegment, das sich durch Inversion der Geraden in der komplexen Ebene ergibt (Glg. 2.11).

Regelung auf der Sekundärseite

$$U_2 = U'_1 \cdot (1 + (Tap_{akt} - Tap_r) \cdot \frac{\Delta U}{100} \cdot [\cos(\beta) + j \cdot \sin(\beta)]) \quad (2.12)$$

$$U'_1 = U_2 \cdot \frac{1}{(1 + (Tap_{akt} - Tap_r) \cdot \frac{\Delta U}{100} \cdot [\cos(\beta) + j \cdot \sin(\beta)])} \quad (2.13)$$

U'_1, U'_2 Spannung an der nicht geregelten Seite, bezogen auf die geregelte Seite mit Nennübersetzungsverhältnis (Mittelstellung)

U_1, U_2 Spannung an der geregelten Seite

Tap_r Stufensteller in Mittelstellung

Tap_{akt} aktuelle Stufenstellung

ΔU Spannungsänderung pro Stufenstellung in %

β Winkel der Zusatzspannung

t Übersetzungsverhältnis

Wird die Primärspannung U'_1 konstant gehalten, liegt die Sekundärspannung U_2 bei Variation der Transformatorstufe auf einer Geraden, deren Winkel durch β bestimmt wird (Glg. 2.12 und Abb. 2.5). Wird die Sekundärspannung U_2 konstant gehalten, liegt die Primärspannung U'_1 auf einem Kreissegment, das sich durch Inversion der Geraden in der komplexen Ebene ergibt (Glg. 2.13).

Von einer Längsregelung wird dann gesprochen, wenn der Winkel (β) 0° oder 180° aufweist. Bei einem Winkel von $\pm 90^\circ$ wird es als Querregelung bezeichnet und bei allen anderen Winkeln als Schrägregelung. Bei der Schrägregelung hat sich als typischer Winkel $\beta=60^\circ$ durchgesetzt, da dieser einfach zu realisieren ist und sich bewährt hat. Für die Realisierung der unterschiedlichen Reglertypen wird die so genannte *Indirekte Regelung* mit Zusatztransformatoren angewendet. Die nähere Erklärung der *Indirekten Regelung* erfolgt in [3, Seite 161ff].

In den folgenden Kapiteln wird jeweils die Primärspannung konstant gehalten, wobei in Kapitel 5 das Verhalten mit Regelung auf der Primärseite und der Sekundärseite verglichen wird.

2.3.3. Transformatorparallelauf

Leitungstransformatoren werden häufig im Parallelauf betrieben. Dabei sind allerdings einige Parameter zu beachten um die zwei oder mehr Transformatoren auch optimal auszulasten. Bei nicht korrekter Transformatorauslegung kommt es zu einer ungleichmäßigen Belastung. Die folgenden Angaben sind zu berücksichtigen, um einen einwandfreien Parallelbetrieb zu ermöglichen:

- Gleiche Übersetzungen
- Sekundäre Leerlaufspannungen in Betrag und Phase gleich
- Gleiche Kurzschlussimpedanzen
- Gleiche relative Kurzschlussspannungen

3. Elektrischer Lastfluss

Der Lastfluss in elektrischen Netzen hängt sowohl von der Spannungshöhe, als auch vom Spannungswinkel in den einzelnen Netzknoten ab. Welcher Parameter den Wirk- und Blindleistungsfluss beeinflusst, leitet sich von den Eigenschaften der jeweiligen Hochspannungsleitung ab.

3.1. Lastflussberechnung

Wird eine Leitung als Vierpol betrachtet, kann man den Leistungsfluss über folgende Formeln berechnen. [2, Seite 44f]

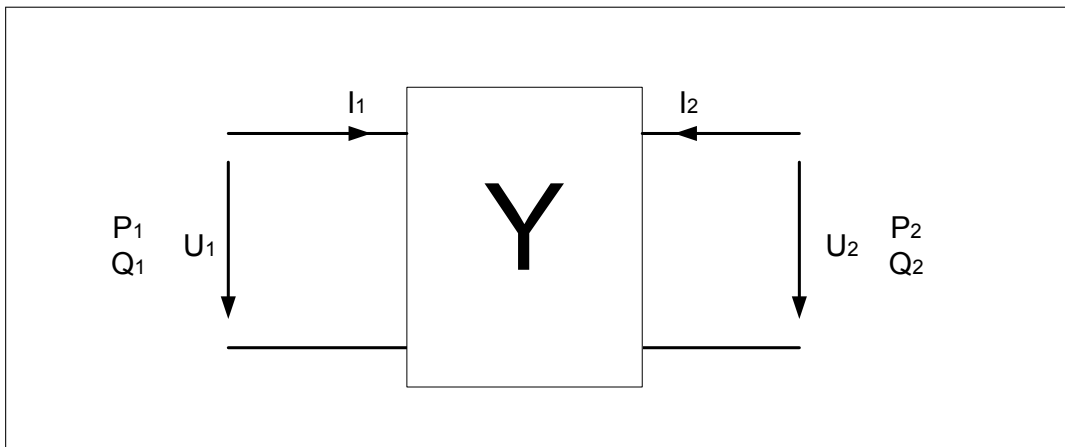


Abbildung 3.1.: Leitungsvierpol mit Y-Parametern

$$P_1 = \frac{U_1^2}{Z_{11}} \cdot \cos(\psi_{11}) - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_{12}} \cdot \cos(\vartheta_1 - \vartheta_2 + \psi_{12}) \quad (3.1)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{Z_{11}} \cdot \sin(\psi_{11}) - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_{12}} \cdot \sin(\vartheta_1 - \vartheta_2 + \psi_{12}) \quad (3.2)$$

$$P_2 = \frac{U_2^2}{Z_{22}} \cdot \cos(\psi_{22}) - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_{12}} \cdot \cos(\vartheta_2 - \vartheta_1 + \psi_{21}) \quad (3.3)$$

$$Q_2 = \frac{U_2^2}{Z_{22}} \cdot \sin(\psi_{22}) - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_{12}} \cdot \sin(\vartheta_2 - \vartheta_1 + \psi_{21}) \quad (3.4)$$

- Z Leitungsvierpolimpedanz
 ψ Leitungswinkel der Vierpolimpedanz
 ϑ Spannungswinkel

Berechnungsvereinfachung

Unter den Bedingungen, welche im Abschnitt 2.2 bereits erläutert wurden kann man einige Vereinfachungen durchführen, womit die Formeln, welche den Lastfluss beschreiben wesentlich vereinfacht werden.

- $\psi_{11} = \psi_{12} = \psi_{21} = \psi_{22} = 90^\circ$
- $\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$
- $Z_{11} = Z_{12} = Z_{21} = Z_{22} = Z$

$$P_1 = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z} \cdot \sin(\vartheta) \quad (3.5)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{Z} - \frac{U_1 \cdot U_2}{Z} \cdot \cos(\vartheta) \quad (3.6)$$

$$P_2 = \frac{U_2 \cdot U_1}{Z} \cdot \sin(\vartheta) \quad (3.7)$$

$$Q_2 = -\frac{U_2^2}{Z} + \frac{U_2 \cdot U_1}{Z} \cdot \cos(\vartheta) \quad (3.8)$$

Untersucht man die Formeln nun auf ihre Sensitivität bezüglich ϑ und U_2 , so erkennt man, dass die Wirkleistung hauptsächlich vom Spannungswinkel abhängt und die Blindleistung von der Spannungshöhe beeinflusst wird.

3.2. Prinzip der Lastflussverschiebung

Bei der Lastflussregelung handelt es sich immer um eine Verschiebung des Lastflusses von einer Leitung auf eine oder mehrere andere. Diese Verschiebung wird durch eine Spannung, welche in ein Leitungsstück eingepreßt wird, verursacht. Somit entsteht ein Kreisstrom, welcher durch die Leitungsparameter beeinflusst wird und somit erhöht sich der Leistungsfluss über eine Leitung und verringert sich anderenorts.

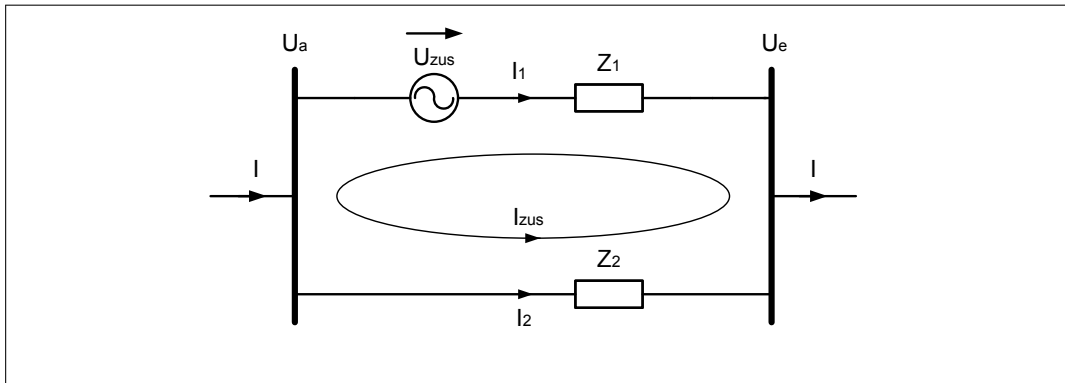


Abbildung 3.2.: Prinzip der Lastflussverschiebung

Z_1, Z_2 Leitungsimpedanz

U_{zus} Zusatzspannung

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.9)$$

$$I_{zus} = \frac{U_{zus}}{Z_1 + Z_2} \quad (3.10)$$

In Abbildung 3.2 wird dargestellt, dass sich der Lastfluss auf der zweiten Leitung erhöht und auf der ersten verringert. Die Ströme, Spannung und Impedanzen sind als komplexe Werte anzusehen.

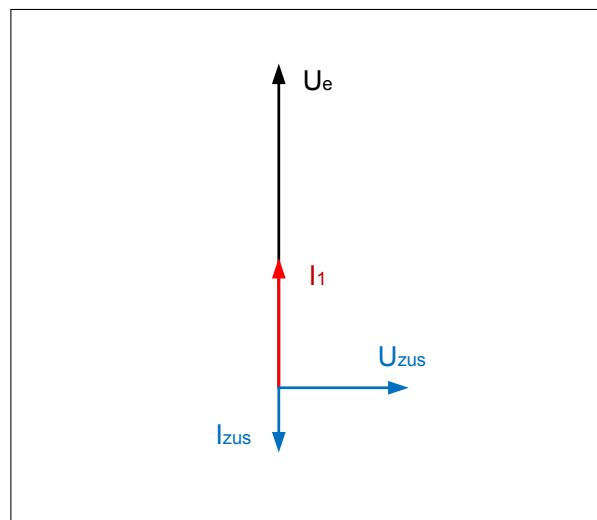


Abbildung 3.3.: Zeigerdiagramm der Lastflussverschiebung

Die Abbildung 3.3 zeigt wie die Zusatzspannung sein muss, um den Wirkleistungsfluss über die erste Leitung zu verringern. Zur Vereinfachung wurde angenommen, dass die Leitungsimpedanzen rein induktiv sind. Somit ändert sich der Wirkleistungsfluss wenn die Zusatzspannung $\pm 90^\circ$ auf U_e steht und der Blindleistungsfluss wenn die beiden Spannungen 0° oder 180° zu einander sind.

Sind die Leitungsimpedanzen ohmsch-induktiv, so verändert sich der Winkel der Zusatzspannung entsprechend, um den Wirk- und Blindleistungsfluss zu regeln.

4. Lastflussregler

Die Lastflussregelung kann durch eine Vielzahl von Reglertypen erfolgen. Dabei unterscheiden sie sich in ihrem prinzipiellen Aufbau, der Regelgeschwindigkeit und ihrer Stufenauflösung. Die Funktionsweise des Regeltransformators wurde bereits im Kapitel 2.3.2 behandelt und somit wird hier auf die Funktionsweise von FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) Elementen und Phasenschiebertransformatoren eingegangen. Um eine Lastflussregelung zu ermöglichen, werden bei FACTS Elementen sogenannte Serienkompensationselemente verwendet. Diese Elemente beeinflussen entweder die Leitungsimpedanz oder speisen eine Zusatzspannung ein, welche den Phasenwinkel und die Amplitude der Spannung verändert.

4.1. Phasenschiebertransformator

Der Phasenschiebertransformator ist ein spezieller Regeltransformator. Dieser kann den Spannungswinkel der Phasenspannungen verändern, wodurch eine Lastflussregelung möglich ist.

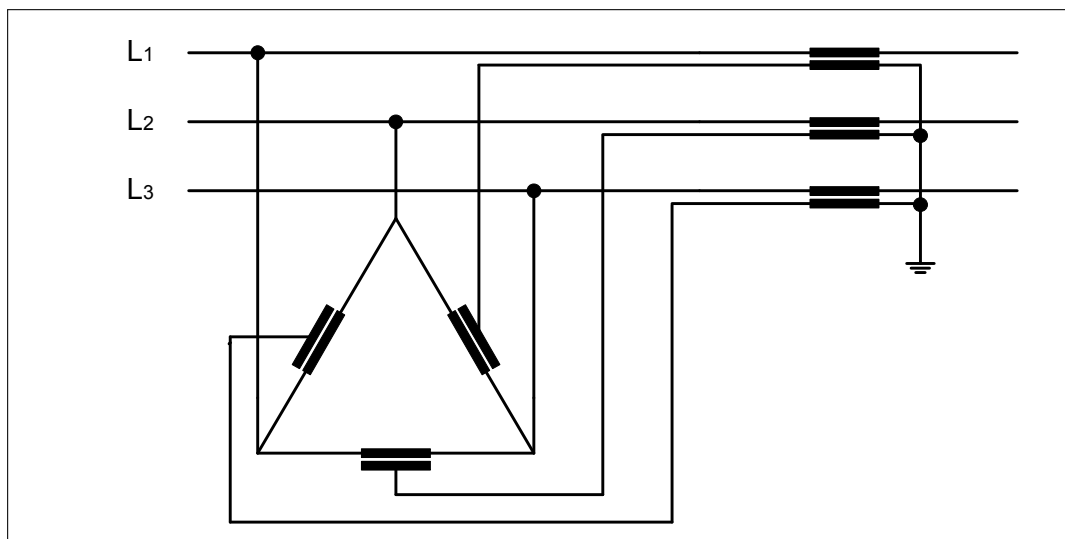


Abbildung 4.1.: Schematischer Aufbau eines Phasenschiebertransformators

L_1, L_2, L_3 Phasen des Phasenschiebertransformators

Dabei besteht der Phasenschiebertransformator aus zwei Teiltransformatoren, welche als Serien- und Shunttransformator bezeichnet werden. Der Shunttransformator ist in Dreieck geschaltet und dient dazu um eine bestimmte Phasenverschiebung einzustellen. Diese verkettete Spannung wird über den Serientransformator, welcher in Stern geschaltet ist, zu jener Phasenspannung geführt, welche nicht an der verketteten Spannung beteiligt ist. Somit gehört die Spannung U_{12} zur Phase L_3 , U_{23} zur Phase L_1 und U_{31} zur Phase L_2 . Durch diese Verschaltung steht die verkettete Spannung immer 90° zur Phasenspannung wodurch man im Prinzip einen Querregeltransformator erhält.

4.2. UPFC

Der UPFC (*Unified Power Flow Controller*) kann die Aufgaben eines Regeltransformators in elektronischer Form übernehmen. Dabei kann die Lastflussregelung in schnellerer und einer höheren Auflösung bzw. Genauigkeit erfolgen, als es durch herkömmliche Regeltransformatoren möglich ist.

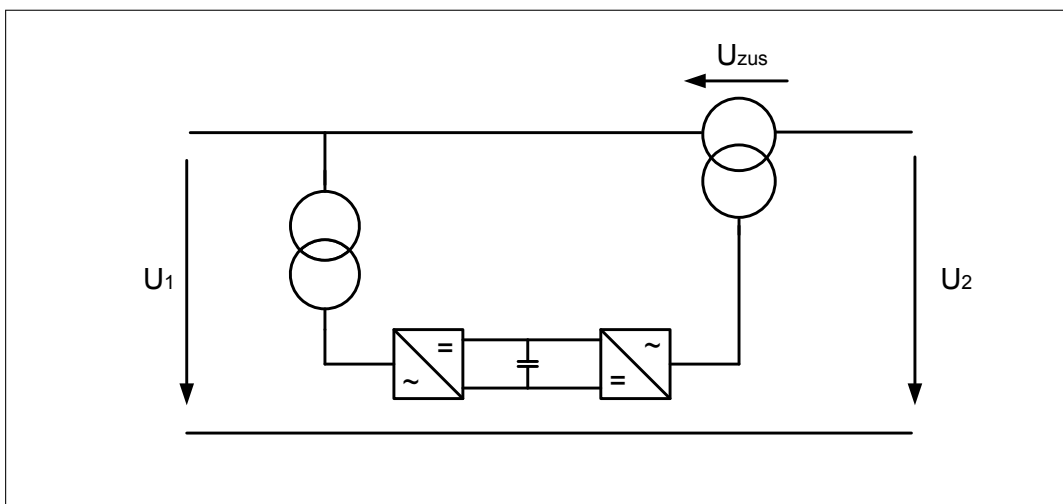


Abbildung 4.2.: Ersatzschaltbild eines UPFC

Es ist durch die beiden Umrichter, möglich jede beliebige Spannung (U_{zus}) bezüglich Amplitude und Phasenlage, zu erzeugen um die Blind- und Wirkleistung zu steuern. Daher wirkt der UPFC wie ein Schräg regler, kann aber auch als Quer- oder Längsregler betrieben werden.

Wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist, kann die Zusatzspannung jeden Wert innerhalb des gelben Kreises annehmen. Der Vorteil gegenüber eines Regeltransformators liegt darin, dass nicht nur einige ausgewählte Phasenwinkel möglich sind, sondern praktisch jeder. Dabei wird eine sehr feine Amplitudenaufösung erreicht und die Regelgeschwindigkeit erhöht sich gegenüber Regeltransformatoren. Lediglich die Regelelektronik und die Umrichter begrenzen die Geschwindigkeit der Regelung. Dabei sind Regelgeschwindigkeiten von weniger als einer Sekunde zu erwarten. Der Nachteil liegt in der relativ teuren Leistungselektronik mit der

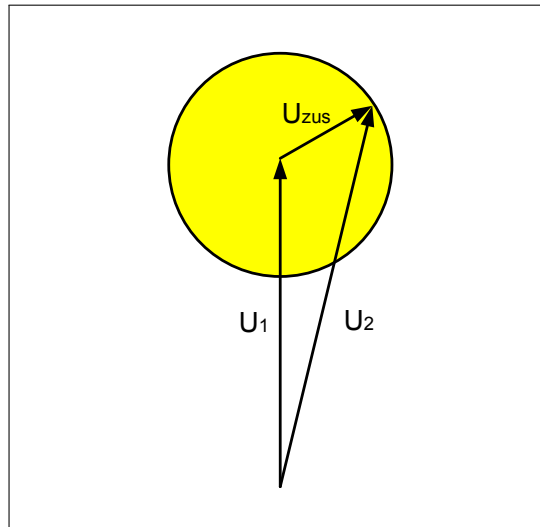


Abbildung 4.3.: Spannungszeiger eines UPFC

entsprechenden Regelungselektronik.

Für weitere Erläuterungen bezüglich des UPFC wird hier auf [3, Seite 681ff] verwiesen.

4.3. TCSC

Ein Element der Serienkompensation ist der TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), welcher die Leitungsimpedanz verändert. Diese Veränderung hat einen direkten Einfluss auf den Wirkleistungsfluss. Dabei wird die Leitungsreaktanz erhöht oder vermindert. Die Auswirkung auf den Wirkleistungsfluss ist in Formel 3.5 einfach zu erkennen. So wird bei einer Verminderung der Leitungsreaktanz der Lastfluss erhöht und umgekehrt. Der TCSC ist aus einer konstanten Kapazität und einer veränderlichen Induktivität aufgebaut. Die Induktivität wird durch zwei antiparallel geschaltete Thyristoren geregelt. Die Wirksamkeit der Induktivität wird dabei durch den Schaltwinkel α der antiparallel geschalteten Thyristoren beeinflusst. Die Berechnung der resultierenden TCSC-Reaktanz ergibt sich durch folgende Formel.

$$X_{TCSC} = \frac{X_C \cdot X_L(\alpha)}{X_C + X_L(\alpha)} \quad (4.1)$$

X_{TCSC} Gesamtreaktanz des TCSC

X_C Reaktanz der Kapazität

$X_L(\alpha)$ Reaktanz der Induktivität in Abhängigkeit von α

α Schaltwinkel

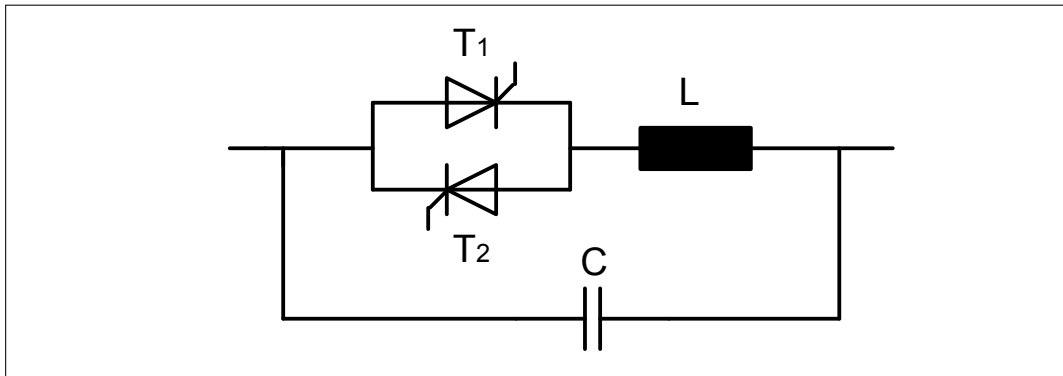


Abbildung 4.4.: Ersatzschaltbild eines TCSC

Da, wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, nur die Reaktanz und nicht die Resistanz veränderbar ist, ist der Einsatz nur dort sinnvoll, wo die Leitungsimpedanz vornehmlich durch die Blindwiderstände bestimmt wird. Diese Bedingung ist, wie bereits in Kapitel 2.2 dargestellt, für Hochspannungsnetze ausreichend erfüllt.

4.4. SSSC

Neben der Anpassung der Leitungsimpedanz, besteht auch die Möglichkeit den Wirkleistungsfluss über eine Zusatzspannung zu regeln. Diese Methode wird bei der SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) angewendet.

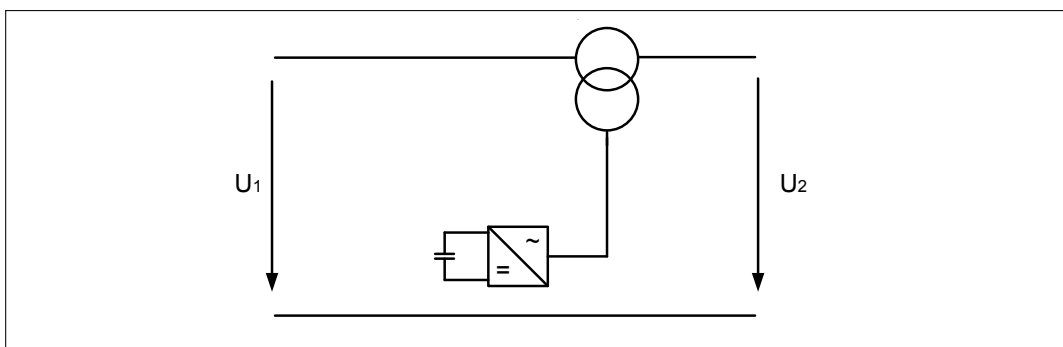


Abbildung 4.5.: Ersatzschaltbild eines SSSC

Durch den Kondensator im Gleichspannungskreis lässt sich lediglich Blindleistung austauschen, wodurch die Zusatzspannung (U_{zus}) nur einen Winkel von $\pm 90^\circ$ haben kann. Da die Leitungsimpedanz im Hochspannungsnetz vornehmlich induktiv ist, kann somit eine Wirkleistungsflussregelung erfolgen. Der SSSC ist somit die elektronische Variante eines Phasenschieber- bzw. Querregeltransformators.

Teil II.

Simulation der Lastflussregelung

5. Basisnetz

Im Basisnetz wird dargestellt, wie sich die primär- und sekundärseitige Regelung auf die Spannungszeiger, an den 110-kV-Sammelschienen, auswirken.

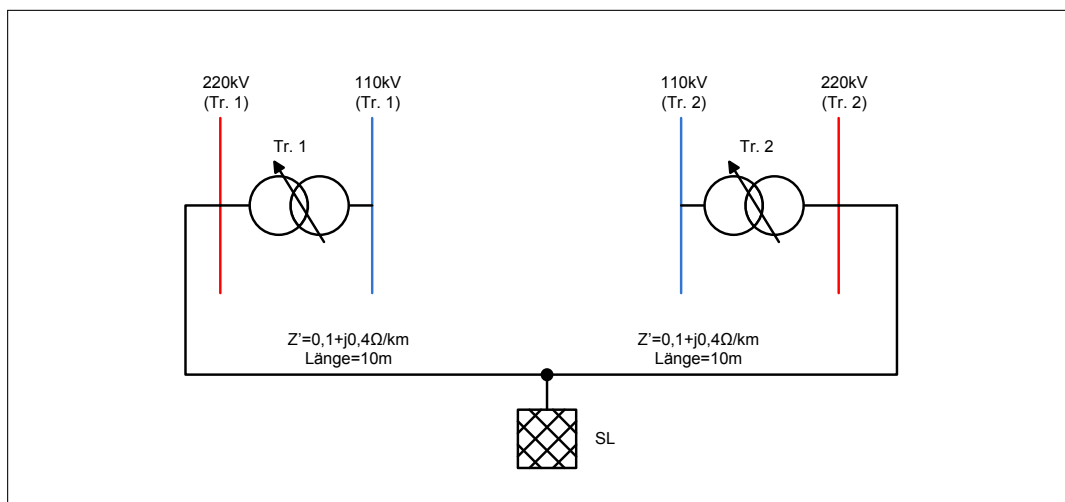


Abbildung 5.1.: Einpoliges Ersatzschaltbild des Basisnetzes

In Abbildung 5.1 ist das einpolige Ersatzschaltbild des Basisnetzes dargestellt. Dabei ist der Slackknoten sehr niederohmig an die beiden Transformatoren angeschlossen. Die Regelung der Spannungsvektoren erfolgt über den Transformator 1 mit den Winkeln -60° , -30° , 0° , 30° , 60° und 90° . Die Auswertungen erfolgen in den Stufenstellerpositionen 1 (Minimum), 7, 13 (Mittelstellung), 19, 25 (Maximum) mit einer Regelspannung von $-0,93\%$ pro Stufe bei einer Bemessungsspannung von 110kV. Dies bedeutet eine Spannungsänderung von 1,023kV verkettet pro Stufe. Das negative Vorzeichen der Regelspannung ergibt sich, da die Daten eines realen Transformators genommen werden. Dabei entspricht die niedrigste Stufenstellung der kleinsten Spannung, daher muss die Regelspannung ein negatives Vorzeichen aufweisen. Der Transformator 2 wird in Mittelstellung gehalten und hat erst in den späteren Simulationen einen Einfluss auf die Ergebnisse.

Für alle weiteren Simulationen ist zu beachten, dass ein negatives Vorzeichen bei einer Leistung bedeutet, dass der Leistungsfluss ins 110-kV-Netz geht und bei einem positiven Vorzeichen ins Höchstspannungsnetz.

Durch die primärseitige Regelung ändert sich der Realteil der Spannungszeiger, an der 110-kV-Sammelschiene, nicht linear mit der Stufenstellung. Dadurch kommt es zu einer Krümmung der Spannungszeiger, welche durch die Formel 2.11 nachvollzogen werden kann. Dabei ist zu erkennen, dass bei gleicher positiven und negativen Stufenänderung, die betragsmäßige Änderung des Real- und Imaginärteils der Spannung unsymmetrisch ist. Dies bewirkt, bei symmetrischer Änderung der Stufenstellung, von der Mittelstellung ausgehend, dass die Lastflussänderung unsymmetrisch wird. Somit kann man den Blind- und Wirkleistungslastfluss nicht im gleichen Betrag vermindern wie erhöhen.

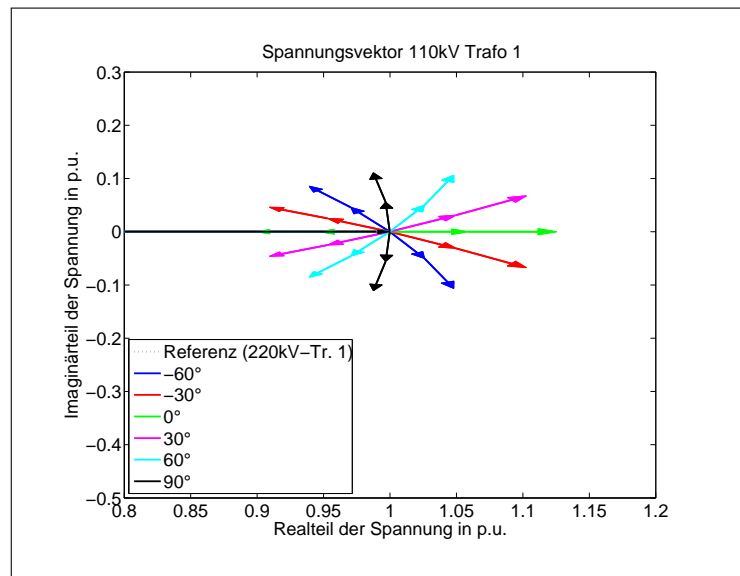


Abbildung 5.2.: Spannungsvektoren bei primärseitiger Regelung

Im Gegensatz zur primärseitigen ist bei der sekundärseitigen Regelung zu erkennen, dass die Spannungszeiger an der 110-kV-Sammelschiene ein lineares Verhalten aufweisen. Dies führt dazu, dass die Lastflussänderung bei gleicher Stufenänderung in positive und negative Richtung zu einer entsprechend gleich großen Lastflussänderung führt. Somit ist der abdeckbare Bereich der Lastflussänderung zur Verminderung und Erhöhung gleich groß.

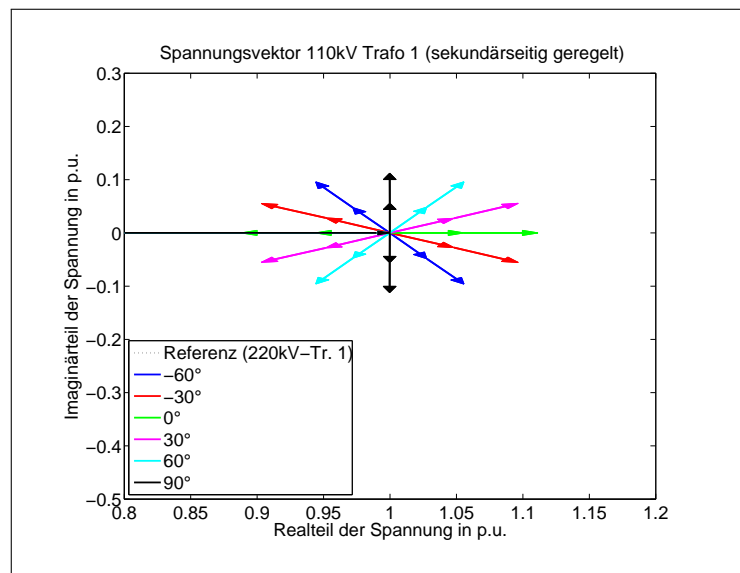


Abbildung 5.3.: Spannungsvektoren bei sekundärseitiger Regelung

6. Prinzipnetz

Mit dem Prinzipnetz wird gezeigt, wie sich unterschiedliche Leitungsparameter auf die Lastflussregelung auswirken. Die Regelung erfolgt für das Prinzipnetz immer sekundärseitig, da es eine Weiterentwicklung des Basisnetzes ist und die Krümmungen der Spannungszeiger nicht die Lastflussergebnisse beeinflussen sollen.

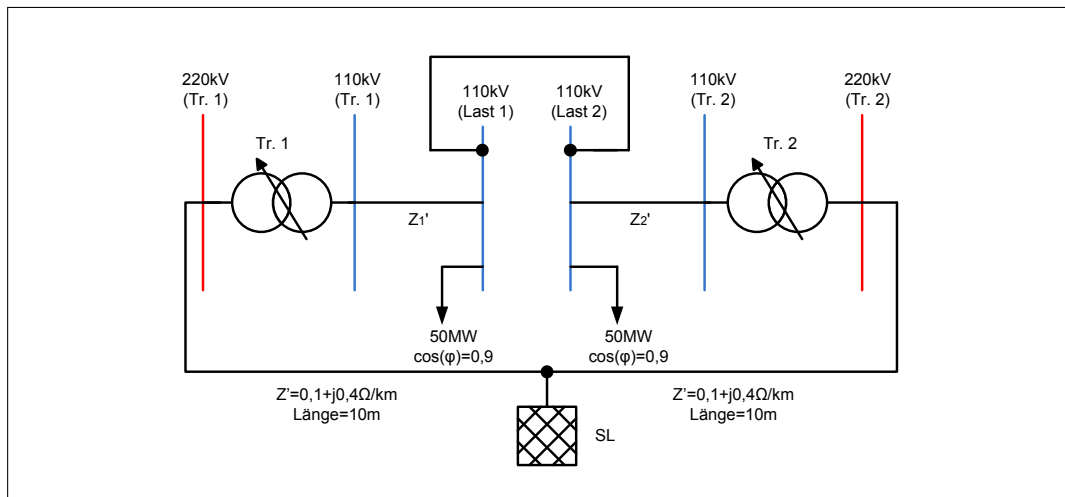


Abbildung 6.1.: Einpoliges Ersatzschaltbild des Prinzipnetzes

Für die folgenden Simulationen wurde der Transformator 2 in Mittelstellung betrieben, wodurch er keinen Einfluss auf die Lastflussregelung hat und der Transformator 1 in den Stufenstellungen 1 (Minimum), 7, 13 (Mittelstellung), 19 und 25 (Maximum) bei je einem Winkel (β) von -60° , -30° , 0° , 30° , 60° und 90° . Die Transformatoren 1 und 2 können für die Lastflussberechnung als eine Serienschaltung eines Wirkwiderstandes ($0,2\Omega$) und eines Blindwiderstandes ($8,02\Omega$) betrachtet werden, welche auf 110kV bezogen sind. In den Diagrammen wird die Stufenstellung 1 als \times und 25 als $*$ markiert.

Zu untersuchende Varianten bei unterschiedlichen Leitungsimpedanzen:

- Niederohmig
- Ohmsch-induktiv
- Ohmsch
- Induktiv

6.1. Leitungen niederohmig

Die Leitungen Z'_1 und Z'_2 sind mit je $0,1 + j \cdot 0,4 \Omega/\text{km}$ und einer Länge von 10m nahezu widerstandslos. Für die Lastflussregelung sind daher die Parameter der Transformatoren, welche praktisch rein induktiv sind, entscheidend.

In Abbildung 6.2 ist zu sehen, dass der regelbare Bereich der Wirkleistung bei einem Winkel von 90° am größten und bei 0° am kleinsten ist. Solange der Stufensteller des Transformators 1 in Mittelstellung ist, wird die Wirkleistung zu gleichen Teil über die Transformatoren 1 und 2 bezogen. Sobald die Mittelstellung verlassen wird, erfolgt eine dementsprechende Lastflussverschiebung.

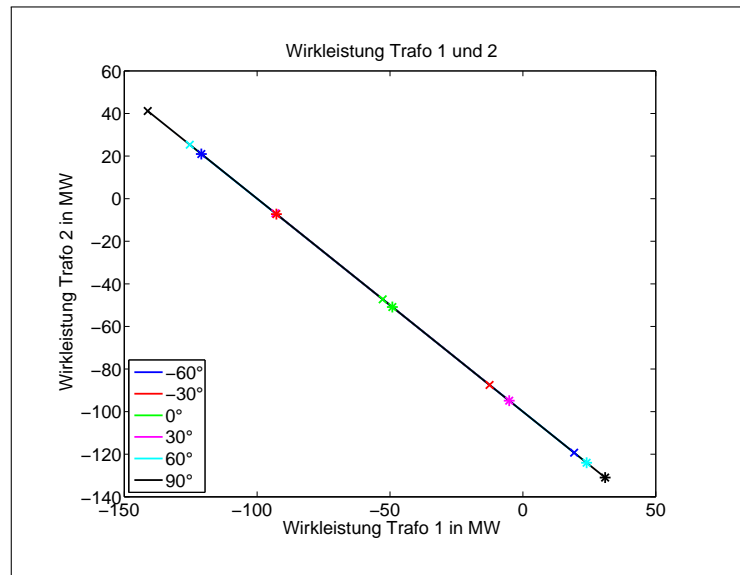


Abbildung 6.2.: Wirkleistung über Transformator 1 und 2

Im Gegensatz zur Wirkleistung ist es bei der Blindleistung bei einem Winkel (β) von 0° möglich den größten Regelbereich abzudecken und bei 90° den kleinsten. Da die Leitungen praktisch keine Blindleistung aufnehmen, ist die bezogene Blindleistung lediglich durch die Lasten an den Sammelschienen bedingt. Erfolgt keine Blindleistungsregelung, so wird die Blindleistung zu gleichen Teil über die beiden Transformatoren bezogen.

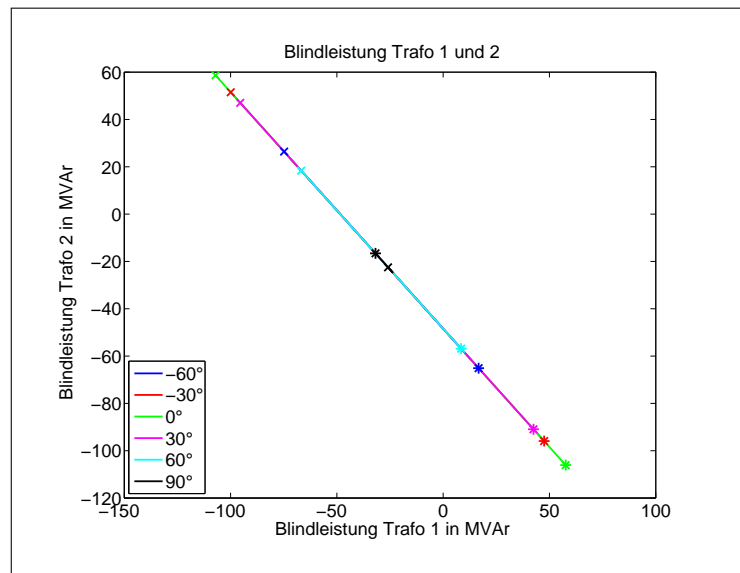


Abbildung 6.3.: Blindleistung über Transformator 1 und 2

Es ist zu sehen, dass die Wirkleistung sich am stärksten bei einem Winkel von 90° verändern lässt und bei 0° nahezu unverändert bleibt. Bei der Blindleistung verhält es sich gerade umgekehrt mit dem Maximum bei 0° und dem Minimum bei 90° . Der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene des Transformators 1 ändert sich entsprechend zur Blindleistung, wodurch man einen direkten Zusammenhang zwischen diesen beiden feststellen kann.

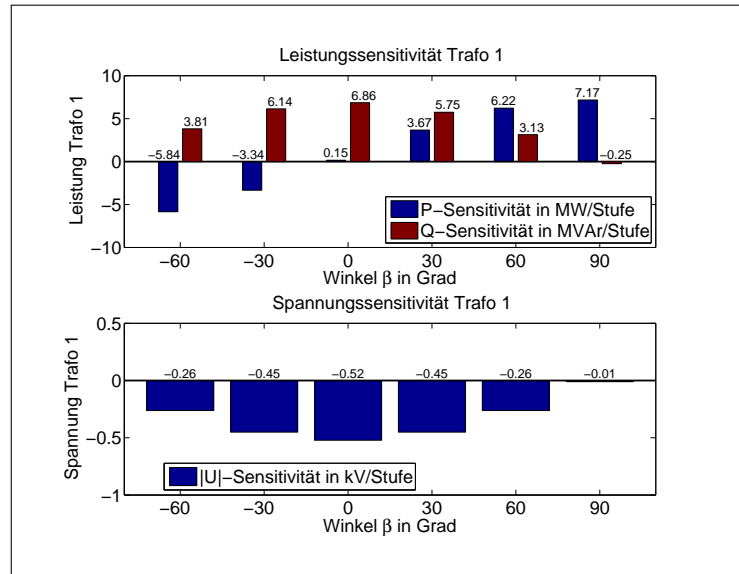


Abbildung 6.4.: Leistungs- und Spannungssensitivität des Transformators 1

Will man sowohl im Wirk- als auch im Blindleistungsbe- reich einen möglichst großen Bereich abdecken, so empfiehlt es sich nicht eine Regelung mit 0° oder 90° zu realisieren, sondern eine Schrägregelung. Daher sind die Winkel $\pm 60^\circ$ (größerer Wirkleistungsbereich) oder $\pm 30^\circ$ (größerer Blindleistungsbereich) am besten geeignet um einen möglichst großen Wirk-/ Blindleistungsregelbereich zu erhalten.

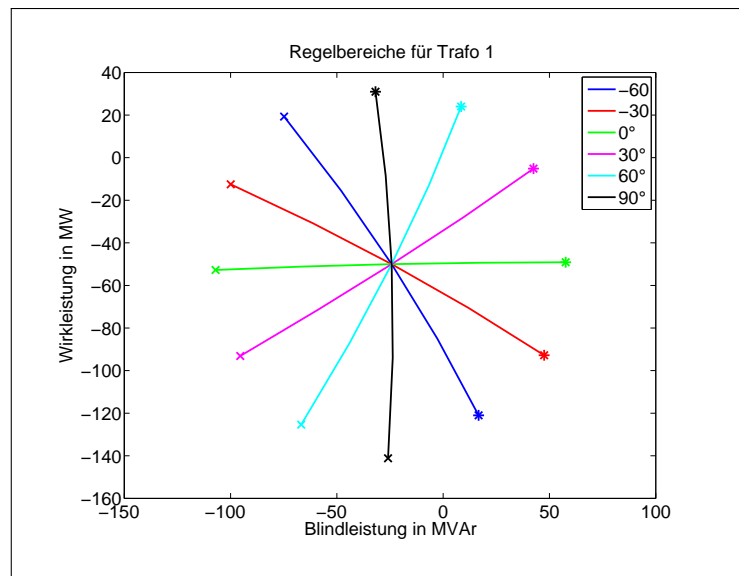


Abbildung 6.5.: Regelbereiche des Transformators 1

Sind die Leitungen sehr niederohmig, so treten praktisch keine Leitungsverluste auf, wodurch die Gesamtwirkleistung im 110-kV-Netz von der Stufenstellung unabhängig ist.

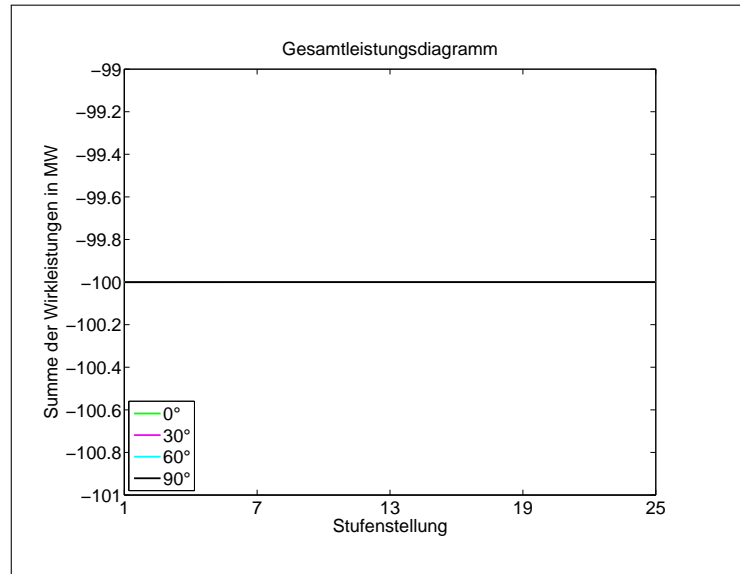


Abbildung 6.6.: Gesamtwirkleistung im 110-kV-Netz

Abschätzung der Wirkleistungssensitivität für $\beta = 90^\circ$

$$Z_{ges} = Z_1 + Z_2 + Z_{Tr} = 0,4 + j \cdot 16 \Omega \quad (6.1)$$

$$Re\{\Delta I\} = \frac{\Delta U}{Z_{ges}} = \frac{12 \cdot j \cdot 0,59 \text{ kV}}{0,4 + j \cdot 16 \Omega} = 0,44 \text{ kA} \quad (6.2)$$

$$\frac{\Delta P}{Stufe} = \frac{3 \cdot U \cdot Re\{\Delta I\}}{Stufen} = \frac{3 \cdot 64 \text{ kV} \cdot 0,44 \text{ kA}}{12} = 7 \frac{\text{MW}}{\text{Stufe}} \quad (6.3)$$

Z_{ges} Gesamtimpedanz

Z_1, Z_2 Leitungsimpedanz

Z_{Tr} Transformatorgesamtimpedanz

$Im\{\Delta I\}$ Änderung des Imaginärteils des Zusatzstromes

ΔU Änderung der Phasenspannung

U Phasenspannung

Aus den Ergebnissen kann man erkennen, dass die Simulationsergebnisse und die Berechnungsergebnisse für die Wirkleistungssensitivität bei $\beta = 90^\circ$ näherungsweise übereinstimmen.

6.2. Leitungen ohmsch-induktiv

Die Leitungen sind bei einer Impedanz von $0,1 + j \cdot 0,4 \Omega/\text{km}$ und einer Länge von je 100km ohmsch-induktiv und entsprechen einer typischen 110-kV-Hochspannungsleitung. Durch die höhere Leitungsimpedanz wirken sich die Impedanzen der Transformatoren weniger auf die Lastflussregelung aus als bei 6.1.

Durch den vermehrten Wirkanteil der Impedanz, erfolgt eine Verschiebung des maximalen Wirkleistungsregelbereiches hin zu einem Winkel von 60° . Die Krümmungen der Wirkleistungskurven ergeben sich durch die entsprechenden Wirkleistungsverluste über die Leitungen.

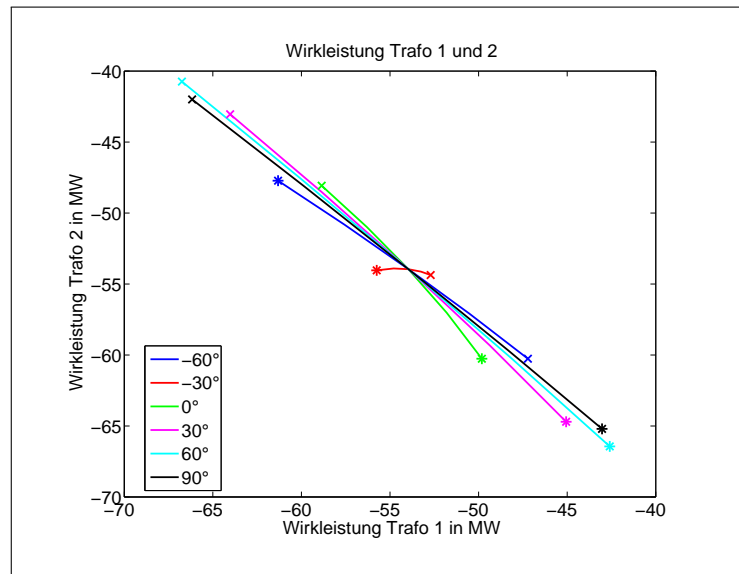


Abbildung 6.7.: Wirkleistung über Transformator 1 und 2

Die Blindleistung lässt sich nach wie vor am besten über eine Längsregelung beeinflussen, allerdings lassen sich mit einer Schrägregelung von $\pm 30^\circ$ ähnliche Regelbereiche erreichen. Die Krümmung der Kurve ergibt sich durch die Änderung des Blindleistungsbedarfs der Leitungen.

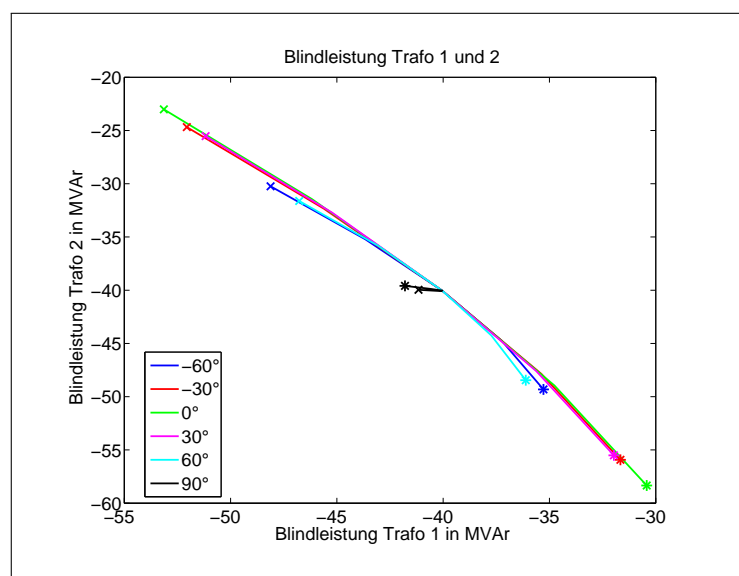


Abbildung 6.8.: Blindleistung über Transformator 1 und 2

Es ist zu erkennen, dass sich die Sensitivitätsmaxima bezüglich der Blindleistung, im Vergleich zu Abbildung 6.4, praktisch nicht ändern. Im Gegensatz dazu verändert sich das Maximum der Wirkleistungssensitivität hin zu einem Winkel von 60° , welches durch die ohmsch-induktive Leitungsimpedanz erklärbar ist.

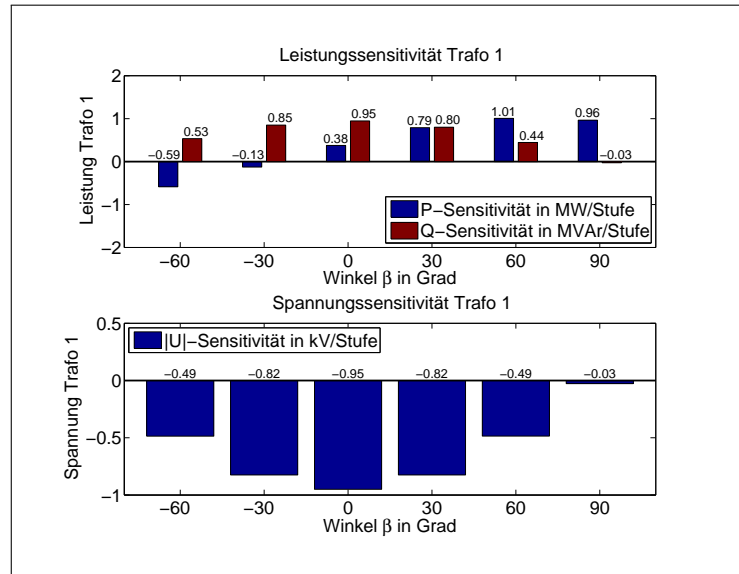


Abbildung 6.9.: Leistungs- und Spannungssensitivität des Transformators 1

Aus Abbildung 6.10 ist zu erkennen, dass eine Schrägregelung mit 30° einen maximalen Regelbereich bezüglich Blind- / Wirkleistung aufweist. Soll ein möglichst großer Wirkleistungsregelbereich erreicht werden, so ist ein Winkel von 60° eine Variante.

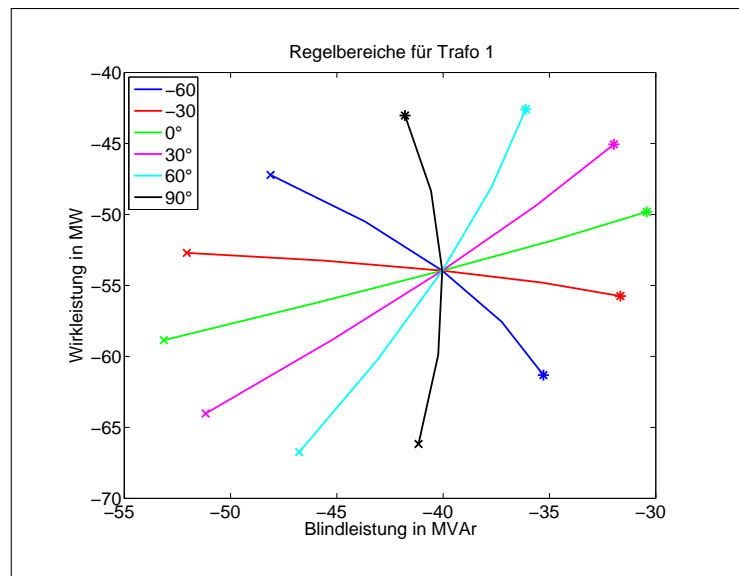


Abbildung 6.10.: Regelbereiche des Transformators 1

Es ist zu erkennen, dass sich die Leitungsverluste durch den Spannungswinkel und die Stufenstellung beeinflussen lassen. Dies ist auf zwei Effekte zurückzuführen.

1. Effekt: Durch die Erhöhung des Betrages der Spannung sinken die Ströme und Verluste.

2. Effekt: Die Ströme teilen sich unterschiedlich auf die Leitungen auf, wodurch die Verluste steigen, da die Leitungsverluste zum Quadrat der Leitungsströme sind.

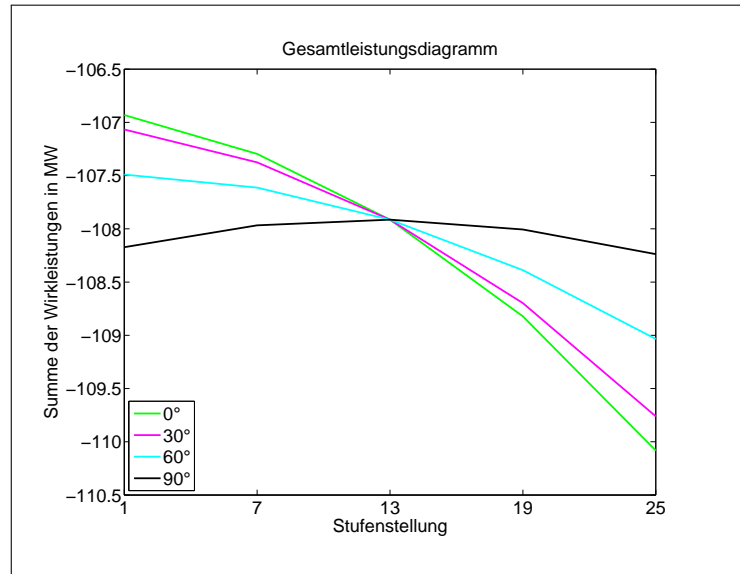


Abbildung 6.11.: Gesamtwirkleistung im 110-kV-Netz

Abschätzung der Wirkleistungssensitivität für $\beta = 90^\circ$

$$Z_{ges} = Z_1 + Z_2 + Z_{Tr} = 20,4 + j \cdot 96 \Omega \quad (6.4)$$

$$Re\{\Delta I\} = \frac{\Delta U}{Z_{ges}} = \frac{12 \cdot j \cdot 0,59 \text{ kV}}{20,4 + j \cdot 96 \Omega} = 0,07 \text{ kA} \quad (6.5)$$

$$\frac{\Delta P}{Stufe} = \frac{3 \cdot U \cdot Re\{\Delta I\}}{Stufen} = \frac{3 \cdot 64 \text{ kV} \cdot 0,07 \text{ kA}}{12} = 1,1 \frac{\text{MW}}{\text{Stufe}} \quad (6.6)$$

Z_{ges} Gesamtimpedanz

Z_1, Z_2 Leitungsimpedanz

Z_{Tr} Transformatorgesamtimpedanz

$Im\{\Delta I\}$ Änderung des Imaginärteils des Zusatzstromes

ΔU Änderung der Phasenspannung

U Phasenspannung

Aus den Ergebnissen kann man erkennen, dass die Simulationsergebnisse und die Berechnungsergebnisse für die Wirkleistungssensitivität bei $\beta = 90^\circ$ näherungsweise übereinstimmen.

6.3. Leitungen ohmsch

Um die Auswirkung der Leitungsimpedanz vollständig zu untersuchen, wird auch der für Hochspannungsleitungen eher theoretische Fall einer rein ohmschen Leitung untersucht. Die Leitungsparameter wurden mit $0,1\Omega/\text{km}$ und einer Länge von je 100km angenommen. Somit verhält sich das Leitungs-Transformator-System ohmsch-induktiv, wobei der ohmsche Anteil dominierend ist.

Die Wirkleistungssimulation zeigt, dass durch das ohmsche Verhalten der Leitungen die Wirkleistungsregelung sehr stark beeinflusst wird. Dadurch ist der größte Regelbereich, bezüglich der Wirkleistung, mit einem Winkel von 30° erreichbar. Die Krümmungen der Kurven ergeben sich durch die Wirkleistungsverluste über die Leitungen.

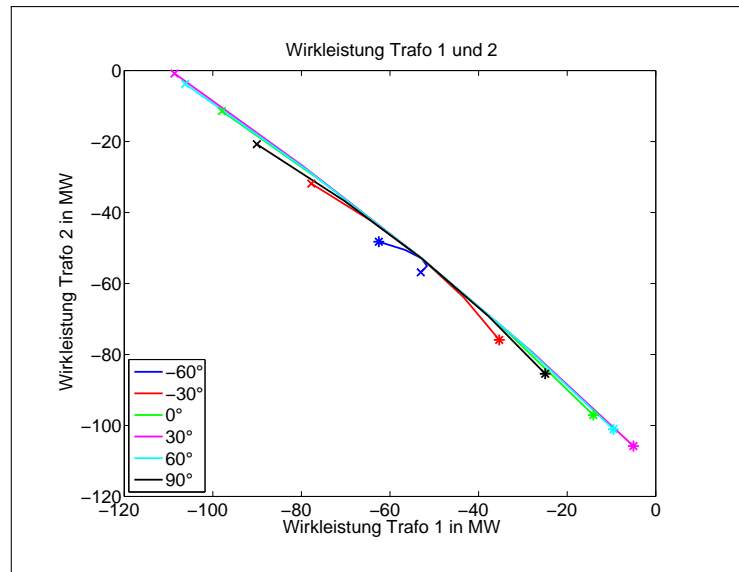


Abbildung 6.12.: Wirkleistung über Transformator 1 und 2

Die maximale Regelbarkeit der Blindleistung ist bei einem Winkel, welcher um 90° zum Winkel der maximalen Wirkleistungsregelung verschoben ist. Daher liegt dieser in diesem Fall bei -60° . Da hierbei die Leitungen rein ohmsch sind nehmen diese keine Blindleistung auf, wodurch über die Transformatoren lediglich die Blindleistung der beiden Lasten gedeckt werden muss.

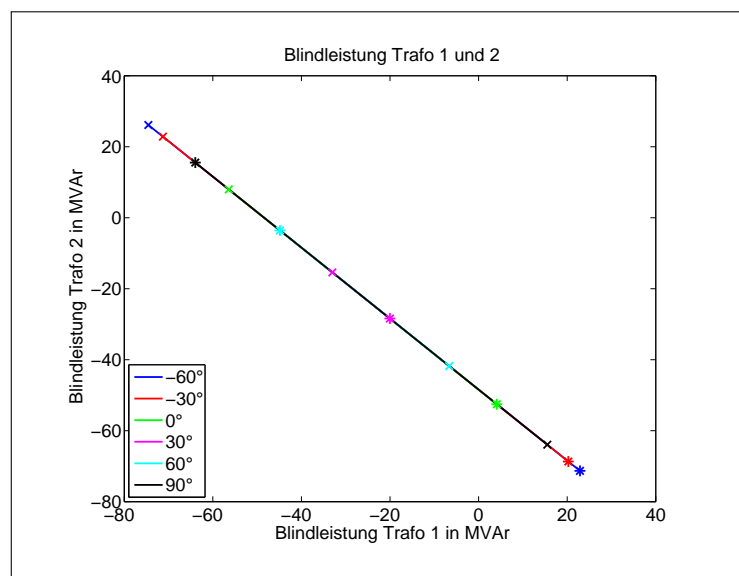


Abbildung 6.13.: Blindleistung über Transformator 1 und 2

Die Abbildung 6.14 zeigt, dass, bei einer rein ohmschen Leitung, eine Betragsänderung der Spannung zu keinem direkten Einfluss der Wirk- oder Blindleistung, wie es bei einer rein induktiven Leitung der Fall ist, kommt. Daher ändert, je nach Winkel, der Betrag der Spannung die Wirk- und/oder Blindleistung.

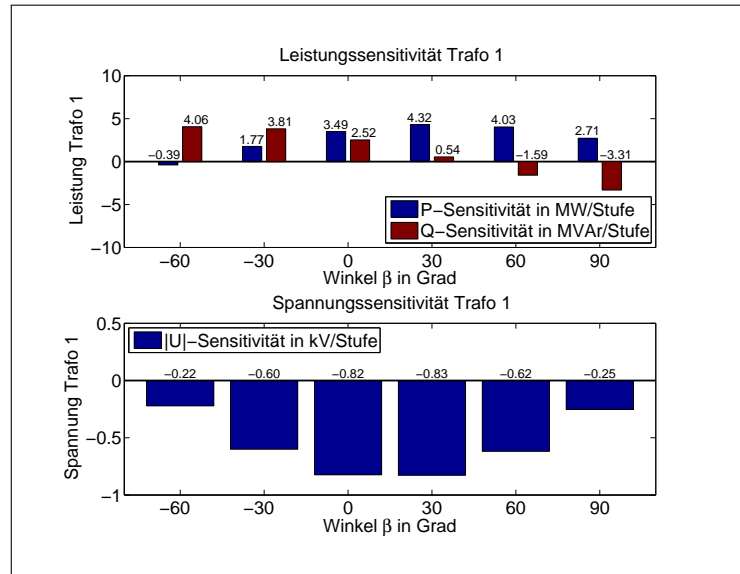


Abbildung 6.14.: Leistungs- und Spannungssensitivität des Transformators 1

Der größtmögliche Regelbereich tritt bei diesem Szenario bei einem Zusatzspannungswinkel von 0° auf. Wird der Winkel erhöht, so vergrößert sich der Wirkleistungs- und vermindert sich der Blindleistungsbereich. Ab einem Winkel von 30° nimmt dieses Verhalten wieder ab und kehrt sich, bis zu einem Winkel von -60° um.

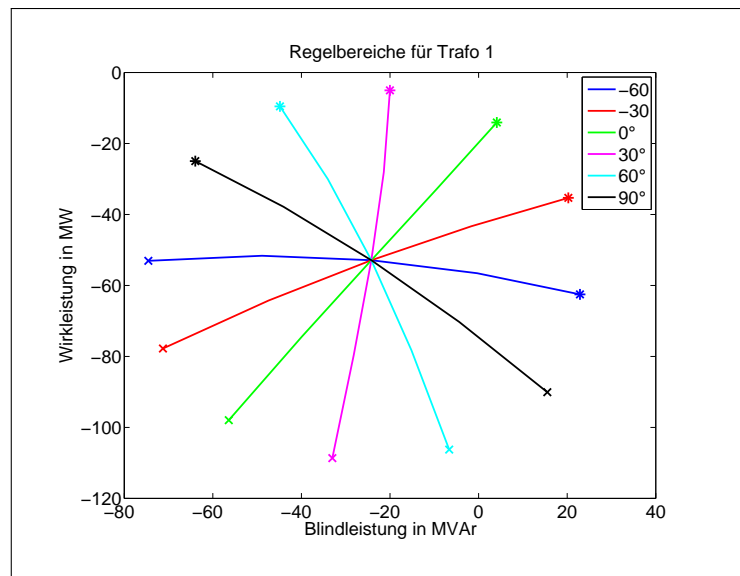


Abbildung 6.15.: Regelbereiche des Transformators 1

Es ist zu erkennen, dass sich die Leitungsverluste durch den Spannungswinkel und die Stufenstellung beeinflussen lassen. Dies ist auf zwei Effekte zurückzuführen.

1. Effekt: Durch die Erhöhung des Betrages der Spannung sinken die Ströme und Verluste.

2. Effekt: Die Ströme teilen sich unterschiedlich auf die Leitungen auf, wodurch die Verluste steigen, da die Leitungsverluste zum Quadrat der Leitungsströme sind.

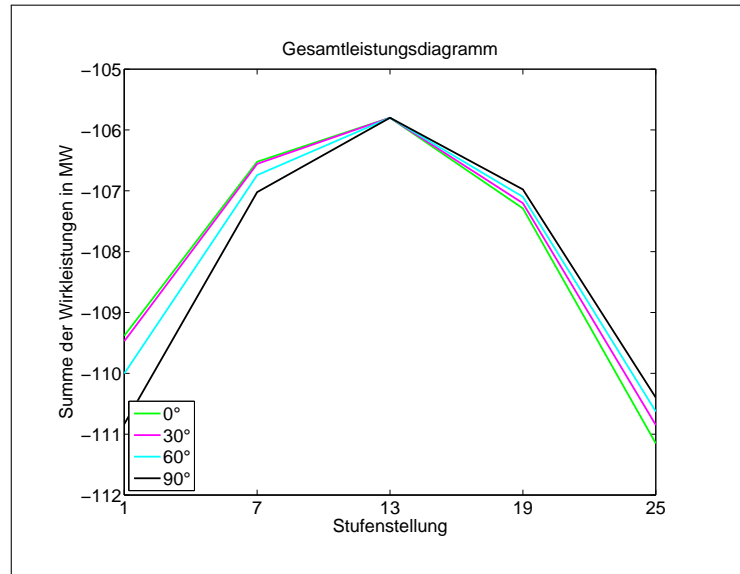


Abbildung 6.16.: Gesamtwirkleistung im 110-kV-Netz

Abschätzung der Wirkleistungssensitivität für $\beta = 90^\circ$

$$Z_{ges} = Z_1 + Z_2 + Z_{Tr} = 20,4 + j \cdot 16 \Omega \quad (6.7)$$

$$Re\{\Delta I\} = \frac{\Delta U}{Z_{ges}} = \frac{12 \cdot j \cdot 0,59 \text{ kV}}{20,4 + j \cdot 16 \Omega} = 0,17 \text{ kA} \quad (6.8)$$

$$\frac{\Delta P}{Stufe} = \frac{3 \cdot U \cdot Re\{\Delta I\}}{Stufen} = \frac{3 \cdot 64 \text{ kV} \cdot 0,17 \text{ kA}}{12} = 2,7 \frac{\text{MW}}{\text{Stufe}} \quad (6.9)$$

Z_{ges} Gesamtimpedanz

Z_1, Z_2 Leitungsimpedanz

Z_{Tr} Transformatorgesamtimpedanz

$Im\{\Delta I\}$ Änderung des Imaginärteils des Zusatzstromes

ΔU Änderung der Phasenspannung

U Phasenspannung

Aus den Ergebnissen kann man erkennen, dass die Simulationsergebnisse und die Berechnungsergebnisse für die Wirkleistungssensitivität bei $\beta = 90^\circ$ näherungsweise übereinstimmen.

6.4. Leitungen induktiv

Als vereinfachtes Modell kann eine Hochspannungsleitung als rein induktiv betrachtet werden. In dieser Simulation werden die Leitungen mit einer Impedanz von $j \cdot 0,4\Omega/\text{km}$ und einer Länge von je 100km gewählt.

Aus Abbildung 6.17 ist zu erkennen, dass der Regelbereich der Wirkleistung für die Winkel 90° und 60° annähernd gleich groß sind. Die Unterschiede zu Abbildung 6.2 sind dadurch erklärbar, dass der Spannungszeiger an der 110-kV-Sammelschiene an der Last 1 durch die höhere Leitungsimpedanz einen höheren Winkel aufweist.

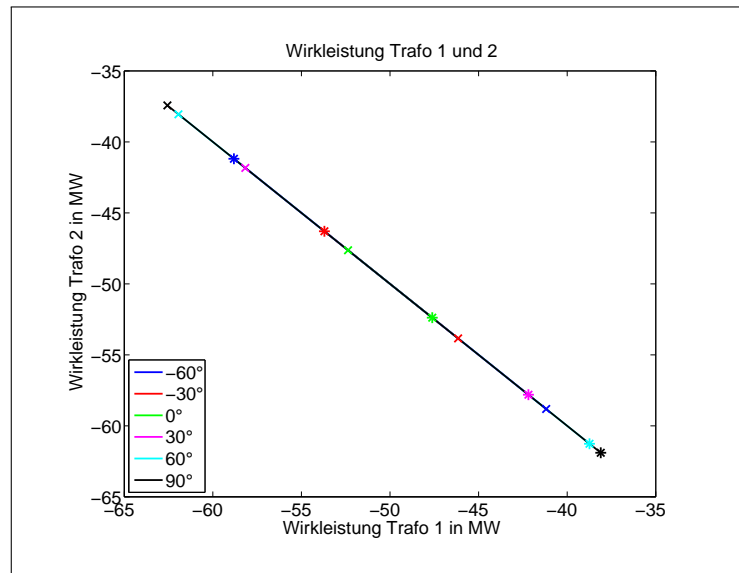


Abbildung 6.17.: Wirkleistung über Transformator 1 und 2

Die Blindleistung lässt sich am besten mit dem Winkel 0° regeln, allerdings ist auch mit 30° ein sehr großer Regelbereich zu erreichen. Die Krümmungen der Blindleistungskurven kommen durch den Blindleistungsbedarf der beiden 100km langen Leitungen zustande, welche diesen über die beiden Transformatoren decken.

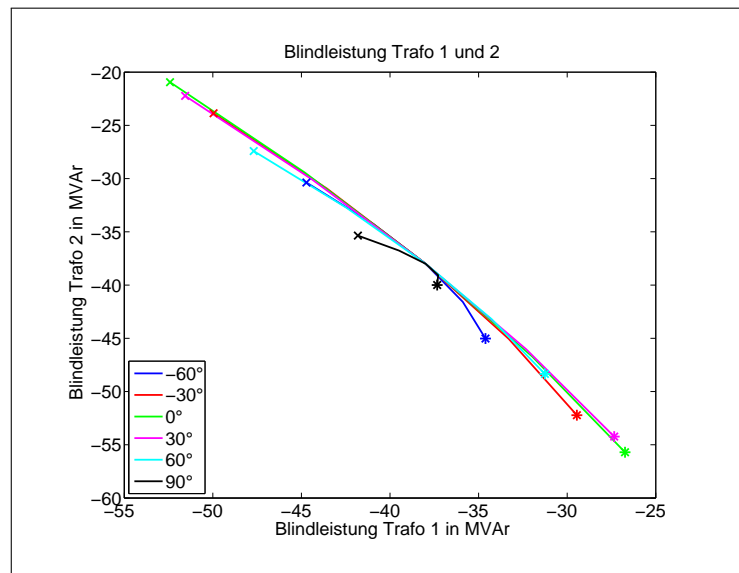


Abbildung 6.18.: Blindleistung über Transformator 1 und 2

Die Sensitivitäten der einzelnen Winkel sind in einem sehr ähnlichen Verhältnis zu einander wie in Abbildung 6.4. Durch die Betragsänderung der Spannung ändert sich im gleichen Verhältnis die Blindleistung, wodurch der direkte Zusammenhang zwischen beiden gezeigt werden kann.

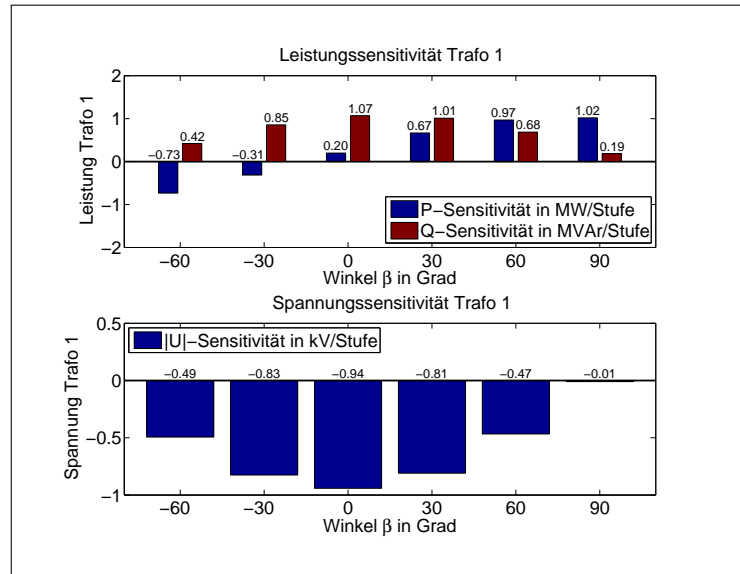


Abbildung 6.19.: Leistungs- und Spannungssensitivität des Transformators 1

Bei einer rein induktiven Leitung wird durch eine Schrägregelung mit 60° ein möglichst großer Leistungsbereich abgedeckt. Soll ein vermehrtes Augenmerk auf die Blindleistungsregelung gelegt werden, so bietet sich ein Winkel von 30° an.

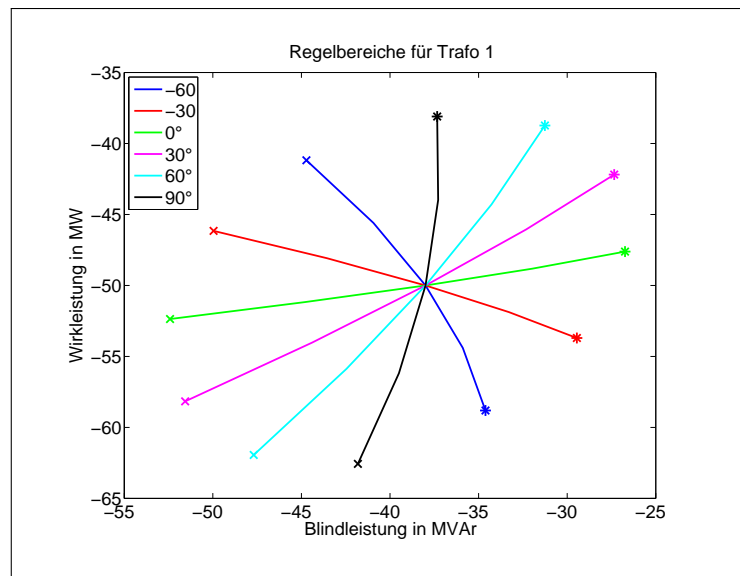


Abbildung 6.20.: Regelbereiche des Transformators 1

Da die Leitungen keinen Wirkwiderstand aufweisen, entstehen auch keine Wirkleistungsverluste. Die Gesamtwirkleistung im 110-kV-Netz ist vom Spannungswinkel und der Stufenstellung unabhängig.

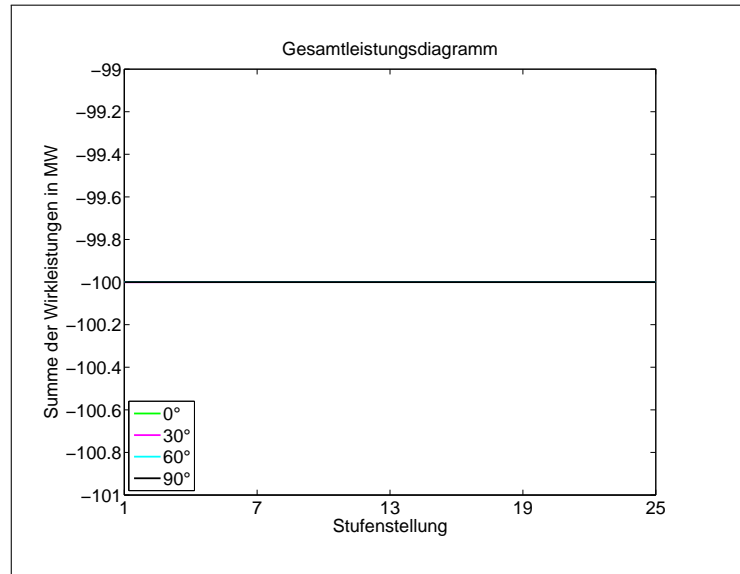


Abbildung 6.21.: Gesamtwirkleistung im 110-kV-Netz

Abschätzung der Wirkleistungssensitivität für $\beta = 90^\circ$

$$Z_{ges} = Z_1 + Z_2 + Z_{Tr} = 0,4 + j \cdot 96 \Omega \quad (6.10)$$

$$Re\{\Delta I\} = \frac{\Delta U}{Z_{ges}} = \frac{12 \cdot j \cdot 0,59 \text{ kV}}{0,4 + j \cdot 96 \Omega} = 0,07 \text{ kA} \quad (6.11)$$

$$\frac{\Delta P}{Stufe} = \frac{3 \cdot U \cdot Re\{\Delta I\}}{Stufen} = \frac{3 \cdot 64 \text{ kV} \cdot 0,07 \text{ kA}}{12} = 1,1 \frac{\text{MW}}{\text{Stufe}} \quad (6.12)$$

Z_{ges} Gesamtimpedanz

Z_1, Z_2 Leitungsimpedanz

Z_{Tr} Transformatorgesamtimpedanz

$Im\{\Delta I\}$ Änderung des Imaginärteils des Zusatzstromes

ΔU Änderung der Phasenspannung

U Phasenspannung

Aus den Ergebnissen kann man erkennen, dass die Simulationsergebnisse und die Berechnungsergebnisse für die Wirkleistungssensitivität bei $\beta = 90^\circ$ näherungsweise übereinstimmen.

6.5. Wirkleistungsregelbarkeit

| Spannungs- regelung Trafo | Leitungsimpedanz | | | | |
|---------------------------------|------------------|-------------|-----------------|--------|----------|
| | Winkel β | niederohmig | ohmsch-induktiv | ohmsch | induktiv |
| | -60° | 140MW | 14MW | 9MW | 18MW |
| | -30° | 80MW | 3MW | 42MW | 8MW |
| | 0° | 4MW | 9MW | 84MW | 5MW |
| | 30° | 88MW | 19MW | 104MW | 16MW |
| | 60° | 149MW | 24MW | 97MW | 23MW |
| | 90° | 172MW | 23MW | 65MW | 24MW |

Tabelle 6.1.: maximale Änderung der Wirkleistung am Tr. 1 bei unterschiedlichen Leitungsimpedanzen

Bei der Untersuchung der Regelbarkeit von Lastflüssen ist das Verhältnis zwischen der Transformatorimpedanz und der Leitungsimpedanz zu berücksichtigen. Bei den gegebenen Konfigurationen ist eine Schrägregelung mit 60° bzw. eine Querregelung am besten für die Wirkleistungsregelung geeignet. Wird die Variante "niederohmig", welche nur ein theoretischer Fall ist, nicht beachtet wird, so eignet sich der Winkel 60° am besten für die Regelung der Wirkleistung.

6.6. Blindleistungsregelbarkeit

| Spannungs- regelung Trafo | Leitungsimpedanz | | | | |
|---------------------------------|------------------|-------------|-----------------|--------|----------|
| | Winkel β | niederohmig | ohmsch-induktiv | ohmsch | induktiv |
| | -60° | 92MVar | 13MVar | 97MVar | 10MVar |
| | -30° | 147MVar | 20MVar | 92MVar | 21MVar |
| | 0° | 165MVar | 23MVar | 61MVar | 26MVar |
| | 30° | 138MVar | 19MVar | 13MVar | 24MVar |
| | 60° | 75MVar | 11MVar | 38MVar | 16MVar |
| | 90° | 6MVar | 1MVar | 79MVar | 4MVar |

Tabelle 6.2.: maximale Änderung der Blindleistung am Tr. 1 bei unterschiedlichen Leitungsimpedanzen



Die Regelung der Blindleistung erfolgt am effektivsten über eine Schrägregelung mit dem Winkel -30° und 0° . Da die Wirk- und Blindleistung normal auf einander stehen, besteht auch ein Winkel von 90° zwischen den optimalen Schrägreglern für die Blind- ($\beta=-30^\circ$) und Wirkleistung ($\beta=60^\circ$).

7. Vereinfachtes Modell ohne VIS

Im vereinfachten Modell des 110-kV-Netzes soll untersucht werden, ob die Ergebnisse der Lastflusssimulationen mit den Ergebnissen aus dem vollständigen Modell bei Starklast näherungsweise übereinstimmen. Dabei wird das 110-kV-Netz zu sieben Knotenpunkten zusammengefasst. Die Leistungen der Kraftwerke und Lasten entsprechen den Werten des 99%-Quantils, welche aus den KNG-Messdaten des Jahres 2010 bestimmt werden. Die Leitungsimpedanzen des vereinfachten Modells entsprechen den Impedanzen des vollständigen 110-kV-Netzes. In Abbildung 7.1 sind die Leitungsimpedanzen des vereinfachten Modells ersichtlich. Das hinterlagerte Modell des 220-kV-Netzes entspricht jenem des vollständigen Modells und ist somit einem realen 220-kV-Netz nachgebildet.

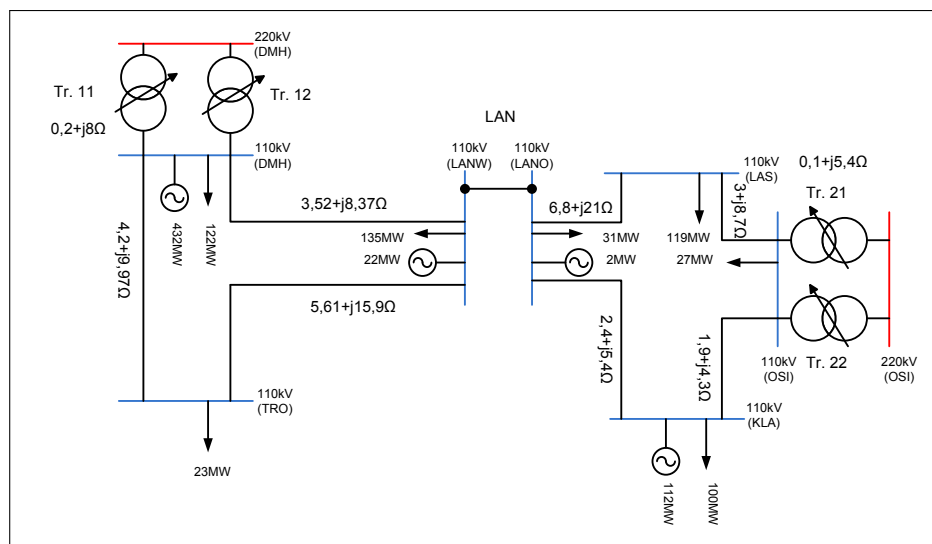


Abbildung 7.1.: Einpoliges Ersatzschaltbild des vereinfachten Modells ohne VIS

In den folgenden Simulationen erfolgt die Regelung der Transformatoren primärseitig und für die parallel betriebenen Transformatoren jeweils synchron. Die Transformatoren in DMH weisen eine Leistung von je 200MVA auf, wodurch sie eine Impedanz von je $0,2+j8\Omega$ haben. In OSI sind Transformatoren mit einer Nennleistung von je 300MVA ausgestattet und der entsprechenden Impedanz von $0,1+j5,4\Omega$. Zu untersuchende Varianten:

- Regelung in DMH
- Regelung in OSI
- Regelung in DMH und OSI

7.1. Regelung in DMH

Die Regelung erfolgt über die Transformatoren 11 und 12 in DMH, mit den Stufenstellungen 1 (Minimum), 7, 13 (Mittelstellung), 19 und 25 (Maximum) bei je einem Winkel (β) von -60° , -30° , 0° , 30° , 60° und 90° . In den Lastflussimulationen wird die Stufenstellung 1 als \times und 25 als $*$ markiert. Die Transformatoren 21 und 22 in OSI werden in Mittelstellung betrieben.

Da die Leitungen alle ohmsch-induktiv sind, lässt sich die Wirkleistung am besten bei einem Regelwinkel von 60° bzw. 90° regeln. Dabei kann der Wirkleistungsfluss um etwa $\pm 60\text{MW}$ verändert werden, wodurch, im Extremfall, nahezu keine Wirkleistung über die Transformatoren in DMH und OSI bezogen werden muss. Wird die Wirkleistung nicht geregelt, gibt es einen Leistungsdurchzug von OSI nach DMH. Hierbei wird die Wirkleistung über OSI bezogen und in DMH wieder aus dem 110-kV-Netz ausgespeist.

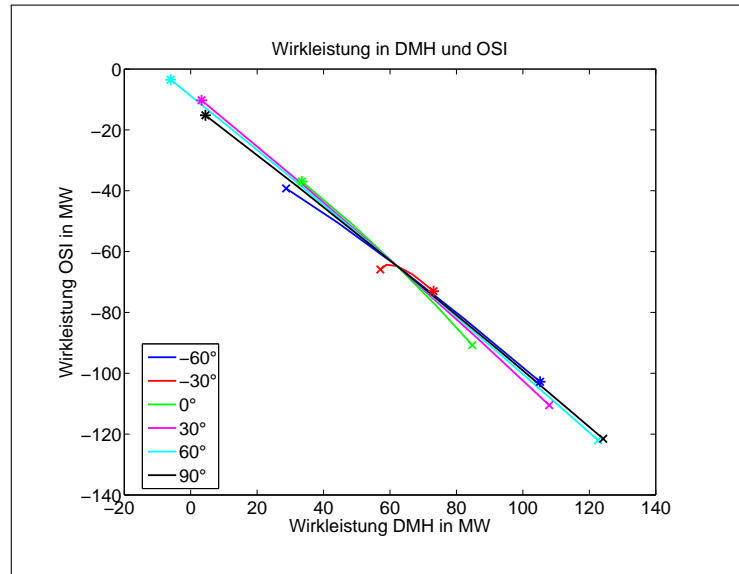


Abbildung 7.2.: Wirkleistungstransfer in DMH und OSI

Die Blindleistung lässt sich mit den Winkeln 60° und 90° nur gering regeln. Um die Regelung effektiv zu gestalten müsste ein Winkel von 0° oder -30° gewählt werden. Die Blindleistung kann im Gegensatz zur Wirkleistung nicht durch das 110-kV-Netz gedeckt werden, da die Einspeiser aus Gründen der Spannungshaltung größtenteils nur Wirkleistung liefern und der Blindleistungsbedarf der Leitungen und Lasten muss über die Transformatoren durch das Höchstspannungsnetz gedeckt werden.

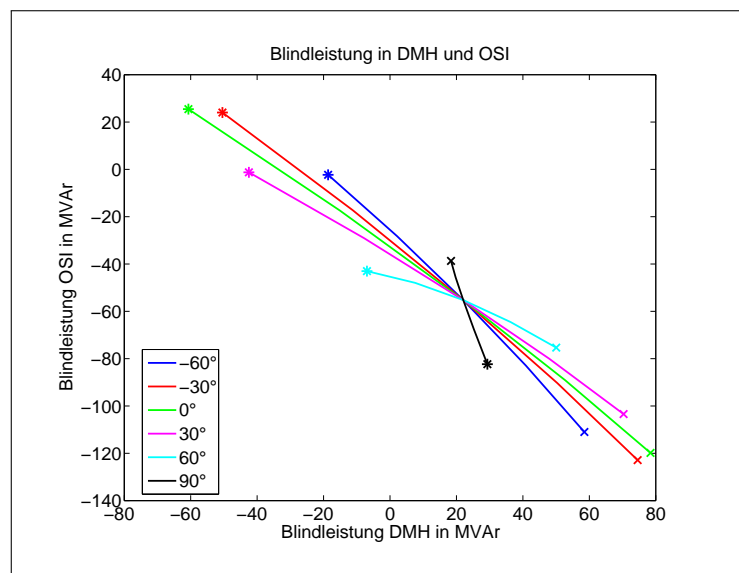


Abbildung 7.3.: Blindleistungstransfer in DMH und OSI

Die Wirkleistungssensitivitäten aus der Abbildung 7.4 zeigen, dass sie sich zwischen den Winkeln 60° und 90° nur in geringem Maße unterscheiden, allerdings bei der 60° Regelung auch die Blindleistungssensitivität mit $2,37 \text{ MVar/Stufe}$ im höheren Bereich liegt.

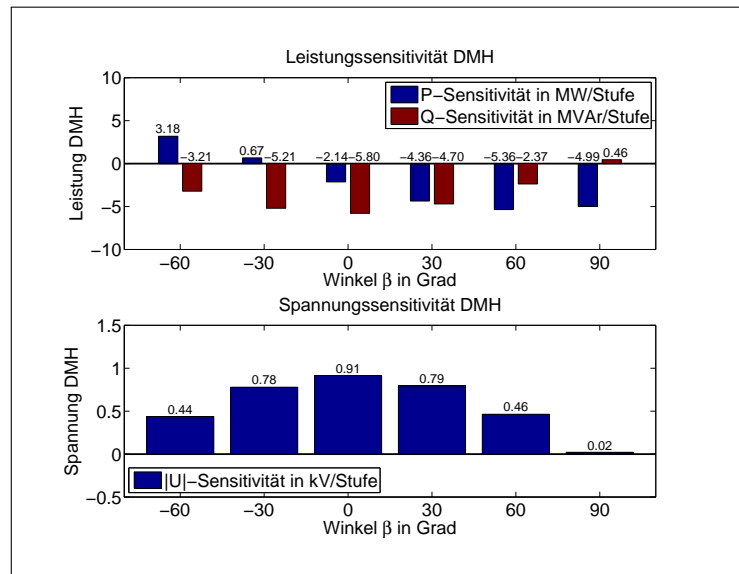


Abbildung 7.4.: Leistungs- und Spannungssensitivität in DMH

In Abbildung 7.4 ist zu sehen, dass für eine optimale Wirkleistungsregelung eine 60° Schrägregelung die beste Variante ist. Außerdem ist hierbei auch noch ein entsprechender Anteil an Blindleistung regelbar. Bei 30° gibt es zwar die größte Regelbarkeit bezüglich Blind-/ Wirkleistung, allerdings ist dies nur bedingt zu empfehlen, da die wichtige Wirkleistungsregelbarkeit geringer als bei 60° ist.

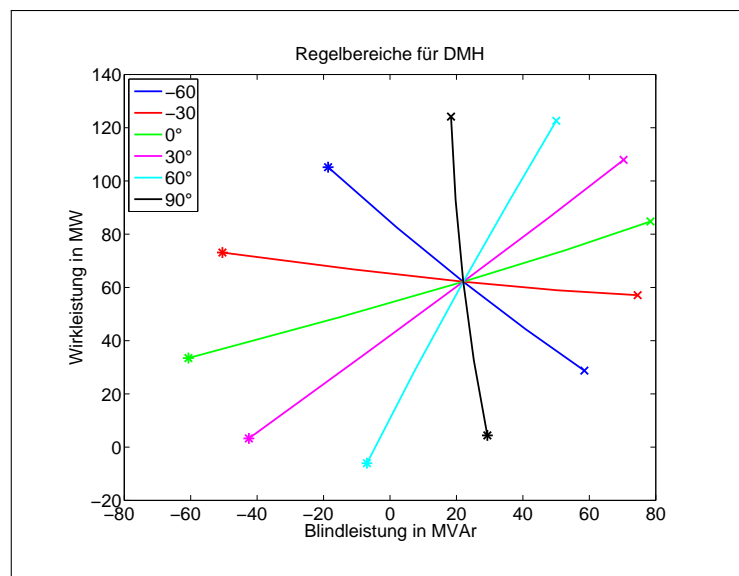


Abbildung 7.5.: Regelbereiche in DMH

7.2. Regelung in OSI

Die Regelung erfolgt über die Transformatoren 21 und 22 in OSI, mit den Stufenstellungen 1 (Minimum), 7, 13 (Mittelstellung), 19 und 25 (Maximum) bei je einem Winkel (β) von -60° , -30° , 0° , 30° , 60° und 90° . In den Lastflussimulationen wird die Stufenstellung 1 als \times und 25 als $*$ markiert. Die Transformatoren 11 und 12 in DMH werden in Mittelstellung betrieben.

Die Wirkleistung lässt sich am besten mit der Querregelung regeln. Dabei kann der Wirkleistungslastfluss in OSI um etwa 100MW verschoben werden.

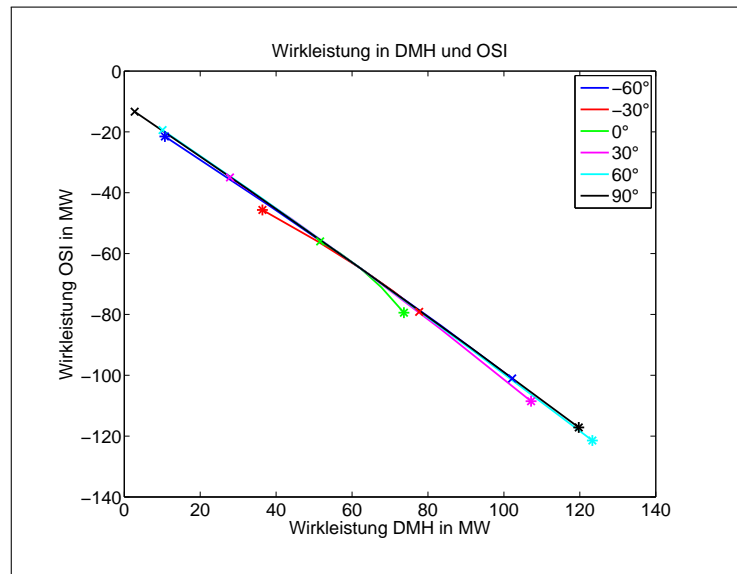


Abbildung 7.6.: Wirkleistungstransfer in DMH und OSI

Um die Regelung effektiv zu gestalten müsste ein Winkel von 0° oder -30° gewählt werden. Die Blindleistung kann im Gegensatz zur Wirkleistung nicht durch das 110-kV-Netz gedeckt werden, da die Einspeiser aus Gründen der Spannungshaltung größtenteils nur Wirkleistung liefern und der Blindleistungsbedarf der Leitungen und Lasten muss über die Transformatoren durch das Höchstspannungsnetz gedeckt werden.

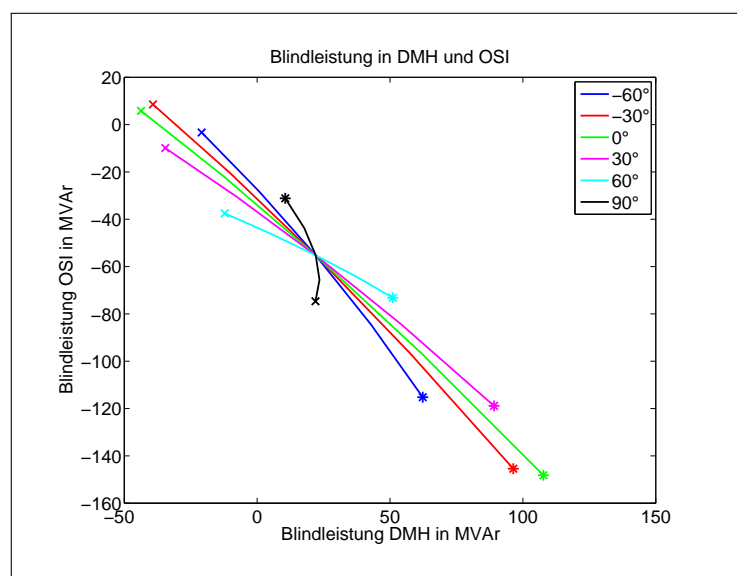


Abbildung 7.7.: Blindleistungstransfer in DMH und OSI

Die Wirkleistungssensitivitäten aus der Abbildung 7.8 zeigen, dass sie sich zwischen den Winkeln 60° und 90° nur in geringem Maße unterscheiden, allerdings bei der 90° Regelung auch die Blindleistungssensitivität mit $1,81 \text{ MVar/Stufe}$ im höheren Bereich liegt.

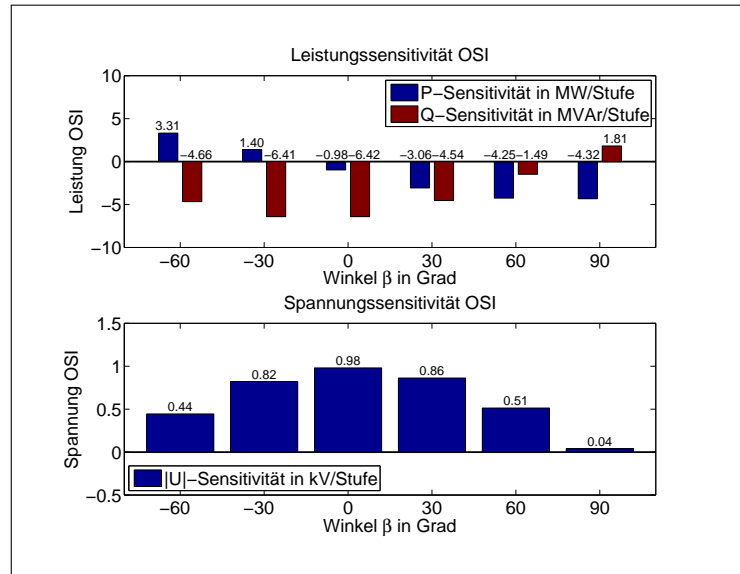


Abbildung 7.8.: Leistungs- und Spannungssensitivität in OSI

In Abbildung 7.9 ist zu sehen, dass für eine optimale Wirkleistungsregelung eine 90° Schrägregelung die beste Variante ist. Außerdem ist hierbei auch noch ein entsprechender Anteil an Blindleistung regelbar.

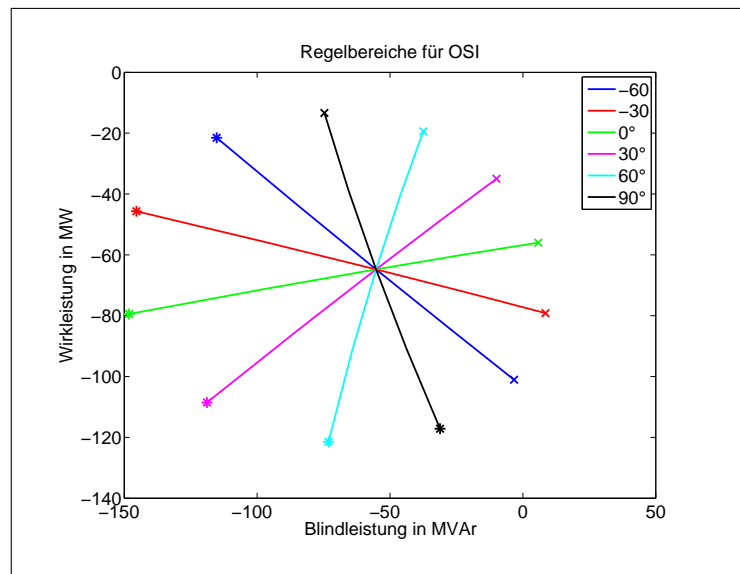


Abbildung 7.9.: Regelbereiche in OSI

7.3. Regelung in DMH und OSI

Um die möglichen maximalen Regelbereiche zu simulieren, werden die Stufensteller der Transformatoren in DMH und OSI gegengleich geregelt. Dabei werden die Transformatoren jeweils im gleichen Regelwinkel (-60° , -30° , 0° , 30° , 60° und 90°) betrieben, allerdings die Stufenstellung wird beispielsweise in DMH in der maximalen Stellung (25) und in OSI in der minimalen (1) gehalten.

Durch die gegengleiche Regelung der Transformatoren in OSI und DMH kann, im Vergleich zur Regelung nur in DMH, der Wirkleistungsregelbereich praktisch verdoppelt werden. Somit kann die Wirkleistung innerhalb eines Bereiches von rund 240MW verschoben werden. Bei entsprechender Stufenstellung kann außerdem der Wirkleistungsfluss über die Transformatoren nahezu unterbunden werden.

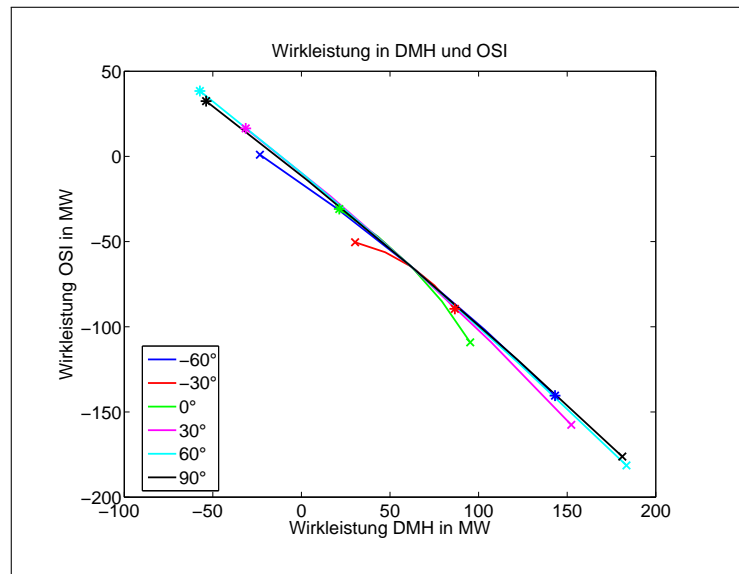


Abbildung 7.10.: Wirkleistungstransfer in DMH und OSI

Die Blindleistungsflüsse verhalten sich ähnlich wie in Abbildung 7.3, mit der Ausnahme dass sich der regelbare Bereich, ähnlich wie schon bei der Wirkleistungsregelung gezeigt, um den Faktor zwei erhöht.

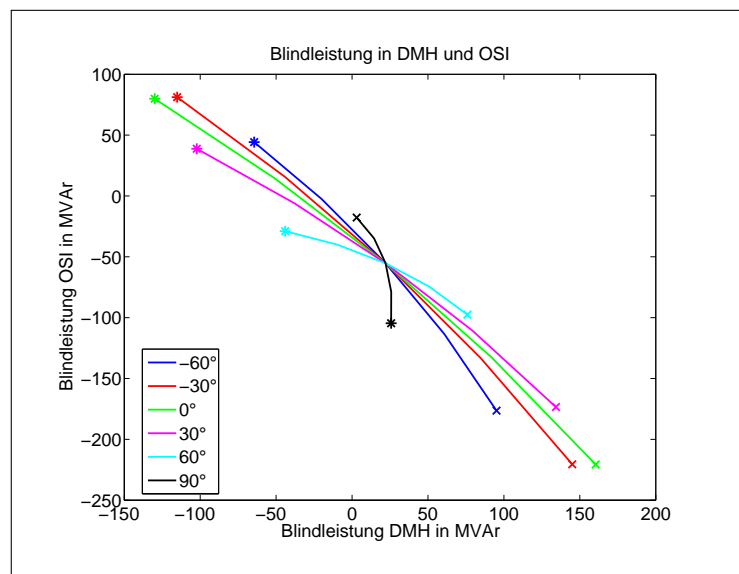


Abbildung 7.11.: Blindleistungstransfer in DMH und OSI

Die Leistungssensitivitäten erreichen wie bereits erklärt ähnliche Verhältnisse zu einander wie in Abbildung 7.4 zu sehen ist. Die Leistungsänderung je Stufenänderung verdoppelt sich allerdings im Mittel gegenüber, wenn nur in DMH geregelt wird.

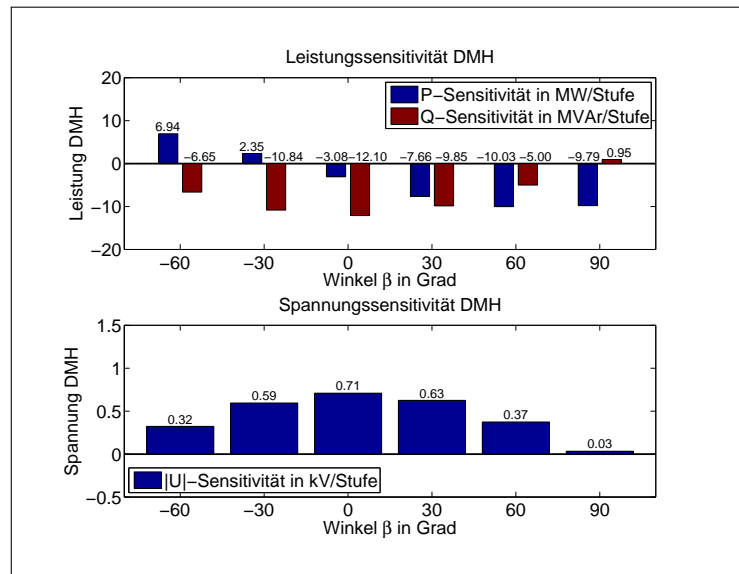


Abbildung 7.12.: Leistungs- und Spannungssensitivität in DMH

Mit der Schrägregelung von 60° ist die Wirkleistung über einen Bereich 240MW und die Blindleistung über 130MVar regelbar, womit gegenüber 90° der Vorteil der größeren Blindleistungsregelbarkeit gegeben ist.

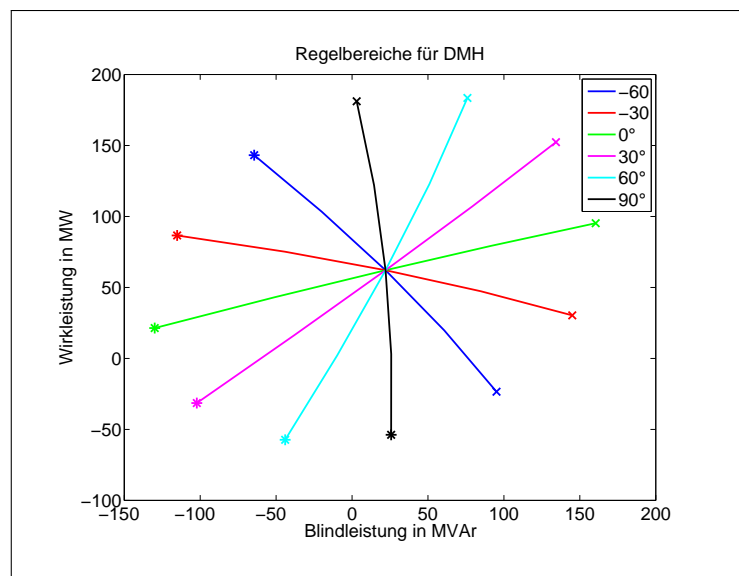


Abbildung 7.13.: Regelbereiche in DMH

Die gleichzeitige Regelung in DMH und OSI führt zu ähnlichen Ergebnissen wie wenn man in DMH und OSI getrennt regelt und die Ergebnisse überlagert. Allerdings ist zu beachten, dass die Leitungsströme jeweils unterschiedlich sind und somit die Leitungsverluste von einander abweichen.

8. Vereinfachtes Modell mit VIS

Im vereinfachten Modell mit VIS soll untersucht werden, wie sich eine zusätzliche 220/110-kV-Abstützung auf den Lastfluss auswirkt und welchen Einfluss die Transformatorregelung zeigt. Die Leitungsparameter sind, wie schon im vereinfachten Modell ohne VIS, aus dem vollständigen Modell abgeleitet. Die Lasten und Generatoren bleiben ebenfalls unverändert. Die einzelnen Werte sind in Abbildung 8.1 eingetragen. Das hinterlagerte Modell des 220-kV-Netzes entspricht jenem des vollständigen Modells und ist somit einem realen 220-kV-Netz nachgebildet.

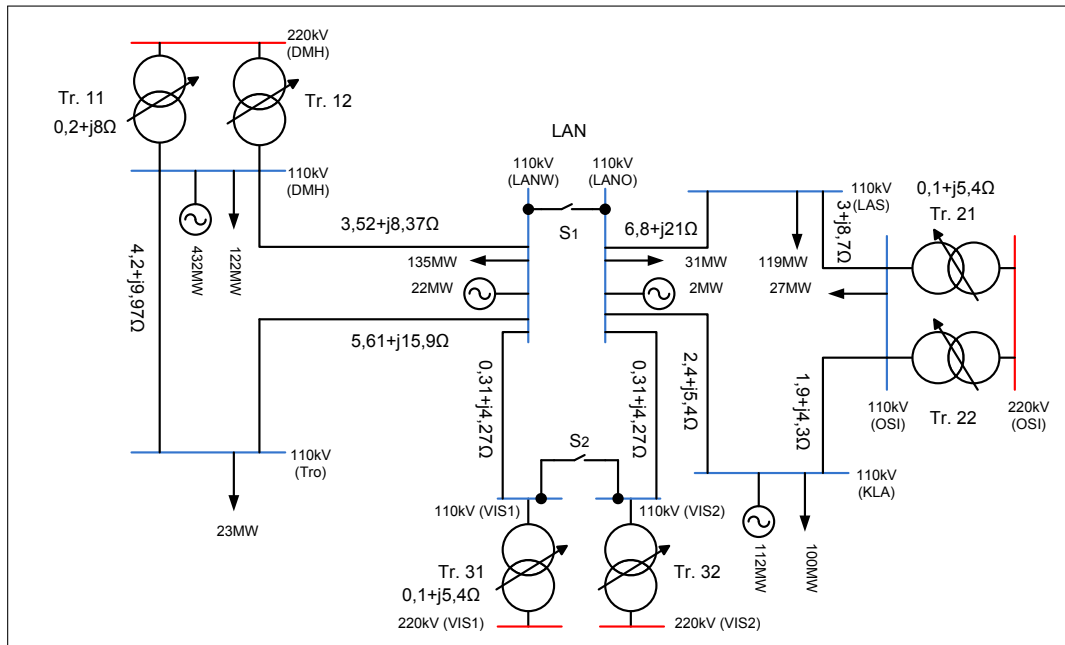


Abbildung 8.1.: Einpoliges Ersatzschaltbild des vereinfachten Modells mit VIS

Die beiden Transformatoren in VIS weisen eine Leistung von je 300MVA auf, wodurch sie eine Impedanz von jeweils $0,1+j5,4\Omega$ haben. Bei den primärseitigen Regelungen werden die Stufenstellungen 1 (Minimum), 7, 13 (Mittelstellung), 19 und 25 (Maximum) bei je einem Winkel (β) von -60° , -30° , 0° , 30° , 60° und 90° verwendet. In den Lastflusssimulationen wird die Stufenstellung 1 als \times und 25 als $*$ markiert.

Bei den Simulationen wurden folgende Varianten untersucht:

- Getrennter Betrieb (S_1 , S_2 geöffnet)
 - Regelung in VIS
 - Regelung in VIS, DMH und OSI
- Gekoppelter Betrieb (S_1 , S_2 geschlossen)
 - Regelung in VIS
 - Regelung in DMH
 - Regelung in OSI

8.1. Netztrennung - Regelung in VIS

Es wird simuliert wie sich der Lastfluss verhält, wenn die Schalter $S1$ und $S2$, in Abbildung 8.1 geöffnet sind und das Netz somit in ein West- und Ostteil auftrennt ist. Die Regelung erfolgt durch die Transformatoren 31 und 32 in VIS. Die restlichen Transformatoren in DMH und OSI befinden sich in Mittelstellung um keinen Einfluss auf die Lastflussregelung zu nehmen.

Westnetz:

Die Wirkleistungsregelung erfolgt am effektivsten bei einer Querregelung. Dabei lässt sich der Lastfluss in VIS1 im Bereich von 110MW regeln. Auffallend ist die starke Asymmetrie bei der Erhöhung und Verringerung der Wirkleistung. Dabei kann die Wirkleistung nicht, bei jedem Winkel, im gleichen Betrag erhöht wie verringert werden. Der Wirkleistungsüberschuss wird, im unregulierten Zustand, größtenteils über die Transformatoren in DMH ins Höchstspannungsnetz transportiert.

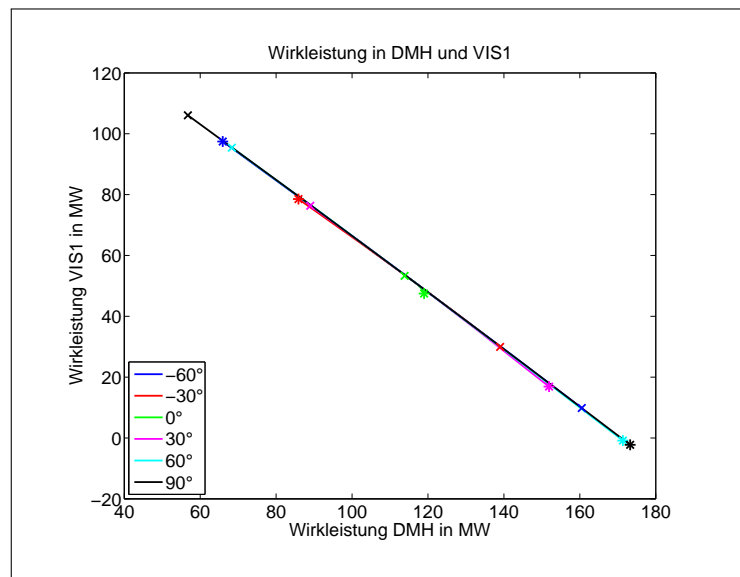


Abbildung 8.2.: Wirkleistungstransfer in DMH und VIS1

In Abbildung 8.3 ist zu sehen, dass bei einer Längsregelung der Blindleistungsregelbereich am größten ist. Auch bei einer Schrägregelung mit $\pm 30^\circ$ sind ähnliche Leistungsbereiche möglich. Über eine Querregelung ist die Blindleistung nur unzureichend regelbar, da die Blindleistung weiterhin über VIS1 bezogen wird und in DMH die Blindleistung faktisch unverändert bleibt.

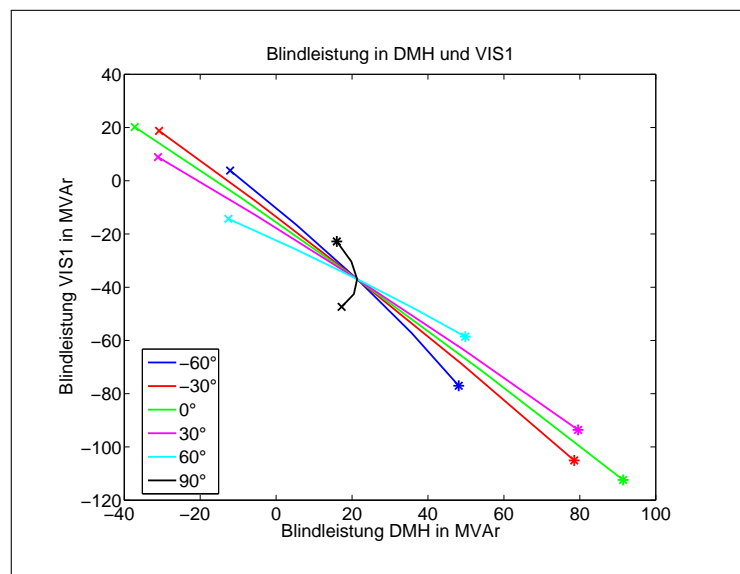


Abbildung 8.3.: Blindleistungstransfer in DMH und VIS1

Die Änderung des Betrages der Spannung steht in direktem Zusammenhang zur Änderung der Blindleistung. Die Blindleistung lässt sich im Idealfall (Längsregelung) um 5,52MVar je Stufe ändern. Die größte Wirkleistungssensitivität wird bei der Querregelung erreicht und liefert einen Wert von 4,51MW je Stufe.

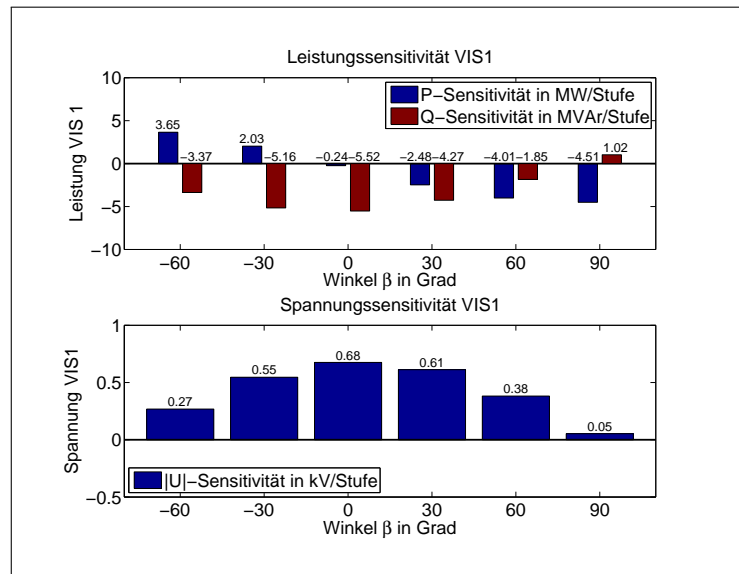


Abbildung 8.4.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS1

Um einen möglichst großen Bereich bezüglich Wirk-/ Blindleistung abdecken zu können, empfiehlt sich eine Schrägregelung mit -60° . Wird bei der Regelung das Hauptaugenmerk allerdings auf die Wirkleistung gelegt, so ist eine Querregelung zu empfehlen.

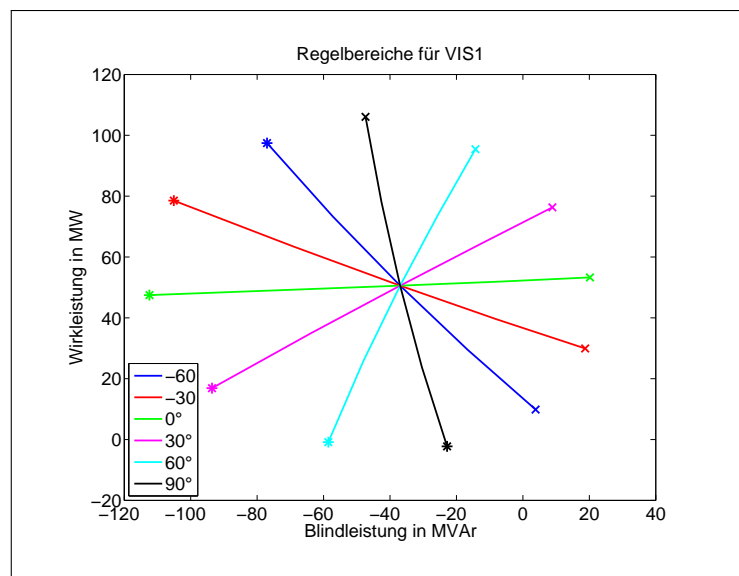


Abbildung 8.5.: Regelbereiche in VIS1

Ostnetz:

Die Wirkleistungsregelung weist eine relativ große Asymmetrie auf, da man jeweils mit einer Quer- und einer Schrägregelung (60°) einen maximalen Regelpunkt erreichen kann. Auffallend ist, dass im Gegenzug zu Abbildung 8.2 auch bei einer Längsregelung eine signifikante Wirkleistungsregelung erreicht werden kann.

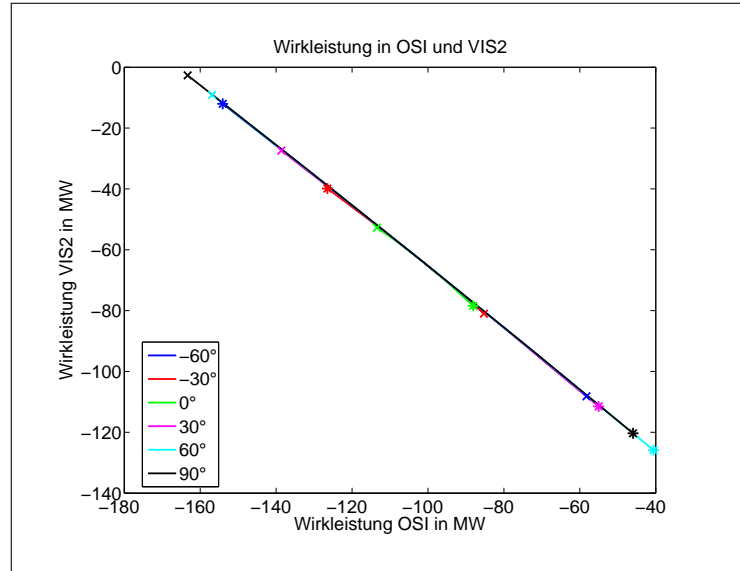


Abbildung 8.6.: Wirkleistungstransfer in OSI und VIS2

Die Blindleistung lässt sich sowohl über die Längsregelung, als auch über die Schrägregelung mit Winkel -30° sehr gut regeln.

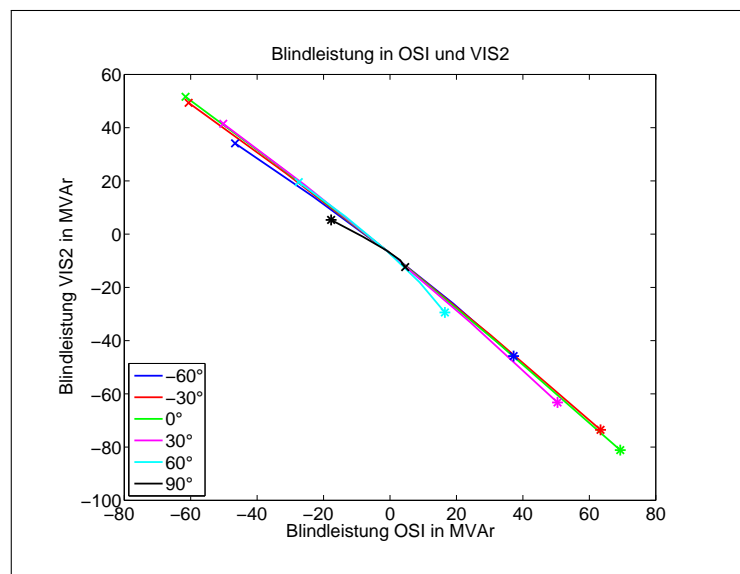


Abbildung 8.7.: Blindleistungstransfer in OSI und VIS2

Die größte Wirkleistungsänderung je Stufe lässt sich bei den Winkeln 90° mit $4,9\text{MW}/\text{Stufe}$ und 60° mit $4,87\text{MW}/\text{Stufe}$ erreichen. Bei den Winkeln $\pm 60^\circ$ lassen sich zwar ähnliche Sensitivitäten der Wirk- und Blindleistung erzielen, allerdings weisen jene der Wirkleistung unterschiedliche Vorzeichen auf.

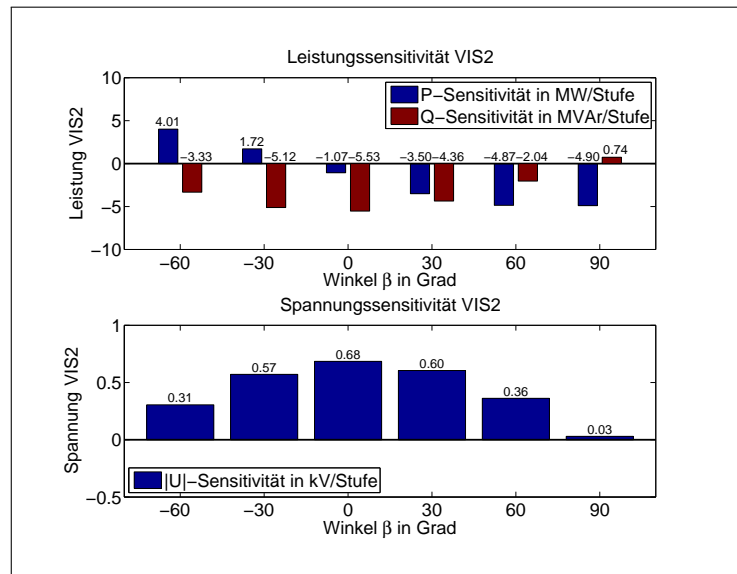


Abbildung 8.8.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS2

Bei der Schrägregelung mit 60° kann ein ähnlicher Wirkleistungsbereich wie bei der Querregelung abdeckt werden. Da der Blindleistungsbereich bei der genannten Schrägregelung allerdings größer ist, ist dieser Regelwinkel zu bevorzugen.

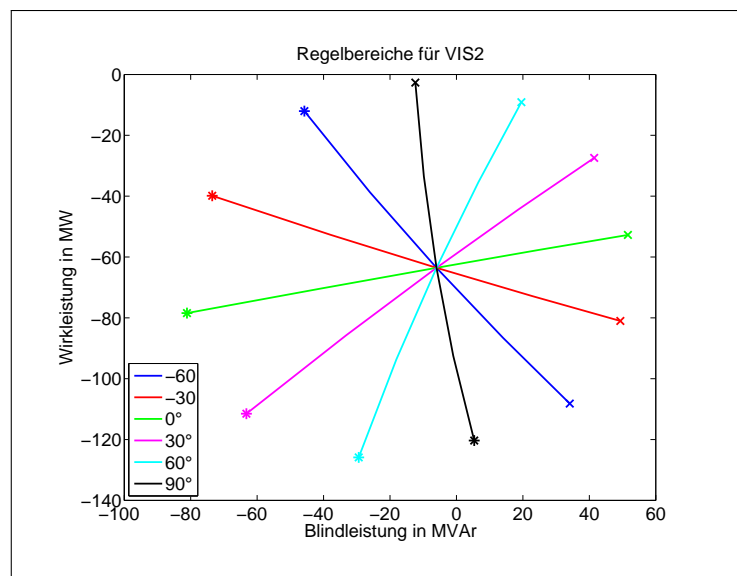


Abbildung 8.9.: Regelbereiche in VIS2

Der Wirkleistungsregelbereich wird mit der Querregelung erreicht, da die Leitungen von VIS nach LAN einen großen Querschnitt aufweisen und somit die Leitungen nahezu rein induktiv sind.

8.2. Netztrennung - Regelung in VIS, DMH und OSI

Um die größtmöglichen Regelbereiche des Lastflusses zu ermöglichen, werden die Transformatoren in DMH und OSI gegengleich zu den Transformatoren in VIS geregelt. Dadurch werden, beispielsweise, die Transformatoren in DMH und OSI in der höchsten Stufenstellung und in VIS in der niedrigsten, bei gleichem Winkel, betrieben.

Westnetz:

Im Vergleich zu Abbildung 8.2 ist zu erkennen, dass durch die zusätzliche Regelung in DMH und OSI der Leistungsbereich erheblich vergrößert wird. Die größten Leistungsbereiche sind wieder mit den Winkeln 90° und 60° erreichbar, wodurch es zu etwa einer Verdoppelung des Regelbereiches kommt im Gegensatz zur reinen Regelung in VIS1.

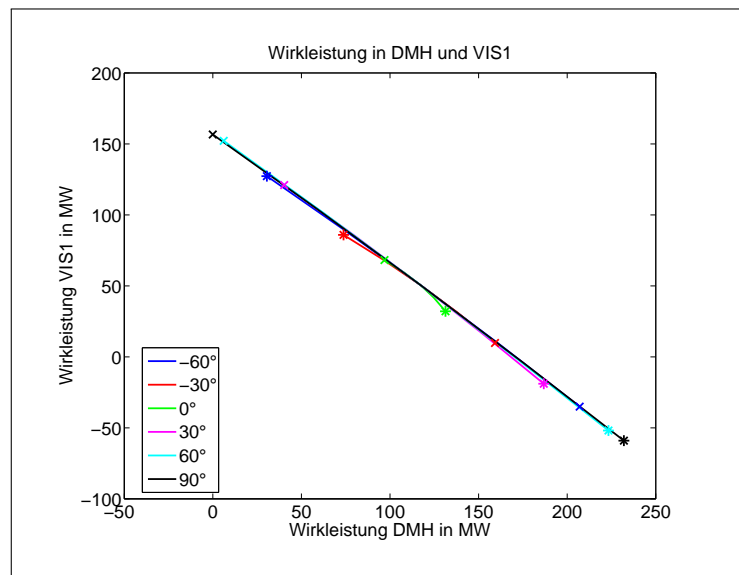


Abbildung 8.10.: Wirkleistungstransfer in DMH und VIS1

Die Verhältnisse der Blindleistungskurven verhalten sich im Verhältnis untereinander nahezu gleich wie in Abbildung 8.3, allerdings vergrößert sich der Blindleistungsbereich auf etwa das Doppelte.

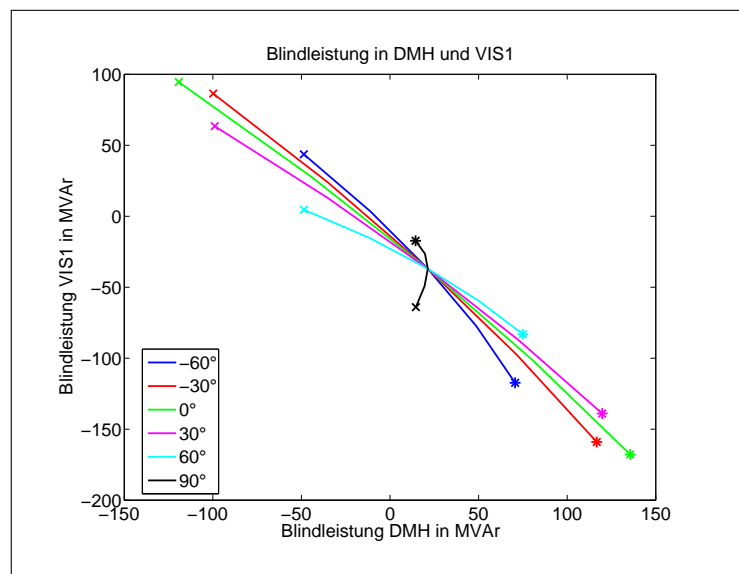


Abbildung 8.11.: Blindleistungstransfer in DMH und VIS1

Ostnetz:

Wie bereits durch die Abbildung 8.10 gezeigt, lässt sich auch der Wirkleistungsregelbereich in VIS2 und OSI deutlich erhöhen. Dabei wird der regelbare Bereich gegenüber der Regelung nur in VIS2 um etwa den Faktor zwei größer.

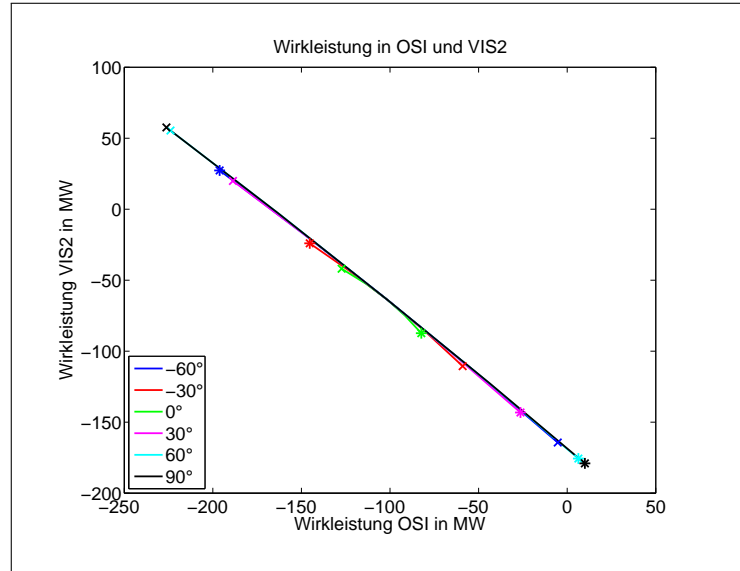


Abbildung 8.12.: Wirkleistungstransfer in OSI und VIS2

Wie schon bei der Wirkleistung erwähnt, erhöht sich der Regelbereich der Blindleistung auf etwa das Doppelte, wobei die Verhältnisse der Blindleistungskurven untereinander in etwa gleich sind wie in Abbildung 8.7.

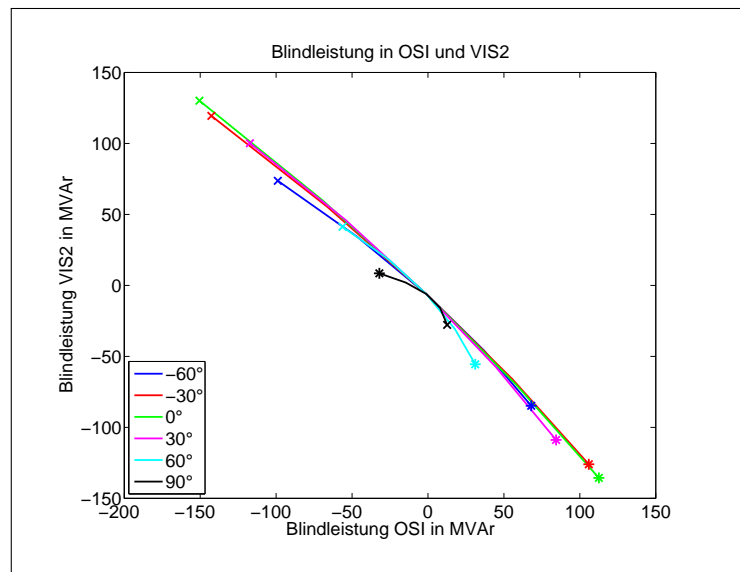


Abbildung 8.13.: Blindleistungstransfer in OSI und VIS2

8.3. Netzkopplung - Regelung in VIS

Um den Lastfluss im gesamten Netz zu untersuchen, werden die Simulationen bei geschlossenen Schaltern $S1$ und $S2$ in Abbildung 8.1 durchgeführt. Die Regelung erfolgt in VIS und die Transformatoren in OSI und DMH werden in Mittelstellung betrieben.

Mit der Abbildung 8.14 wird gezeigt wie die weiteren 3D-Diagramme dargestellt werden. Im Diagramm werden die Ergebnisse auf die jeweiligen Achsenflächen projiziert, womit man im Grunde 2D-Diagramme erhält.

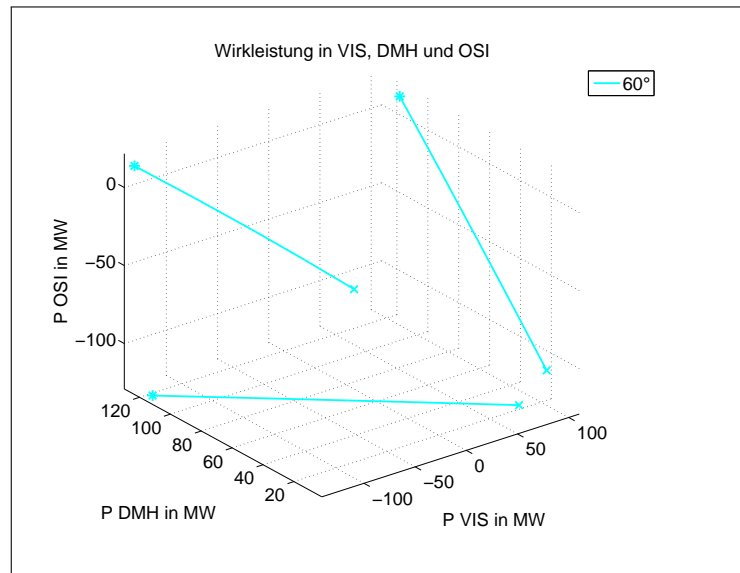


Abbildung 8.14.: Prinzipdarstellung der 3D-Diagramme

Da die Regelung lediglich in VIS erfolgt, kann der Wirkleistungsfluss nur von VIS nach DMH oder OSI verschoben werden. Eine direkte Lastflussverschiebung von DMH nach OSI ist somit nur möglich wenn hier auch eine Regelung durchgeführt wird. Die Wirkleistung lässt sich am besten mit einer Querregelung beeinflussen, wobei in VIS ein Leistungsregelbereich von etwa 230MW erreicht werden kann.

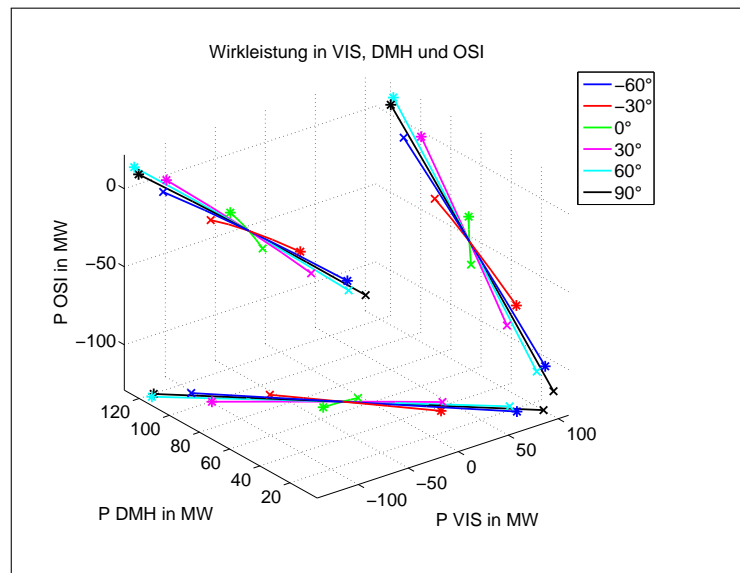


Abbildung 8.15.: Wirkleistungstransfer in DMH, OSI und VIS

Die Blindleistung kann in VIS, bei einer Längsregelung, um ungefähr 270MVar verschoben werden. Um die Blindleistung allerdings auf alle Transformatoren gleichmäßig aufzuteilen muss zumindest eine weitere Regelung in DMH oder OSI durchgeführt werden.

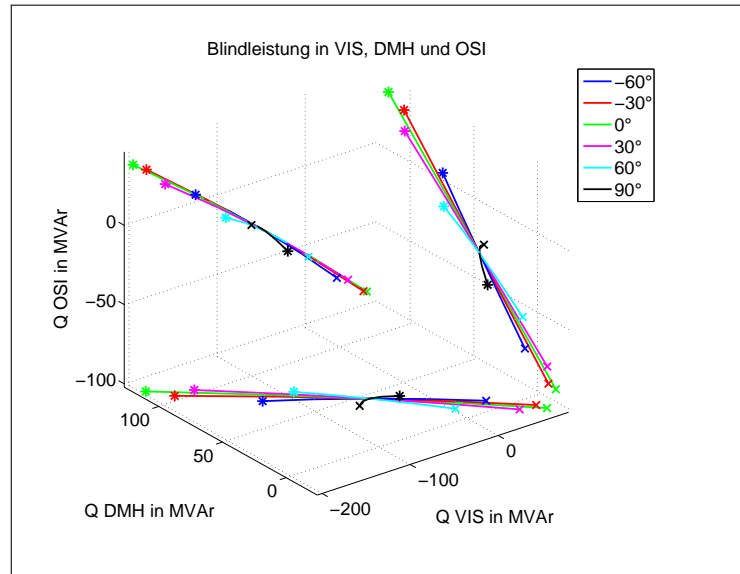


Abbildung 8.16.: Blindleistungstransfer in DMH, OSI und VIS

8.4. Netzkopplung - Regelung in DMH

Das Netz ist gekoppelt, wobei die Schalter $S1$ und $S2$, in Abbildung 8.1, geschlossen sind. Die Regelung erfolgt in DMH und die Transformatoren in OSI und VIS werden in Mittelstellung betrieben.

Wird die Regelung in DMH durchgeführt, so erhöht sich der regelbare Bereich in DMH auch stärker als bei einer Regelung in OSI oder VIS. Dabei wird die maximale Wirkleistungsregelung bei einem Winkel von 60° erreicht.

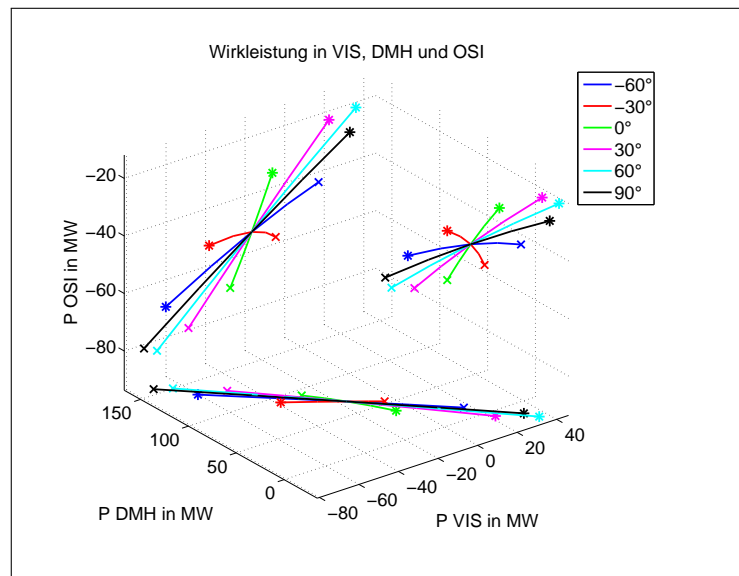


Abbildung 8.17.: Wirkleistungstransfer in DMH, OSI und VIS

Die Blindleistungsregelung lässt sich mit den Regelwinkeln von 0° oder -30° maximieren. Bei entsprechender Trafostellung ist der Blindleistungsbedarf auf die drei Netzstellen DMH, OSI und VIS gleichmäßig aufteilbar.

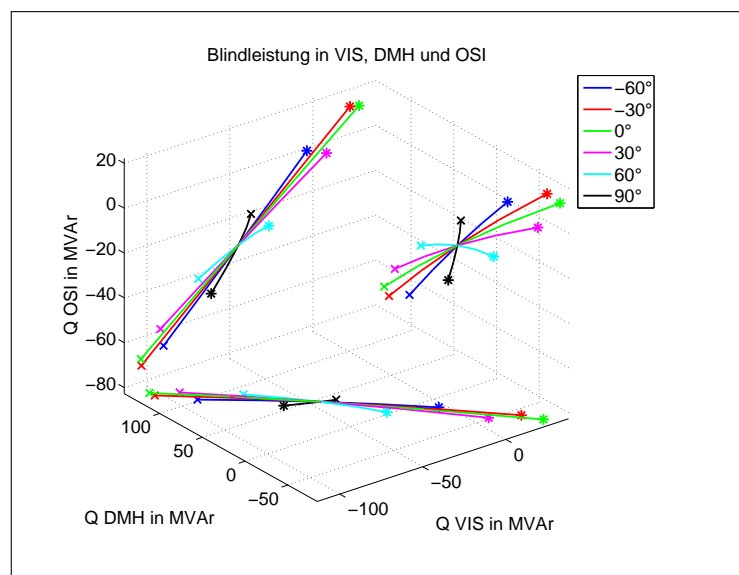


Abbildung 8.18.: Blindleistungstransfer in DMH, OSI und VIS

8.5. Netzkopplung - Regelung in OSI

Das Netz ist gekoppelt, wobei die Schalter $S1$ und $S2$, in Abbildung 8.1, geschlossen sind. Die Regelung erfolgt in OSI und die Transformatoren in DMH und VIS werden in Mittelstellung betrieben.

Die größten Regelbereiche lassen sich mit den Winkeln 60° und 90° erreichen. Dabei ist zu beachten, dass die Wirkleistung in OSI nicht im selben Maße vergrößerbar, wie verringerbar ist.

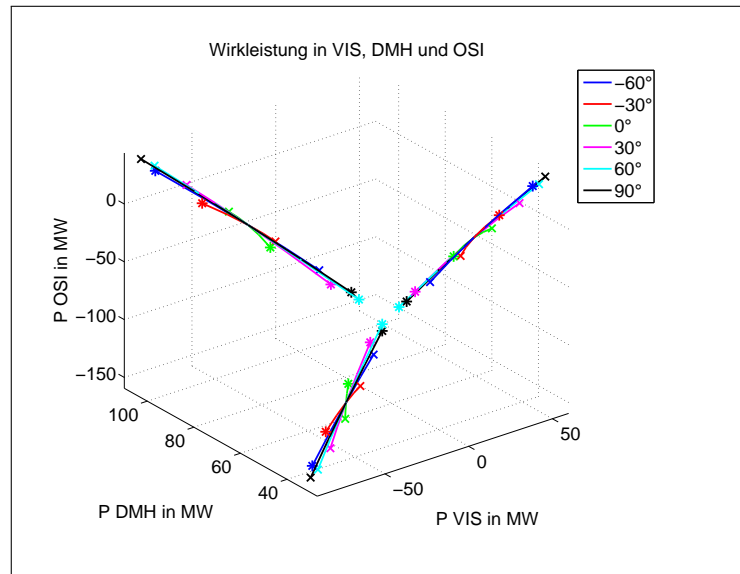


Abbildung 8.19.: Wirkleistungstransfer in DMH, OSI und VIS

Durch die Regelung in OSI verhält sich die Blindleistungsregelung stark unsymmetrisch. Dadurch ist es, ausgehend von der Trafomittelstellung nicht möglich die Blindleistung in gleicher Größe zu erhöhen, wie zu vermindern.

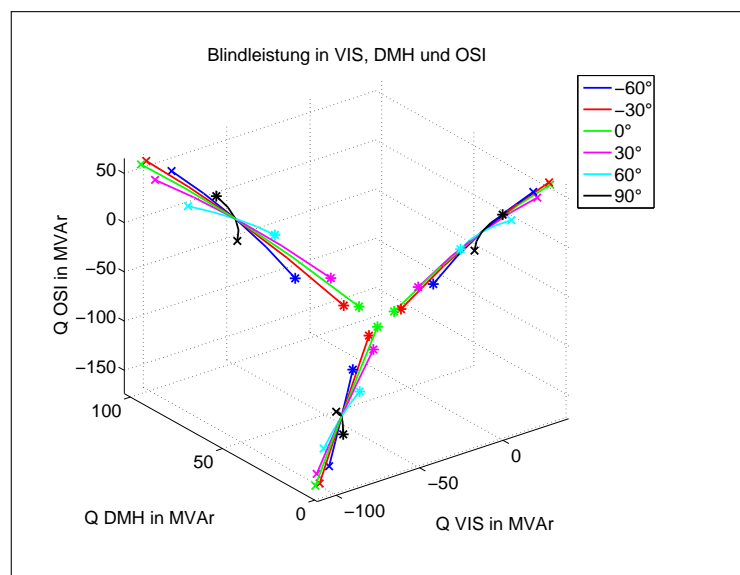


Abbildung 8.20.: Blindleistungstransfer in DMH, OSI und VIS

9. Vollständiges Modell ohne VIS

In NEPLAN wird ein reales 110-kV-Netz nachgebildet. Dabei sind alle Elemente, wie Sammelschienen, Leitungen, Schalter, Generatoren, Lasten und Transformatoren dem realen Netz mit den entsprechenden Daten entnommen. Das hinterlagerte Modell des 220-kV-Netzes entspricht dem realen 220-kV-Netz.

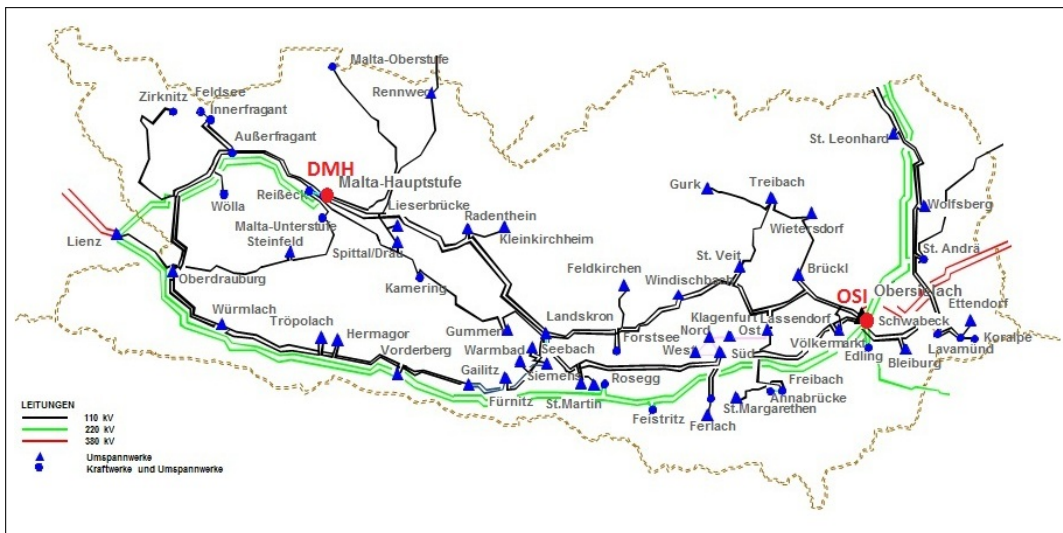


Abbildung 9.1.: Übersichtsbild des vollständigen Modells ohne VIS[4]

Abbildung 9.1 zeigt eine Übersicht des vollständigen Modells mit den entsprechenden Transformatorstellen in DMH und OSI. Für die Winkel β werden nur noch -60° , 60° und 90° untersucht, da diese den größtmöglichen Einfluss auf die Wirkleistungsregelung haben. In den Lastflussimulationen wird die Stufenstellung 1 als \times und 25 als $*$ markiert. Der Arbeitspunkt, welcher die Simulationsergebnisse bei realen Stufenstellungen darstellt wird in den Diagrammen als \bullet eingezeichnet. Im unregulierten Zustand sind die Transformatoren in DMH in Mittelstellung und jene in OSI in der realen Stufenstellung.

Untersucht werden:

- der Lastfluss über die Transformatoren in DMH und OSI
- die Leistungssensitivität je Stufe der geregelten Transformatoren
- der Lastfluss über die Doppelleitungen 115/4B und 115/3A (von DMH nach LAN)

Die Leistungen der Generatoren und Lasten sind aus den realen Daten des Jahres 2010 übernommen, wobei zwischen den Lastfällen Starklast, maximale Erzeugung und maximaler Pumpbetrieb unterschieden wird.

Starklast (27.01.2010 um 18:00h):

Für den Lastfall *Starklast* wird jener Zeitpunkt herangezogen, zu dem die Wirkleistungssumme aller Lasten im 110-kV-Netz den höchsten Wert annimmt. Es werden die Leistungswerte zu diesem Zeitpunkt für alle Generatoren und Lasten ins vollständige Netzmodell geladen und die Simulationen durchgeführt.

Maximale Erzeugung (08.11.2010 um 18:30h):

Bei der *maximalen Erzeugung* wird jener Zeitpunkt genommen, wo alle Wirkleistungswerte der Generatoren im 110-kV-Netz summiert den höchsten Wert ergeben. Zu beachten ist, dass eine negative Wirkleistung als Einspeisung gilt und somit im Prinzip das negative Maximum gesucht wird. Wie schon bei der Starklast werden die Leistungen der Generatoren und Lasten zu diesem Zeitpunkt ins vollständige Netzmodell übertragen für die Simulationen.

Maximaler Pumpbetrieb (01.03.2010 um 04:30h):

Beim Lastfall *maximalen Pumpbetrieb* werden die Simulationen für jenen Zeitpunkt durchgeführt, wo die Summe der Wirkleistung der Generatoren im 110-kV-Netz ein Minimum wird. Dabei ist wiederum zu beachten, dass eine negative Wirkleistung als Einspeisung gilt und somit im Prinzip die kleinste negative oder größte positive Wirkleistung gesucht wird. Wie schon zuvor wird dieser Zeitpunkt genommen um die Leistungen der Generatoren und Lasten zu bestimmen.

Wirkleistungsübersicht

| P in MW | Last | Generatoren | OSI | DMH | LIE |
|------------------|------|-------------|------|------|-----|
| Starklast | 660 | -355 | -180 | -135 | -35 |
| max. Erzeugung | 473 | -1130 | 164 | 303 | 138 |
| max. Pumpbetrieb | 326 | 284 | -266 | -329 | -57 |

Tabelle 9.1.: Wirkleistungsübersicht im 110-kV-Netz ohne VIS

Last Summe der Wirkleistungslasten im 110-kV-Netz ohne Leitungsverluste

Generator Summe der Wirkleistungseinspeiser im 110-kV-Netz

OSI Wirkleistungsfluss über die Transformatoren in OSI

DMH Wirkleistungsfluss über die Transformatoren in DMH

LIE Wirkleistungsfluss über die Transformatoren in LIE

Die Tabelle 9.1 zeigt eine Übersicht, welche die Wirkleistungen im 110-kV-Netz bei den realen Stufenstellungen der Transformatoren darstellt.

9.1. Regelung in DMH - Starklast

Die Transformatoren in DMH werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 bedeutet Mittelstellung). Die Transformatoren in OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 18 und Schrägregelung mit 60° gehalten.

Im unregulierten Zustand wird über DMH -129MW und über OSI -185MW bezogen. Mit der 60° Schrägregelung ist es somit möglich den Wirkleistungsbezug in DMH zwischen -57MW und -212MW und in OSI zwischen -234MW und -130MW zu regeln. Mit den beiden anderen Winkeln ist die Wirkleistung in geringem oder nur unwesentlich größerem Ausmaß regelbar.

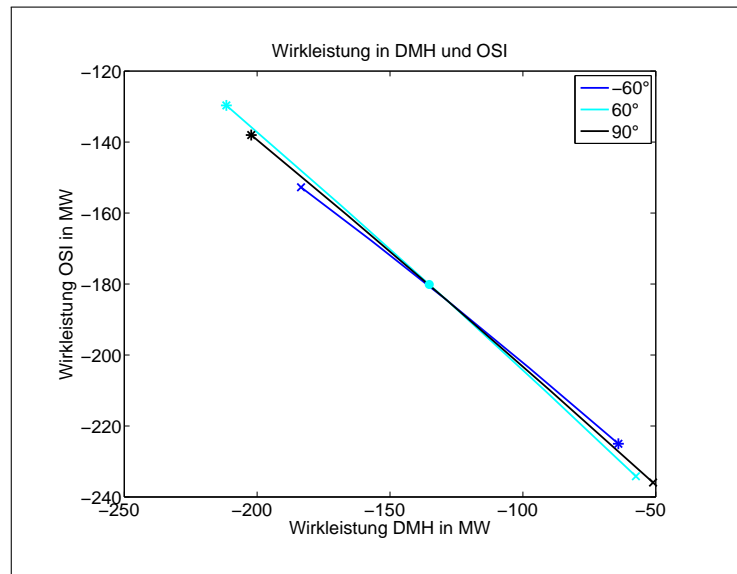


Abbildung 9.2.: Wirkleistungstransfer in DMH und OSI

Es ist zu erkennen, dass die Blindleistung in OSI bezogen und in DMH wieder ins Höchstspannungsnetz abgegeben wird. Dieser ungünstige Leistungsdurchzug, kann durch eine entsprechende Stufenstellung bei einer 60° oder -60° Schrägregelung vermindert oder vollständig verhindert werden.

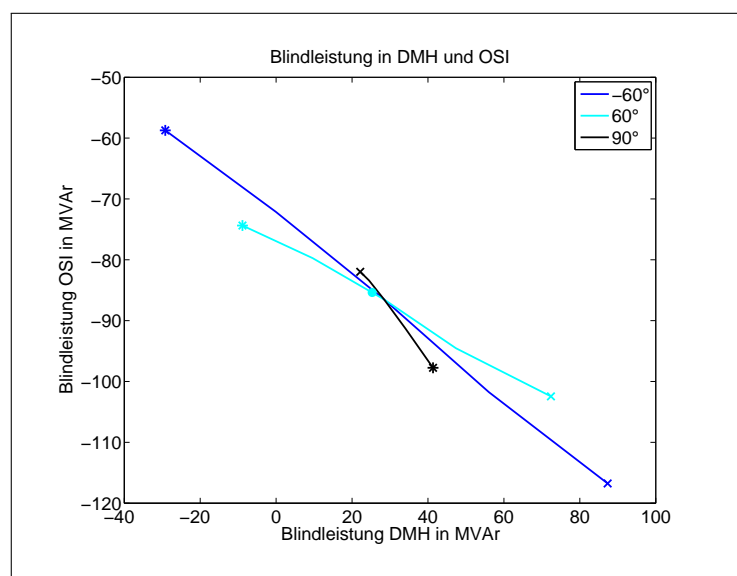


Abbildung 9.3.: Blindleistungstransfer in DMH und OSI

Durch die beiden Transformatoren in DMH kann die Wirkleistung im Mittelwert um maximal 6,42MW je Stufe geändert werden. Dieses Maximum tritt bei einer Schrägregelung von 60° auf. Die Querregelung weist eine nur geringfügig kleinere Wirkleistungssensitivität auf. Mit den beiden Schrägregelungen ist es außerdem auch möglich den Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in DMH um etwa 0,4kV je Stufe zu ändern.

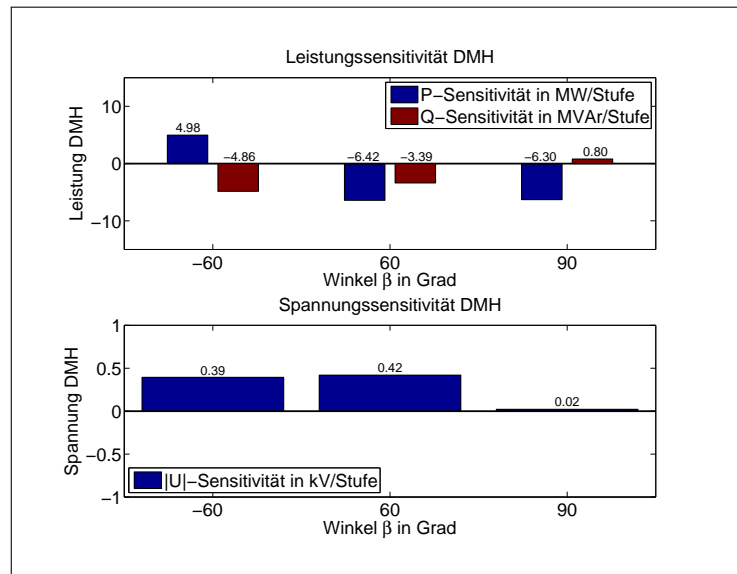


Abbildung 9.4.: Leistungs- und Spannungssensitivität in DMH

Im unregelten Zustand ist der Wirkleistungsfluss mit 138MW von DMH nach LAN. Mit der 60° Schrägregelung ist es somit möglich den Leistungsfluss auf 112MW zu reduzieren oder auf 168MW zu erhöhen. Dadurch kann bei einer möglichen Leitungsüberlastung die Wirkleistung entsprechend reduziert werden.

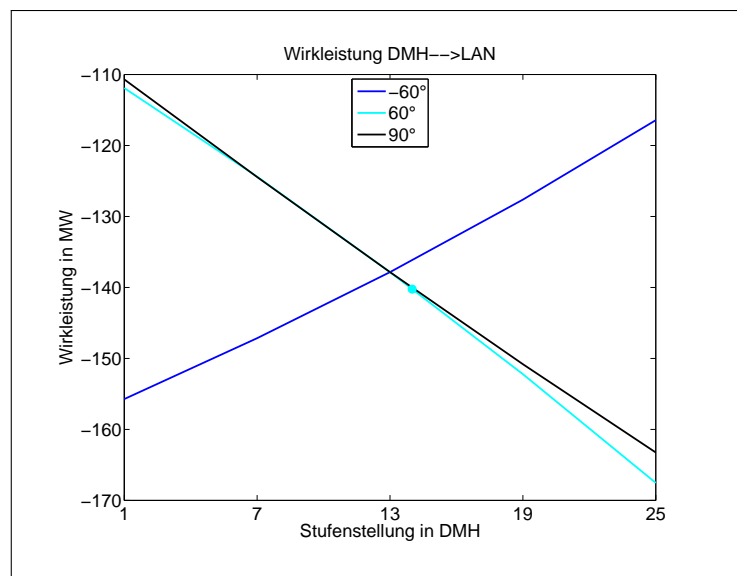


Abbildung 9.5.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in der Stufenstellung 25 bei der -60° und 60° Regelung an den 110-kV-Sammelschienen in DMH und IF überschritten.

9.2. Regelung in DMH - maximale Erzeugung

Die Transformatoren in DMH werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 ist gleich Mittelstellung). Die Transformatoren in OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 20 und Schrägregelung mit 60° gehalten.

Durch die hohe Energieerzeugung, herrscht im unregulierten Zustand ein Leistungsüberschuss im 110-kV-Netz. Dieser Überschuss wird mit 316MW in DMH und 179MW in OSI ins Höchstspannungsnetz geleitet. Mit der 60° Schrägregelung ist es möglich die Wirkleistung in DMH zwischen 395MW und 230MW und in OSI zwischen 128MW und 232MW zu regeln. Somit kann der Wirkleistungstransfer in DMH und OSI, bei Bedarf, gleichmäßig aufgeteilt werden.

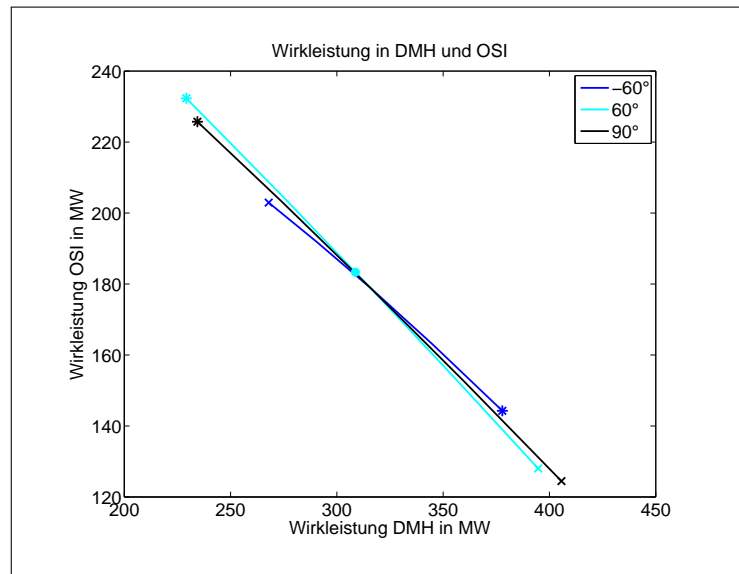


Abbildung 9.6.: Wirkleistungstransfer in DMH und OSI

Die Blindleistung wird im unregulierten Zustand nahezu ausschließlich über die Transformatoren in OSI bezogen. Dieses Ungleichgewicht zwischen DMH und OSI kann durch die diversen Regelungswinkel nur in sehr geringen Ausmaß ausgeglichen werden, wobei die -60° Schrägregelung noch die besten Ergebnisse liefert und die Querregelung völlig ungenügend ist.

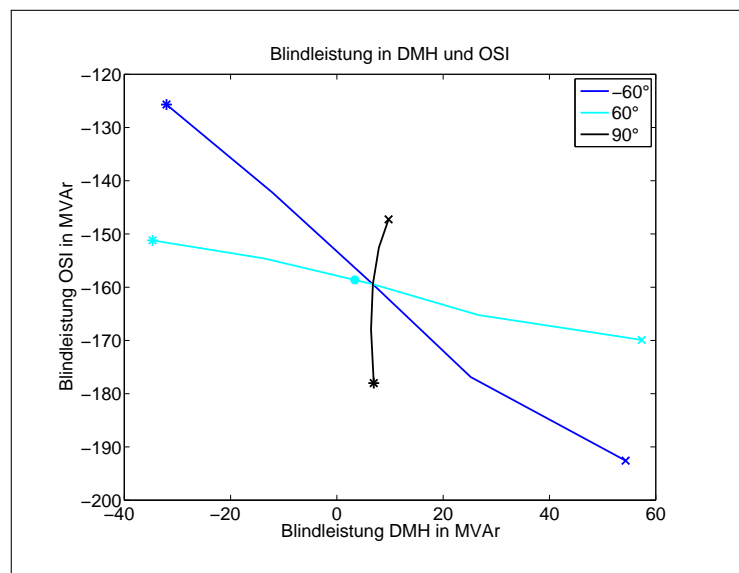


Abbildung 9.7.: Blindleistungstransfer in DMH und OSI

Die Wirkleistungssensitivität liegt für die 60° Schrägregelung und die Querregelung mit 6,9MW und 7,13MW je Stufe im gleichen Bereich. Die Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in DMH kann mit den beiden Schrägregelungen um jeweils rund 0,4kV je Stufe geändert werden.

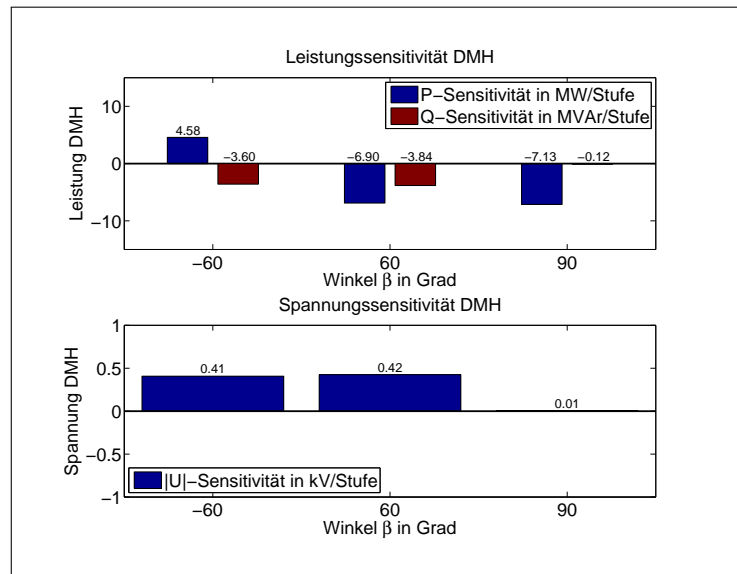


Abbildung 9.8.: Leistungs- und Spannungssensitivität in DMH

Der Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN weist im unregulierten Zustand 157MW auf. Dabei kann mit der Querregelung die Wirkleistung auf 188MW erhöht und mit der 60° Schrägregelung auf 125MW vermindert werden. Trotz des Wirkleistungsüberschusses im 110-kV-Netz fließt die Wirkleistung von DMH nach LAN, da in LAN ein Wirkleistungsdefizit herrscht, welches durch die Generatoren und die Netzanschlüsse zum Höchstspannungsnetz in DMH gedeckt wird.

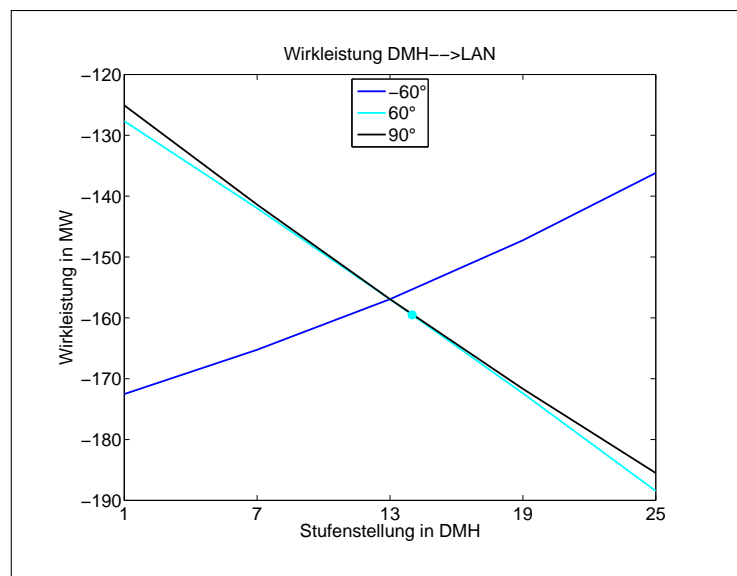


Abbildung 9.9.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in der Stufenstellung 25 bei der -60° und 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in DMH überschritten. Ebenfalls wird die Spannungsgrenze von 121kV in den Stufenstellungen 19 bis 25 bei der -60° und 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in IF übertreten.

9.3. Regelung in DMH - maximaler Pumpbetrieb

Die Transformatoren in DMH werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 bedeutet Mittelstellung). Die Transformatoren in OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 16 und Schrägregelung mit 60° gehalten.

Durch die geringe Erzeugungsleistung aber die große Pumpleistung in den Pumpspeicherkraftwerken wird im unregulierten Betrieb über die Transformatoren in DMH -258MW und in OSI -277MW bezogen. Mit einer entsprechenden 60° Schrägregelung kann der Wirkleistungsbezug in DMH zwischen -198MW und -333MW und in OSI zwischen -323MW und -223MW geregelt werden.

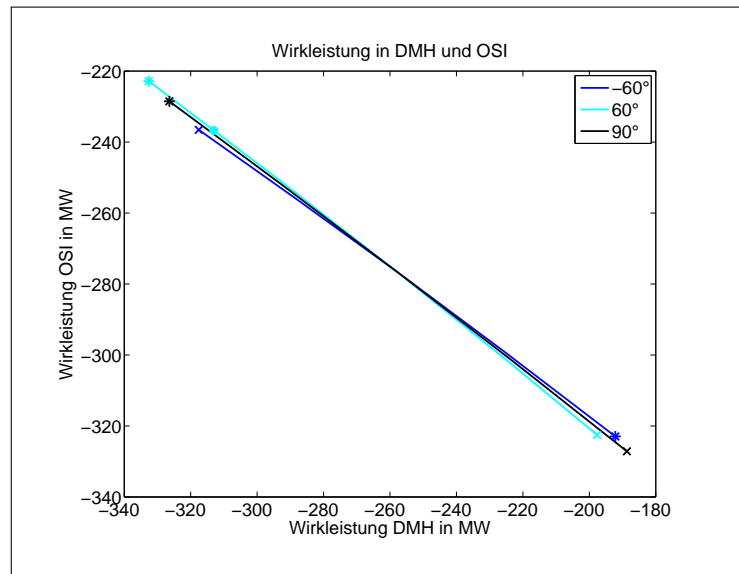


Abbildung 9.10.: Wirkleistungstransfer in DMH und OSI

Da nur wenig Wirkleistung über weite Leistungsstrecken transportiert werden muss, ist der Blindleistungsbedarf entsprechend gering. Durch die entsprechende Schrägregelung kann somit der Blindleistungsbezug über die Transformatoren gleichmäßig aufgeteilt werden, wodurch man auf Werte von etwa je -10MVar in DMH und OSI kommen kann.

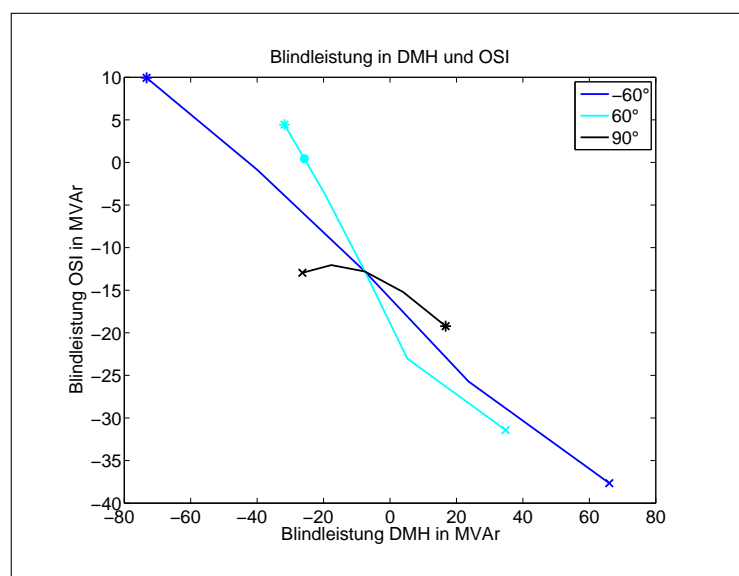


Abbildung 9.11.: Blindleistungstransfer in DMH und OSI

Die Wirkleistungssensitivität liefert, abgesehen vom Vorzeichen, für alle drei simulierten Winkel in etwa gleiche Werte. Das Maximum liegt dabei mit 5,74MW je Stufe bei der Querregelung. Der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in DMH lässt sich mit der 60° Schrägregelung um 0,43kV je Stufe ändern.

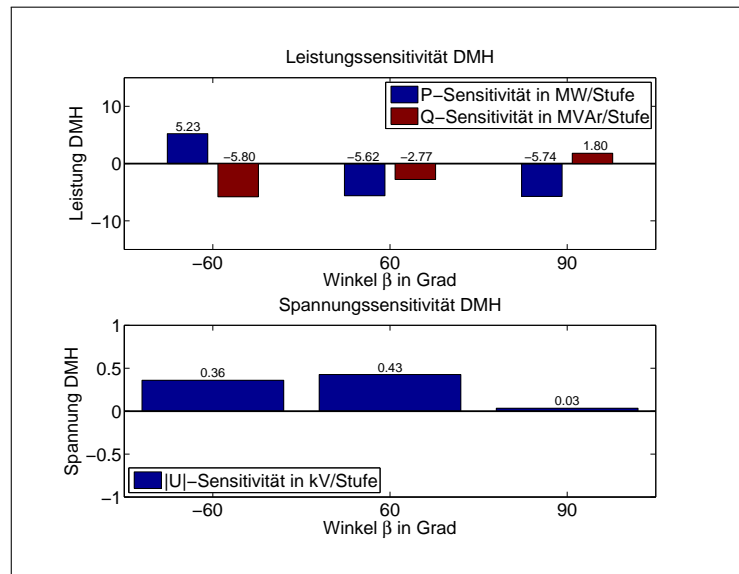


Abbildung 9.12.: Leistungs- und Spannungssensitivität in DMH

Der Wirkleistungsfluss geht im unregulierten Zustand mit lediglich 4MW von LAN nach DMH. Durch die entsprechende Regelung kann dieser jedoch auch noch auf 0MW reduziert werden oder den Lastfluss auch von DMH nach LAN fließen zu lassen.

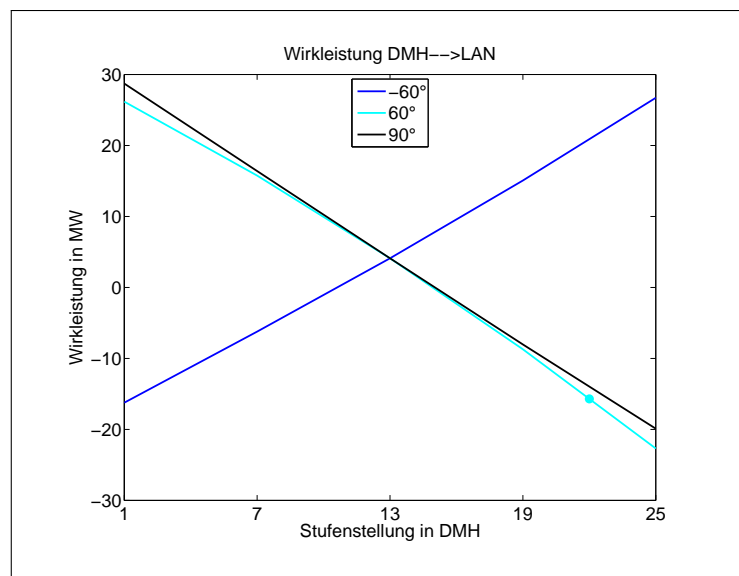


Abbildung 9.13.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in der Stufenstellung 25 bei der 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in DMH überschritten.

10. Vollständiges Modell mit VIS - Netztrennung

In NEPLAN wird ein reales 110-kV-Netz nachgebildet. Dabei sind alle Elemente, wie Sammelschienen, Leitungen, Schalter, Generatoren, Lasten und Transformatoren dem realen Netz mit den entsprechenden Daten entnommen. Das hinterlagerte Modell des 220-kV-Netzes entspricht dem realen 220-kV-Netz.

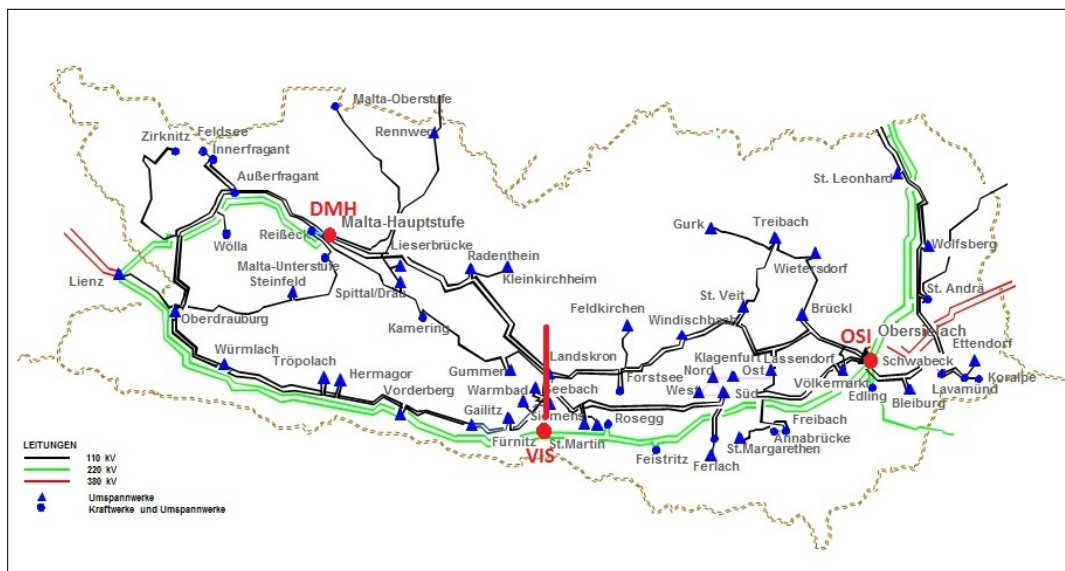


Abbildung 10.1.: Übersichtsbild des vollständigen Modells mit VIS - Netztrennung[4]

Abbildung 10.1 zeigt eine Übersicht des vollständigen Modells mit den entsprechenden Transformatorstellen in DMH, OSI und VIS. Es erfolgt eine Netztrennung in Ost- und Westnetz. Die 110-kV-Sammelschiene LANW, der Transformator 31 in VIS (bzw. VIS1) sowie alle links davon liegenden Elemente gehören dem Westnetz an. Die 110-kV-Sammelschiene LANO, der Transformator 32 in VIS (bzw. VIS2) und alle rechts davon liegenden Elemente sind dem Ostnetz zuzurechnen. Für die Winkel β werden nur noch -60° , 60° und 90° untersucht, da diese den größtmöglichen Einfluss auf die Wirkleistungsregelung haben. In den Ergebnisdigrammen der Lastflusssimulationen wird die Stufenstellung 1 als \times und 25 als $*$ markiert. Im unregulierten Zustand sind die Transformatoren in VIS in Mittelstellung und jene in DMH und OSI in der realen Stufenstellung.



Untersucht werden folgende Elemente:

- der Lastfluss über die Transformatoren in DMH, OSI und VIS
- die Leistungssensitivität je Stufe der geregelten Transformatoren
- der Lastfluss über die Doppelleitungen 115/4B und 115/3A (von DMH nach LAN)

Die Leistungen der Generatoren und Lasten sind aus den realen Daten des Jahres 2010 übernommen, wobei zwischen Starklast, maximale Erzeugung und maximaler Pumpbetrieb unterschieden wird, welche im Kapitel 9 definiert sind.

10.1. Regelung in VIS - Starklast

Die Transformatoren in VIS werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 bedeutet Mittelstellung). Die Transformatoren in DMH und OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 14 (in DMH) und 18 (in OSI) in Schrägregelung mit 60° gehalten.

Westnetz:

Die Wirkleistungsaufnahme ins 110-kV-Netz beträgt im unregulierten Zustand in DMH -96MW und in VIS1 -46MW . Mit der Querregelung kann die Wirkleistung in DMH zwischen -152MW und -41MW und in VIS1 zwischen 20MW und -113MW geregelt werden. Daher ist bei der Regelung zu beachten, dass man einen Leistungsdurchzug von DMH nach VIS1 möglichst vermeidet.

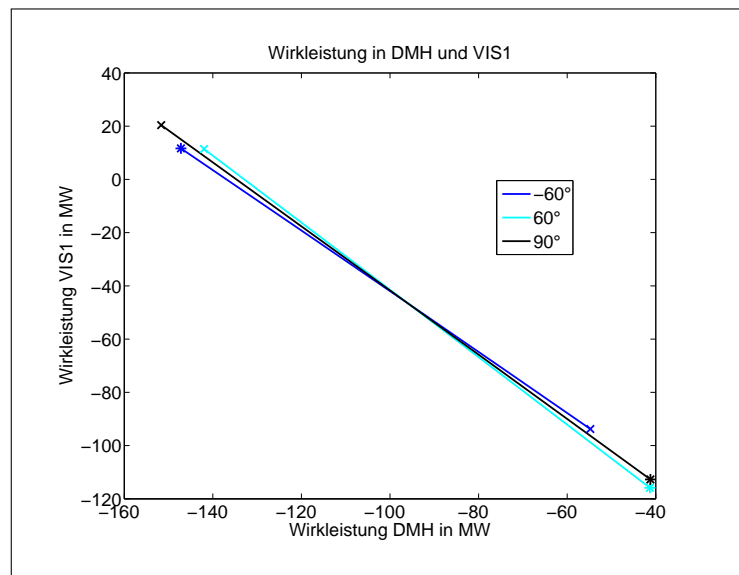


Abbildung 10.2.: Wirkleistungstransfer in DMH und VIS1

Wird die Blindleistung nicht geregelt, so beträgt der Blindleistungsbezug in VIS1 lediglich -6MVar und in DMH wird Blindleistung in Höhe von 32MVar ins Höchstspannungsnetz abgegeben. Der Blindleistungstransfer kann durch die beiden Schrägregelungen in beträchtlichen Ausmaß geregelt werden, wie in Abbildung 10.3 zu sehen ist.

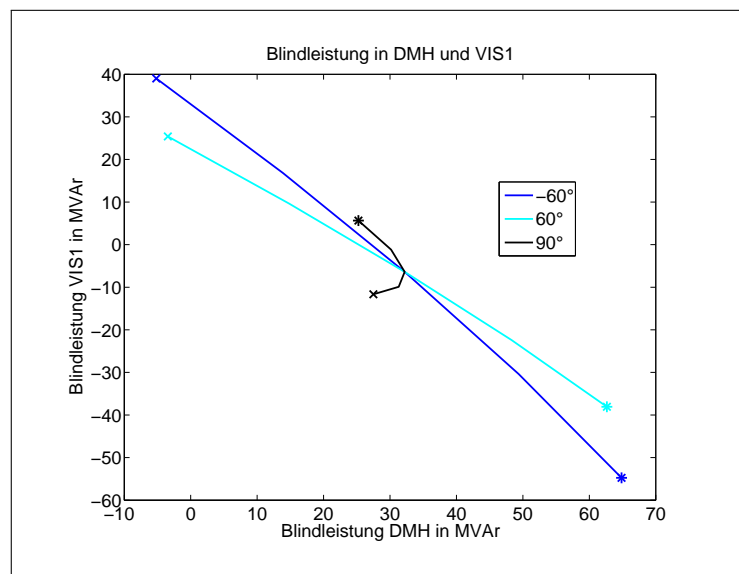


Abbildung 10.3.: Blindleistungstransfer in DMH und VIS1

Die Wirkleistung lässt sich sowohl mit der 60° Schrägregelung als auch mit der Querregelung in erheblichem Maße beeinflussen. Dabei ist eine Wirkleistungsänderung von bis zu 5,55MW je Stufe möglich, welche bei der 90° Regelung auftritt. Mit den beiden Schrägregelungen kann man auch den Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in VIS1 um 0,34kV bzw. 0,38kV je Stufe ändern.

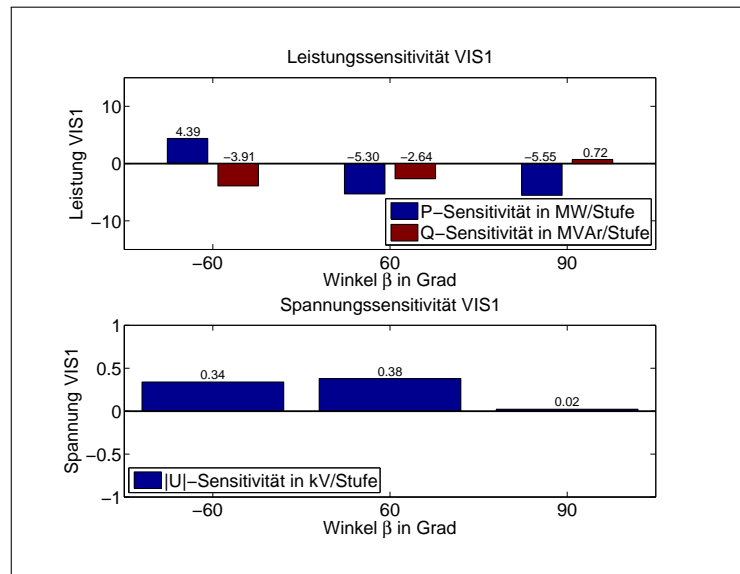


Abbildung 10.4.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS1

Im unregelten Zustand ist der Wirkleistungsfluss von DMH in Richtung LAN mit -117MW. Durch die Querregelung in VIS1 kann die Doppelleitung auf bis zu -84MW entlastet oder auf bis zu -150MW mehr belastet werden. Mit der 60° Querregelung ist eine ähnlich große Leitungsentlastung erreichbar, allerdings kann sie nicht im gleichen Maße mehr belastet werden wie durch die Querregelung. Diese Unsymmetrie ist bereits in Abbildung 10.2 zu sehen.

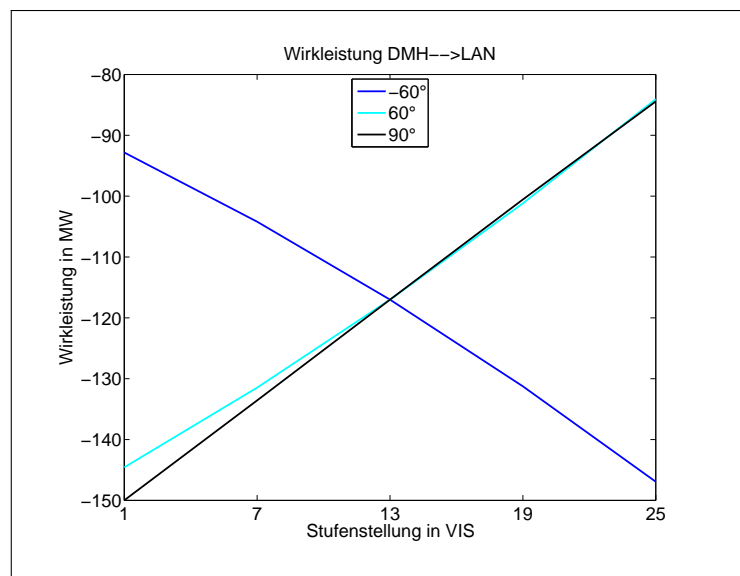


Abbildung 10.5.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Ostnetz:

Im Ostnetz ist der Wirkleistungsbezug ins 110-kV-Netz sehr ungleich auf die Transformatoren in OSI und VIS2 aufgeteilt. Über OSI werden -158MW und über VIS2 lediglich -18MW bezogen. Durch die entsprechende Regelung kann diese Unausgewogenheit, wie in Abbildung 10.6 zu sehen, ausgeglichen werden.

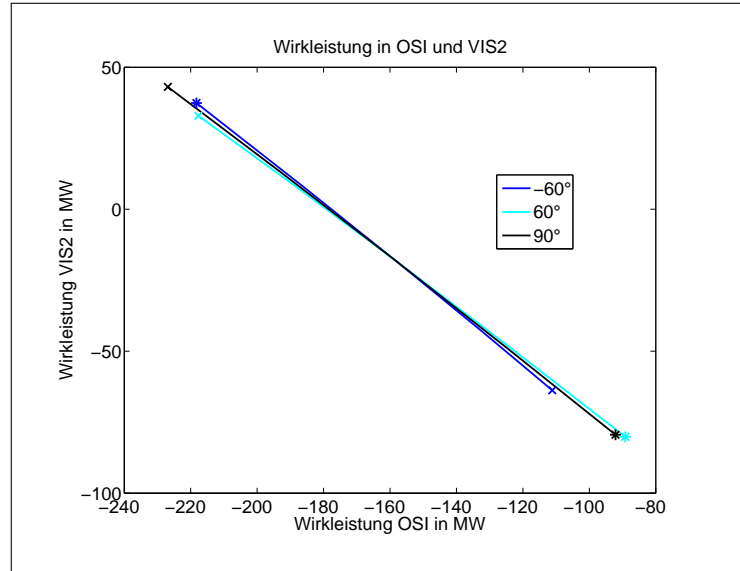


Abbildung 10.6.: Wirkleistungstransfer in OSI und VIS2

Der Blindleistungsbezug ist entsprechend der Scheinleistung der Transformatoren aufgeteilt. In OSI (Transformatorscheinleistung ist 2-mal 300MVA) wird -64MVar und über VIS2 (Transformatorscheinleistung ist 1-mal 300MVA) -30MVar bezogen. Die größte Blindleistungsregelbereich wird durch eine -60° Schrägregelung in VIS2 erreicht.

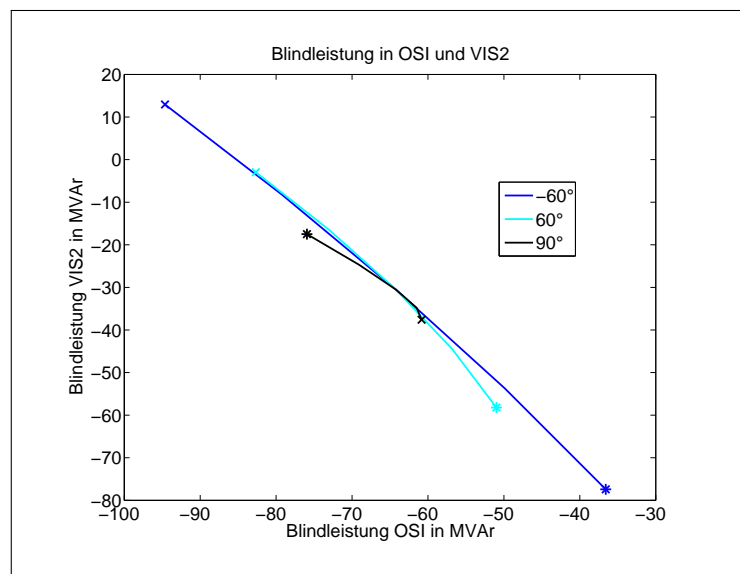


Abbildung 10.7.: Blindleistungstransfer in OSI und VIS2

Die Wirkleistungssensitivität ist bei der Querregelung mit 5,1MW je Stufe am größten. Allerdings ist auch mit der 60° Schrägregelung mit 4,71MW je Stufe eine ähnlich große Sensitivität wie bei der 90° Regelung erreichbar. Die Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in VIS2 kann durch die Schrägregelung um 0,35kV bzw. 0,41kV je Stufe geändert werden.

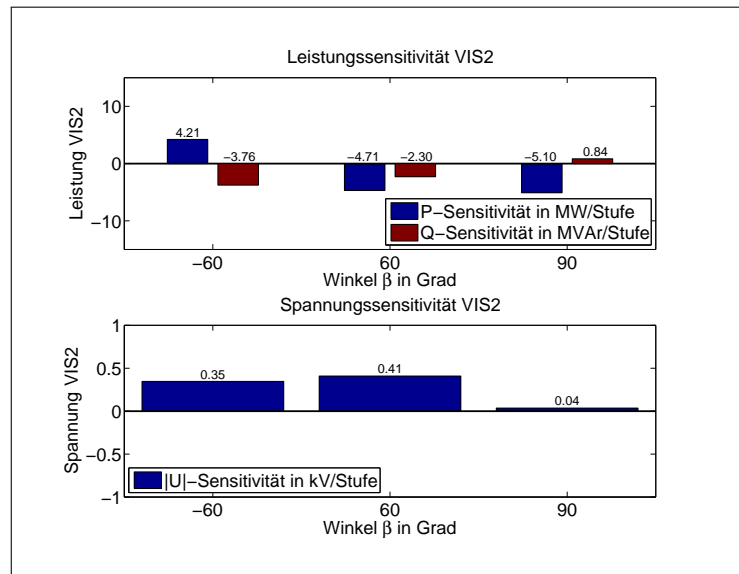


Abbildung 10.8.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS2

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in der Stufenstellung 25 bei der -60° und 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in LANO überschritten.

10.2. Regelung in VIS - maximale Erzeugung

Die Transformatoren in VIS werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 bedeutet Mittelstellung). Die Transformatoren in DMH und OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 14 (in DMH) und 18 (in OSI) in Schrägregelung mit 60° gehalten.

Westnetz:

Da nahe DMH sehr leistungsstarke Generatoren ins 110-kV-Netz einspeisen, wird die überschüssige Wirkleistung über die Transformatoren in DMH ins Höchstspannungsnetz geführt. Im unregulierten Zustand wird in DMH somit 327MW transferiert und in VIS1 -15MW bezogen. Durch die entsprechende Regelung kann, wie man in Abbildung 10.9 sieht, der Wirkleistungsfluss Richtung VIS1 verschoben werden.

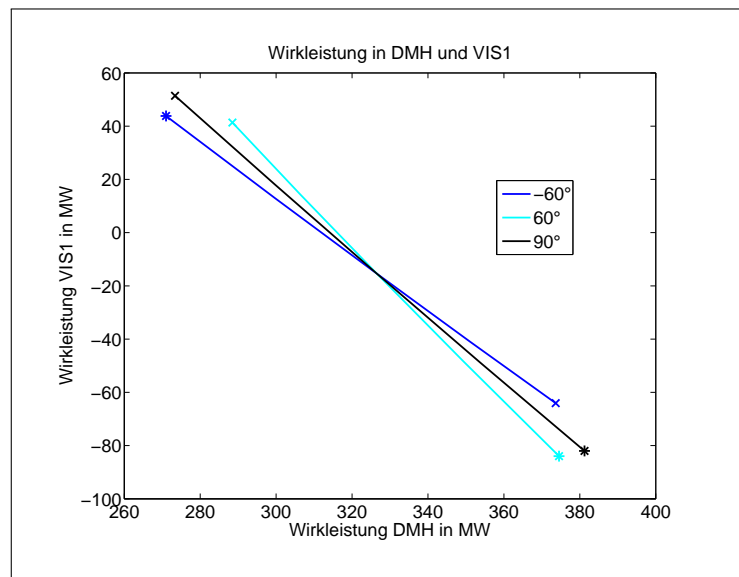


Abbildung 10.9.: Wirkleistungstransfer in DMH und VIS1

Der Blindleistungsbedarf für das Westnetz wird, im unregulierten Zustand, vornehmlich über die Transformatoren in DMH gedeckt. Durch eine geringe Schrägregelung kann dieser Blindleistungsbedarf auf VIS1 und DMH gleich verteilt werden. Da es sich allerdings nur um relativ kleine Leistungsbereiche handelt ist dies nur als Optimierung zu sehen.

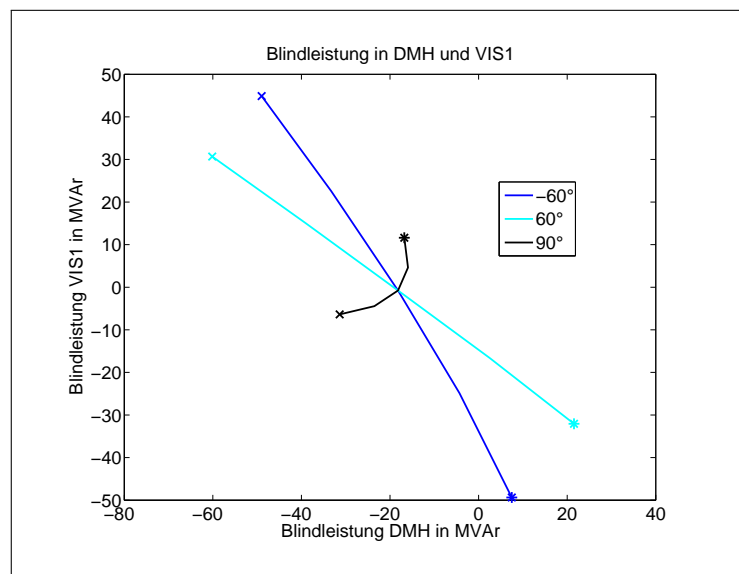


Abbildung 10.10.: Blindleistungstransfer in DMH und VIS1

Die maximale Wirkleistungssensitivität wird durch die Querregelung erreicht und liegt bei 5,56MW je Stufe. Daher ist es bei 24 Stufen möglich einen Leistungsbereich von maximal 133MW zu regeln. Allerdings ist dieser Bereich nicht linear verteilt, wodurch die Wirkleistung nicht immer im gleichen Maße erhöhbar, wie verringerbar ist. Der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in VIS1 lässt sich durch die Schrägregelungen um 0,33kV bzw. 0,38kV je Stufe ändern.

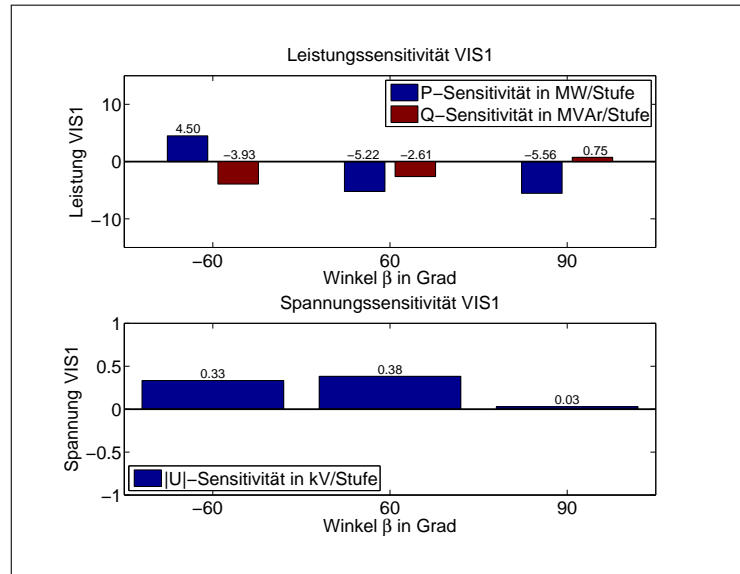


Abbildung 10.11.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS1

Da in LAN ein großer Wirkleistungsbedarf herrscht, wird dieser im unregulierten Zustand sehr stark über die Einspeisung in DMH gedeckt. Daher liegt der Wirkleistungsfluss über die Doppelleitung von DMH nach LAN bei -150MW. Durch die entsprechende Regelung kann, wie in Abbildung 10.12 zu sehen, der Wirkleistungsfluss auf -117MW reduziert werden.

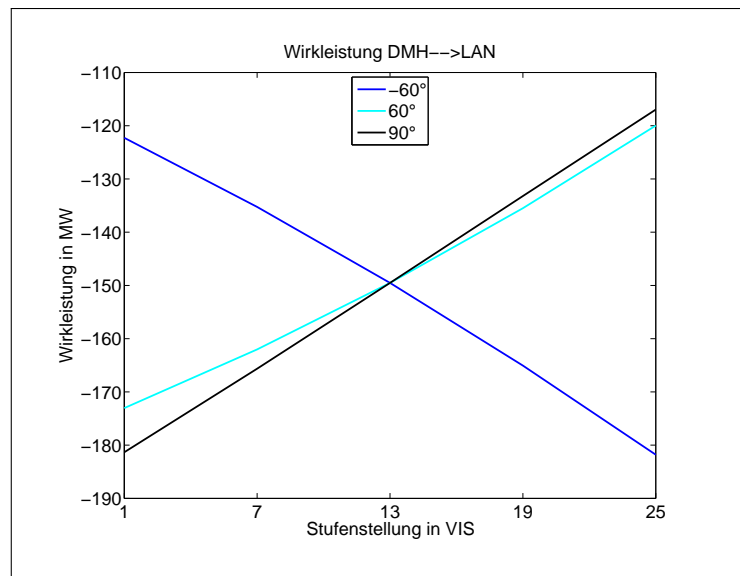


Abbildung 10.12.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Ostnetz:

Der Wirkleistungsüberschuss wird im Ostnetz größtenteils über den Transformator in VIS2 ins Höchstspannungsnetz geleitet. Um den Wirkleistungsfluss besser auf die Transformatoren zu verteilen, müssen die Regeltransformatoren sehr stark ausregeln, wie man in Abbildung 10.13 sehen kann.

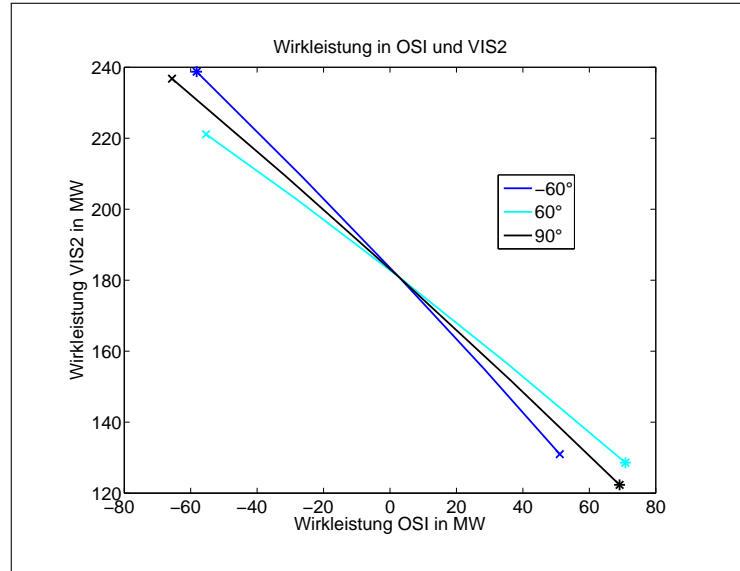


Abbildung 10.13.: Wirkleistungstransfer in OSI und VIS2

Im Ostnetz wird der Blindleistungsbedarf im unregulierten Zustand mit -97MVar über die Transformatoren in OSI und mit -65MVar über den Transformator in VIS2 gedeckt. Mit der -60° Schrägregelung ist diese Aufteilung, entsprechend der Abbildung 10.14, am besten veränderbar. Die 60° Schräg- und die Querregelung sind dafür nur in geringerem Ausmaß nutzbar.

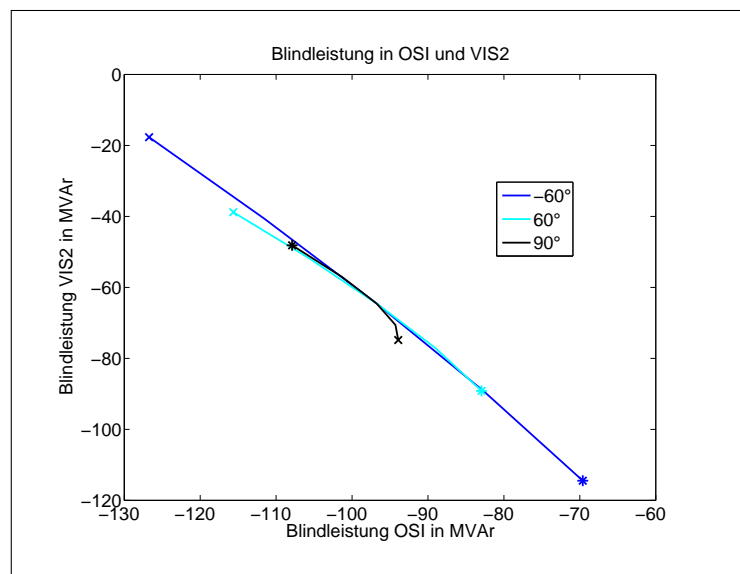


Abbildung 10.14.: Blindleistungstransfer in OSI und VIS2

Im Vergleich zu den vorherigen Simulationsergebnissen, liefert hier die 60° Schrägregelung die geringste Wirkleistungssensitivität. Mit der Querregelung sind dafür mit 4,77MW je Stufe die größten Werte erreichbar. Allerdings zeigt sich, dass mit der 60° Schrägregelung der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene im größten Bereich mit 0,45kV je Stufe verändern lässt.

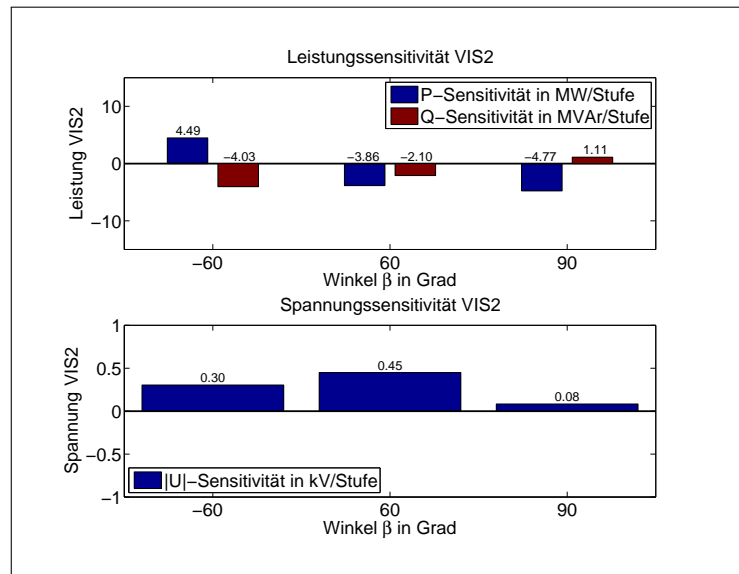


Abbildung 10.15.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS2

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in der Stufenstellung 25 bei der -60° und 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in LANO überschritten. Ebenfalls wird die Spannungsgrenze von 121kV in der Stufenstellung 25 bei der 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in IF übertreten.

10.3. Regelung in VIS - maximaler Pumpbetrieb

Die Transformatoren in VIS werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 bedeutet Mittelstellung). Die Transformatoren in DMH und OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 22 (in DMH) und 16 (in OSI) in Schrägregelung mit 60° gehalten.

Westnetz:

Da im maximalen Pumpbetrieb die Pumpspeicherkraftwerke nahe DMH einen hohen Wirkleistungsbedarf aufweisen, wird dieser aus dem Höchstspannungsnetz über die Transformatoren in DMH bezogen. Der Transformator in VIS1 liefert, im unregulierten Betrieb, praktisch keinen Beitrag zur Deckung des Wirkleistungsbedarfs. Durch die entsprechende Regelung kann der Wirkleistungsbedarf in DMH reduziert werden, indem in VIS1 mehr Wirkleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen wird.

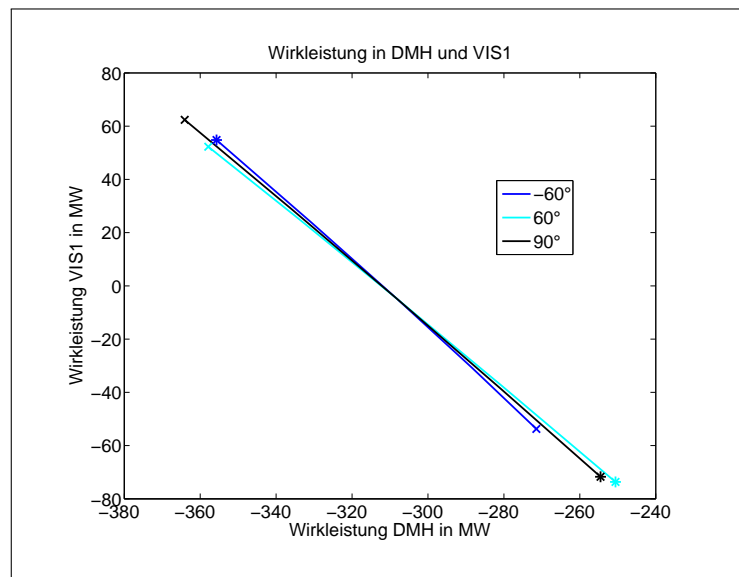


Abbildung 10.16.: Wirkleistungstransfer in DMH und VIS1

Da nur wenig Energie über weite Strecken transportiert werden muss und der Blindleistungsbedarf im gesamten Westnetz eher gering ist, wird dieser über die Transformatoren in DMH gedeckt. Durch die -60° Schrägregelung kann die Blindleistungsaufnahme zwischen den Transformatoren in DMH und VIS1 verschoben werden. Allerdings ist dies aufgrund des geringen Blindleistungsbedarfs im Allgemeinen nur in kleinen Ausmaßen notwendig.

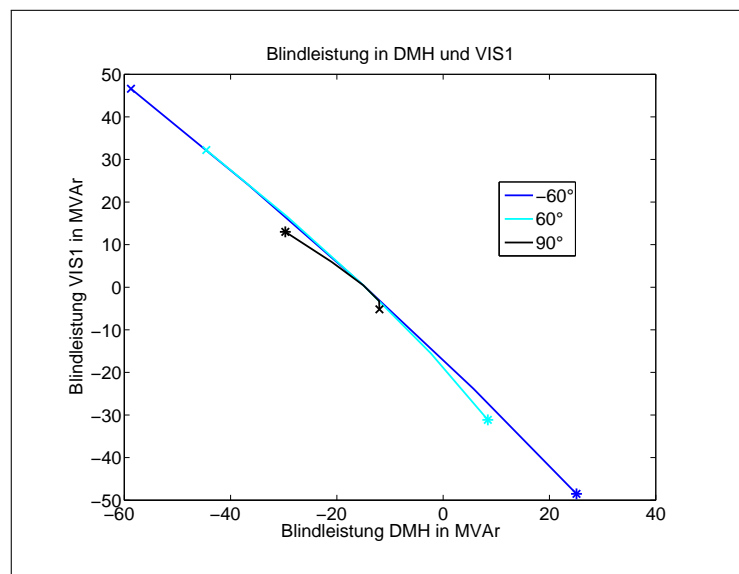


Abbildung 10.17.: Blindleistungstransfer in DMH und VIS1

Die maximale Wirkleistungssensitivität ist wiederum mit der Querregelung erreichbar, welche im Durchschnitt bei 5,59MW je Stufe liegt. Über die Schrägregelung kann der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in VIS1 um 0,33kV bzw. 0,39kV je Stufe geändert werden.

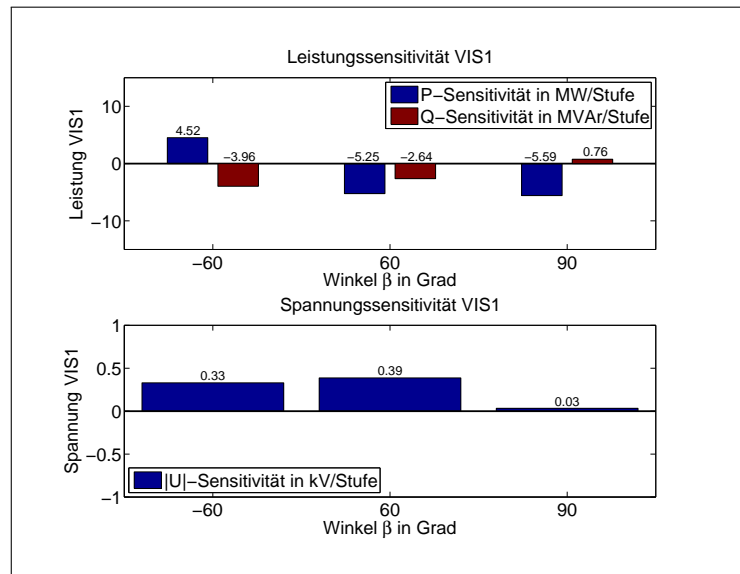


Abbildung 10.18.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS1

Durch den geringen Wirkleistungsbedarf in LAN ist die Doppelleitung zwischen DMH und LAN nur in geringem Maße ausgelastet, wodurch eine Lastflussregelung auf Grund von Überlastung im Allgemeinen nicht von Nöten ist. Somit erfolgt eine Regelung lediglich bei Optimierungsmaßnahmen oder wenn andere Betriebszustände solches verlangen würden.

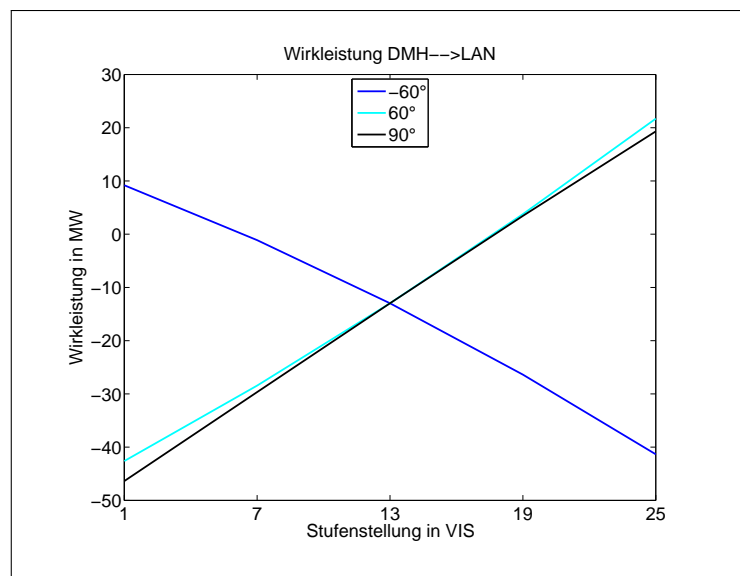


Abbildung 10.19.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Ostnetz:

Im unregulierten Betrieb wird der Wirkleistungsbedarf für das Ostnetz praktisch gleichmäßig auf die Transformatoren in OSI mit -119MW und in VIS2 mit -115MW aufgeteilt. Bei Bedarf kann mit der Querregelung die Wirkleistung in OSI zwischen -187MW und -52MW und in VIS2 zwischen -51MW und -178MW geregelt werden. Mit den beiden Schrägregelungen sind geringere Regelbereiche durchführbar.

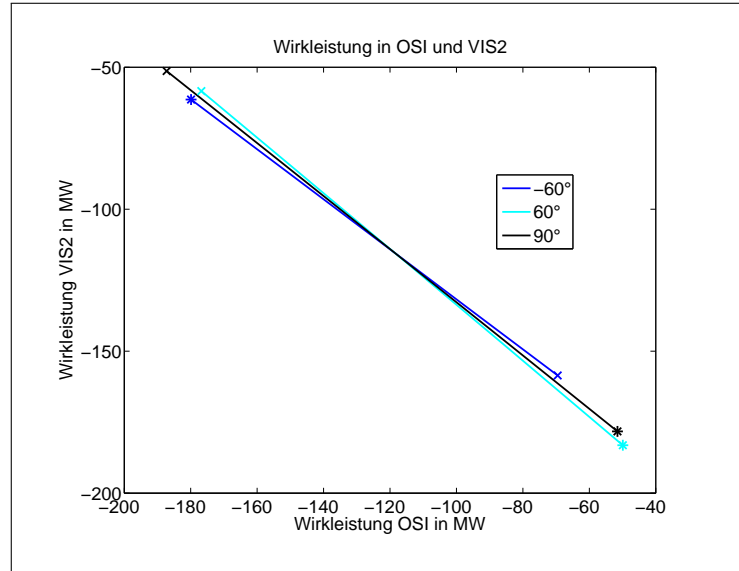


Abbildung 10.20.: Wirkleistungstransfer in OSI und VIS2

Im unregulierten Zustand wird in OSI Blindleistung bezogen und in VIS2 ins Höchstspannungsnetz wieder abgegeben. Daher kann es von Vorteil sein, wenn man diesen Blindleistungsdurchzug reduziert indem man am besten eine -60° Schrägregelung verwendet. Damit kann der Blindleistungsbezug soweit verringert werden, dass nur noch ein kleiner Betrag über die Transformatoren aus dem Höchstspannungsnetz bezogen werden muss.

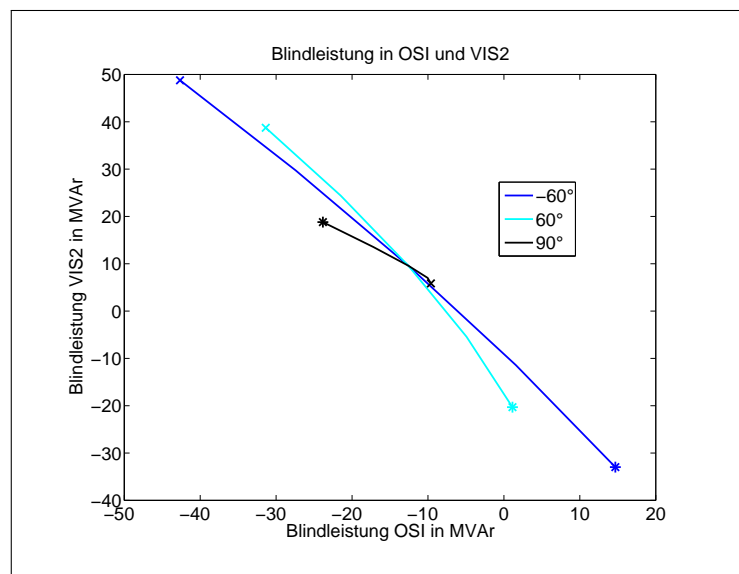


Abbildung 10.21.: Blindleistungstransfer in OSI und VIS2

Die Wirkleistungssensitivität liegt für die 60° Schrägregelung und die Querregelung mit 5,2MW bzw. 5,29MW je Stufe sehr eng beieinander. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Sensitivitäten lediglich Durchschnittswerte angeben und der reale Regelbereich, wie in Abbildung 10.20 ersichtlich ist, trotz gleicher Sensitivität voneinander unterschiedlich sein kann. Der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in VIS2 kann mit den Schrägregelungen um 0,38kV bzw. 0,39kV je Stufe geändert werden.

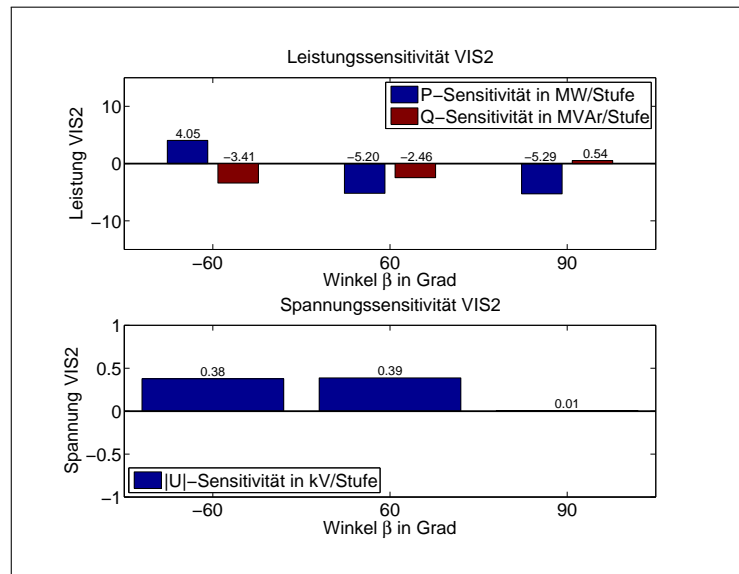


Abbildung 10.22.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS2

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in den Stufenstellungen 19 bis 25 bei der -60° und 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in DMH und LANW überschritten. Ebenfalls wird die Spannungsgrenze von 121kV in der Stufenstellung 25 bei der -60° und 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in LANO übertreten.

11. Vollständiges Modell mit VIS - Netzkopplung

In NEPLAN wird ein reales 110-kV-Netz nachgebildet. Dabei sind alle Elemente, wie Sammelschienen, Leitungen, Schalter, Generatoren, Lasten und Transformatoren dem realen Netz mit den entsprechenden Daten entnommen. Das hinterlagerte Modell des 220-kV-Netzes entspricht dem realen 220-kV-Netz.

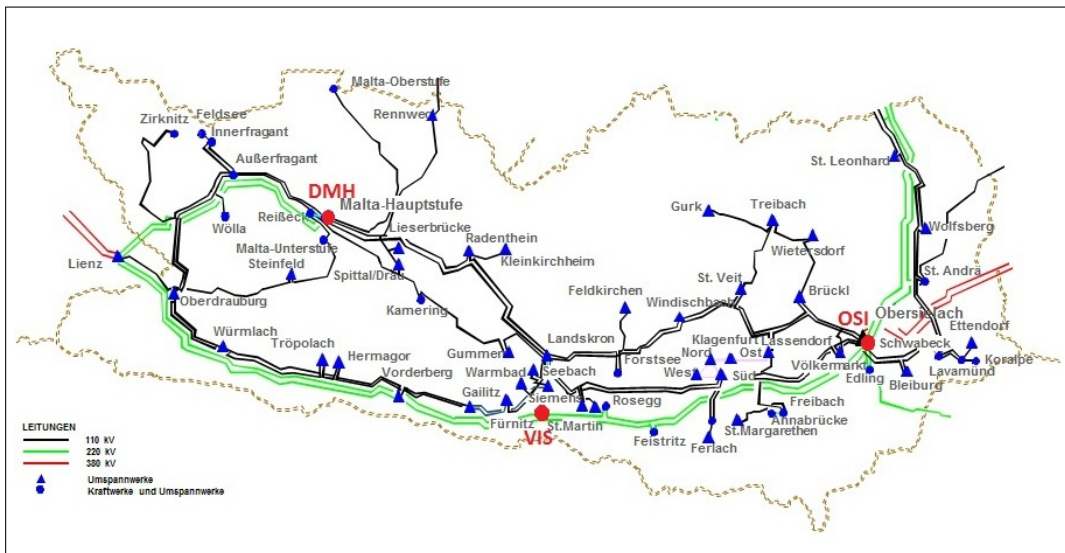


Abbildung 11.1.: Übersichtsbild des vollständigen Modells mit VIS - Netzkopplung[4]

Abbildung 11.1 zeigt eine Übersicht des vollständigen Modells mit den entsprechenden Transformatorstellen in DMH, OSI und VIS. Für die Winkel β wurden nur noch -60° , 60° und 90° untersucht, da diese den größtmöglichen Einfluss auf die Wirkleistungsregelung haben. In den Lastflussimulationen wird die Stufenstellung 1 als \times und 25 als $*$ markiert. Im unregulierten Zustand sind die Transformatoren in VIS in Mittelstellung und jene in DMH und OSI in der realen Stufenstellung.



Untersucht werden folgende Elemente:

- der Lastfluss über die Transformatoren in DMH, OSI und VIS
- die Leistungssensitivität je Stufe der geregelten Transformatoren
- der Lastfluss über die Doppelleitungen 115/4B und 115/3A (von DMH nach LAN)

Die Leistungen der Generatoren und Lasten sind aus den realen Daten des Jahres 2010 übernommen, wobei zwischen Starklast, maximale Erzeugung und maximaler Pumpbetrieb unterschieden wird, welche im Kapitel 9 definiert sind.

11.1. Regelung in VIS - Starklast

Die Transformatoren in VIS werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 bedeutet Mittelstellung). Die Transformatoren in DMH und OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 14 (in DMH) und 18 (in OSI) in Schrägregelung mit 60° gehalten.

Über die Transformatoren in VIS wird das 110-kV-Netz an das Höchstspannungsnetz gekoppelt, wodurch im ungeregelten Zustand über DMH -109MW , über OSI -144MW und über VIS -65MW transportiert werden. Bei der Regelung in VIS kann dort die Höhe der übertragenen Leistung bestimmt werden. Wie in Abbildung 11.2 zu sehen ist, kann der Wirkleistungstransfer in VIS zwischen 63MW und -193MW geregelt werden. In DMH und OSI vermindert bzw. erhöht sich die Wirkleistung entsprechend der Regelung in VIS.

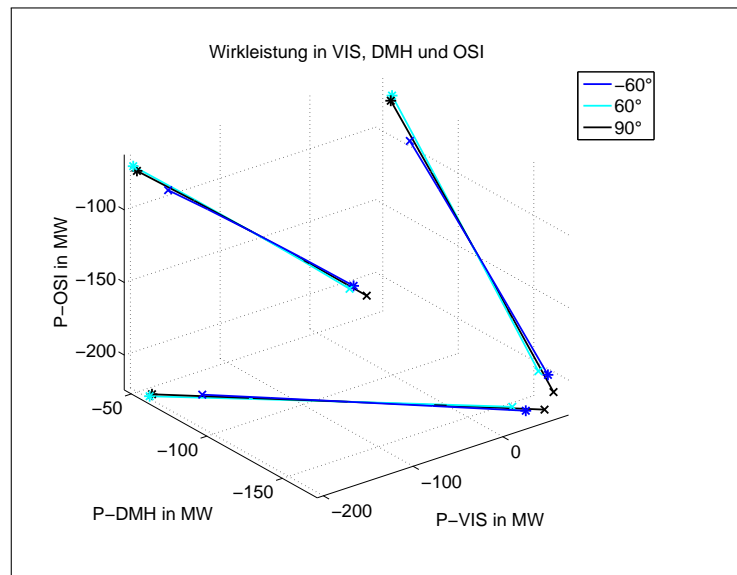


Abbildung 11.2.: Wirkleistungstransfer in DMH, OSI, VIS

Wie in Abbildung 11.3 ersichtlich ist, wird über die Transformatoren in DMH Blindleistung ins Höchstspannungsnetz abgegeben und über jene in OSI und VIS aufgenommen. Durch die Regelung in VIS kann mit der -60° Schrägregelung die Blindleistung im größten Bereich geregelt werden. Dabei geht die Regelung soweit, dass neben DMH auch in VIS Blindleistung ins Höchstspannungsnetz abgegeben werden kann und der restliche Blindleistungsbedarf über OSI gedeckt wird.

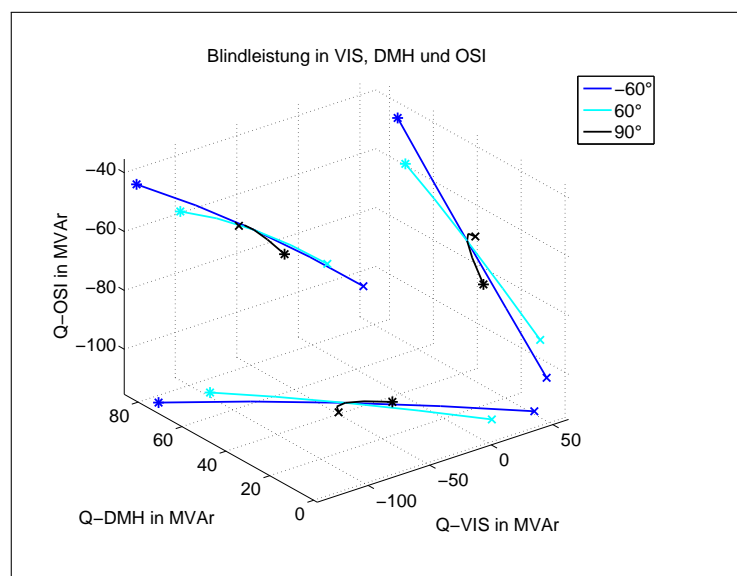


Abbildung 11.3.: Blindleistungstransfer in DMH, OSI, VIS

Die Wirkleistung kann in VIS am besten durch die Quer- und die 60° Schrägregelung, mit 10,67MW bzw. 10,04MW je Stufe, geregelt werden. Mit den beiden Schrägregelungen kann der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in VIS um 0,34kV bzw. 0,39kV je Stufe geändert werden.

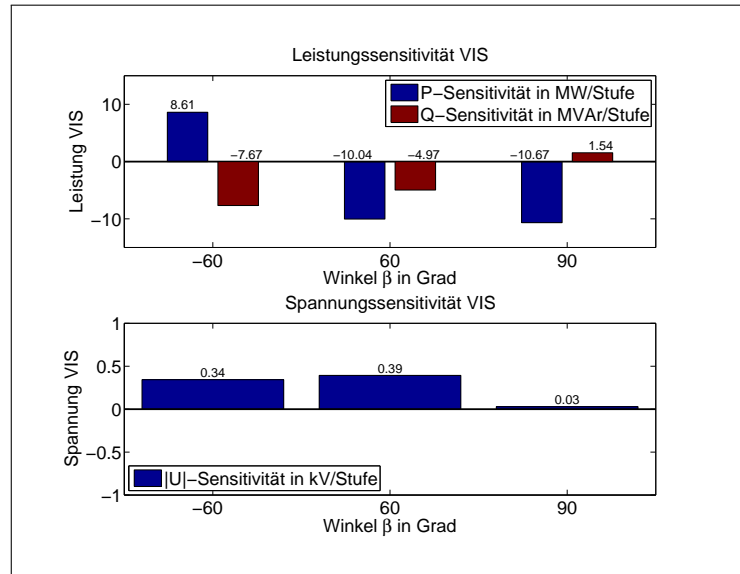


Abbildung 11.4.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS

Durch die Querregelung kann die Doppelleitung zwischen DMH und LAN im größten Bereich, bezüglich des Wirkleistungsflusses, geregelt werden. Im unregulierten Zustand fließt die Wirkleistung von DMH nach LAN in der Größe von -124MW. Durch die Querregelung kann dieser Wirkleistungsfluss zwischen -157MW und -93MW geregelt werden. Mit der 60° Schrägregelung lässt sich die Doppelleitung auf ebenfalls -93MW entlasten, allerdings kann man sie nur auf -151MW überlasten. Dieses Missverhältnis ist bereits in Abbildung 11.2 zu sehen.

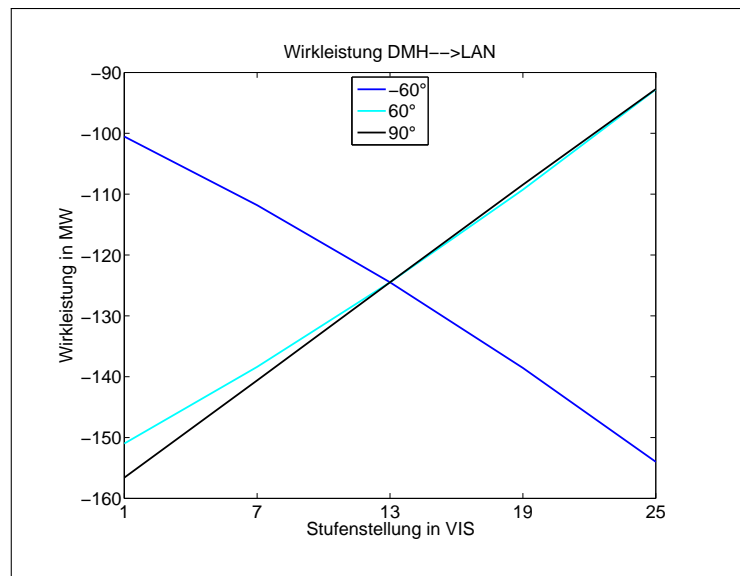


Abbildung 11.5.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in der Stufenstellung 25 bei der 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in LAN überschritten.

11.2. Regelung in VIS - maximale Erzeugung

Die Transformatoren in VIS werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 ist gleich Mittelstellung). Die Transformatoren in DMH und OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 14 (in DMH) und 20 (in OSI) in Schrägregelung mit 60° gehalten.

Da bei der maximalen Erzeugung die Wirkleistungsbilanz im 110-kV-Netz positiv ist, muss der Leistungsüberschuss ins Höchstspannungsnetz abgeführt werden. Im unregulierten Zustand erfolgt dies mit 239MW in DMH, mit 99MW in OSI und mit 161MW in VIS. Diese ungleiche Verteilung beruht darauf, dass ein Großteil der Wirkleistungserzeuger in DMH sich befindet. Mit der Querregelung in VIS lässt sich dort der Wirkleistungstransfer zwischen 285MW und 35MW regeln, wodurch sich die Wirkleistung in DMH und OSI entsprechend ändert.

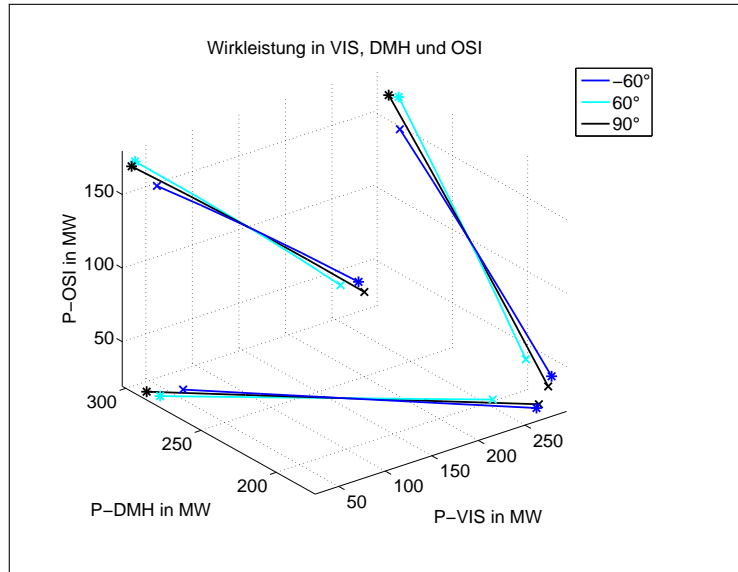


Abbildung 11.6.: Wirkleistungstransfer in DMH, OSI, VIS

Da in DMH neben der Wirkleistung auch entsprechend Blindleistung bereitgestellt wird, herrscht ein Blindleistungsüberschuss, welcher ins Höchstspannungsnetz geführt wird. In OSI und VIS muss dagegen Blindleistung aus dem Höchstspannungsnetz bezogen werden. Daher wird im unregulierten Zustand in DMH 20MVar, in OSI -134 und in VIS -67MVar Blindleistung transferiert. Mit der -60° Schrägregelung in VIS kann die Blindleistung am besten geregelt werden.

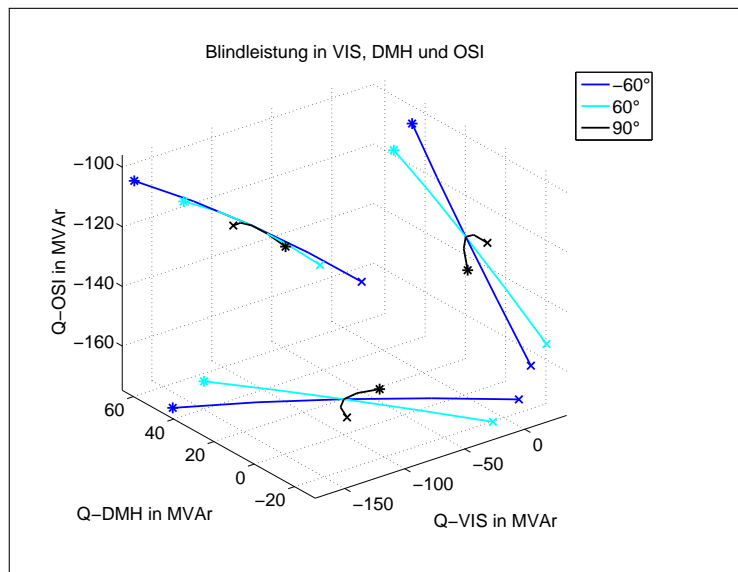


Abbildung 11.7.: Blindleistungstransfer in DMH, OSI, VIS

Die Wirkleistung kann in VIS am besten mit der Querregelung beeinflusst werden, wodurch eine Wirkleistungssensitivität von 10,42MW je Stufe erreicht werden kann. Bei den beiden Schrägregelungen unterscheiden sich die Sensitivitäten der Wirkleistung mit 9,02MW bzw. 9,19MW je Stufe nur in einem sehr geringen Ausmaß. Außerdem lässt sich der Betrag der Spannung der 110-kV-Sammelschiene um 0,32kV bzw. 0,42kV je Stufe ändern.

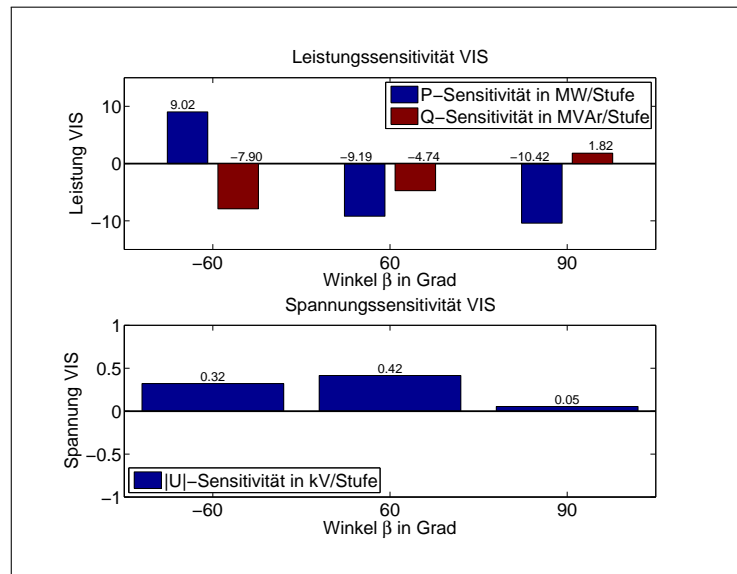


Abbildung 11.8.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS

Da neben dem Wirkleistungsbedarf in LAN auch der Wirkleistungsüberschuss über die Transformatoren in VIS ins Höchstspannungsnetz geleitet wird, ist der Wirkleistungsfluss zwischen DMH und LAN um einiges größer als bei der *Starlast*. Dabei herrscht im unregulierten Zustand ein Wirkleistungsfluss von -201MW und lässt sich mit der Querregelung zwischen -232MW und -169MW regeln.

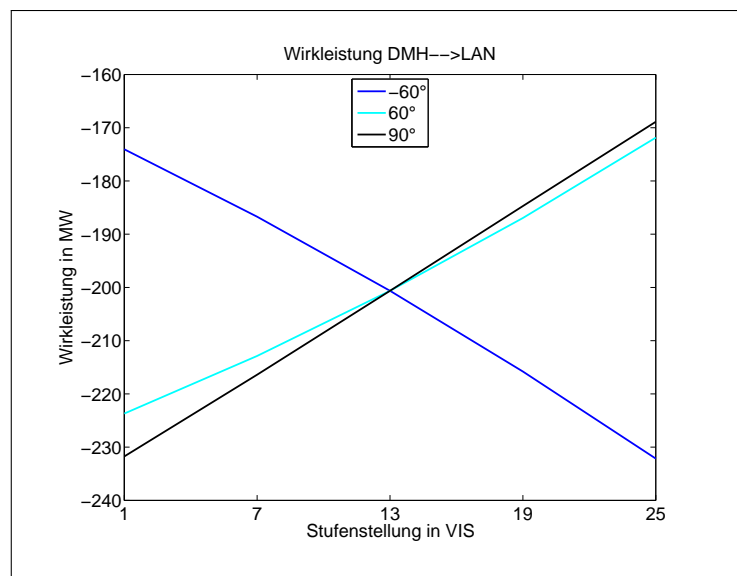


Abbildung 11.9.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in den Stufenstellungen 13 bis 25 bei der -60° und 60° Regelung, sowie in den Stufenstellungen 7 bis 25 bei der 90° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in IF überschritten.

11.3. Regelung in VIS - maximaler Pumpbetrieb

Die Transformatoren in VIS werden mit den Winkeln -60° , 60° und 90° bei den Stufenstellungen 1, 7, 13, 19 und 25 betrieben (Stufenstellung 13 ist gleich Mittelstellung). Die Transformatoren in DMH und OSI werden in ihren realen Einstellungen mit jeweils Stufenstellung 22 (in DMH) und 16 (in OSI) in Schrägregelung mit 60° gehalten.

Durch den Pumpbetrieb der Speicherkraftwerke herrscht ein hohes Wirkleistungsdefizit, welches über die Transformatoren in DMH, OSI und VIS aus dem Höchstspannungsnetz gedeckt werden muss. Dabei wird im unregulierten Zustand in DMH -200MW , in OSI -226MW und in VIS -131MW bezogen. Mittels der Querregelung kann in VIS der Wirkleistungsbezug zwischen 0MW und -260MW geregelt werden.

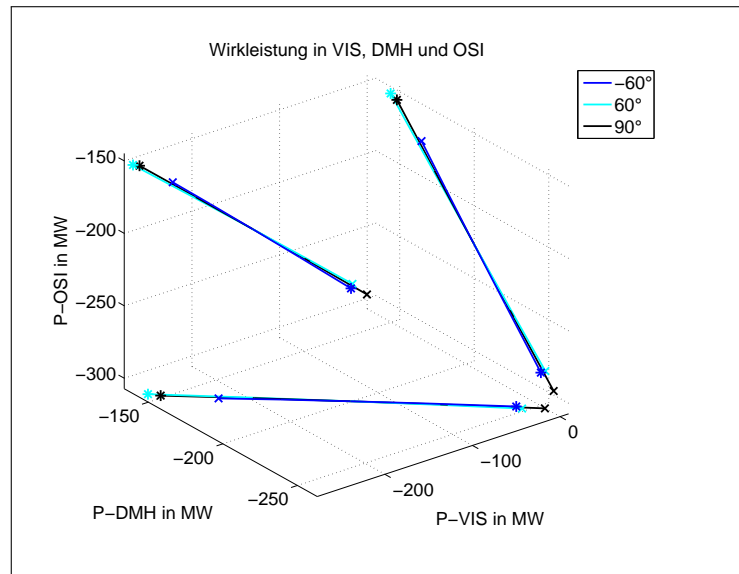


Abbildung 11.10.: Wirkleistungstransfer in DMH, OSI, VIS

Die Blindleistung wird im unregulierten Zustand über alle drei Übergabestellen aus dem Höchstspannungsnetz bezogen. Mit der Querregelung in VIS kann die Blindleistung so weit verschoben werden, dass entweder in DMH oder in VIS die Blindleistung ins Höchstspannungsnetz abgeführt werden muss.

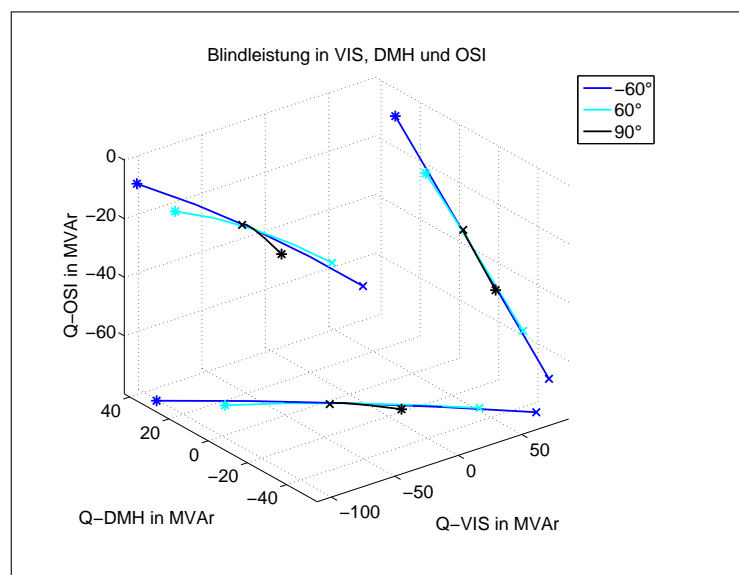


Abbildung 11.11.: Blindleistungstransfer in DMH, OSI, VIS

Die Wirkleistungssensitivität ist mit der 60° Schräg- und der Querregelung mit 10,43MW und 10,82MW je Stufe am größten. Der Betrag der Spannung an der 110-kV-Sammelschiene in VIS lässt sich mit den beiden Schrägregelungen um 0,35kV bzw. 0,38kV je Stufe ändern.

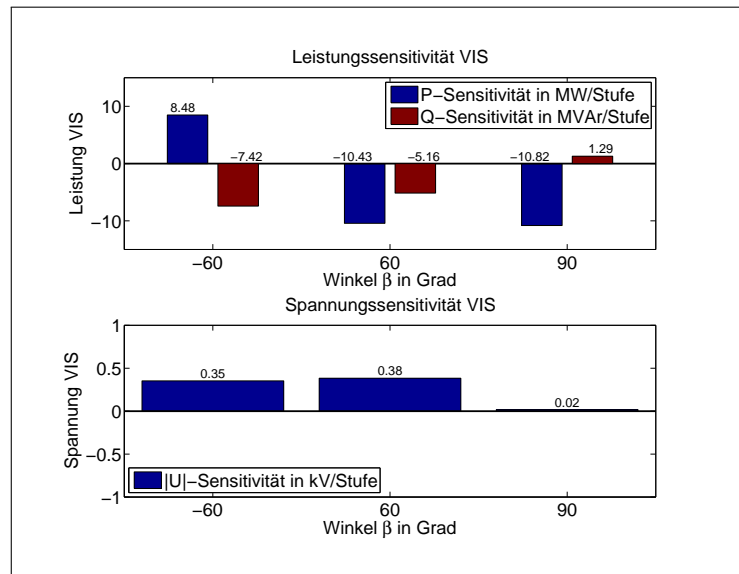


Abbildung 11.12.: Leistungs- und Spannungssensitivität in VIS

Da der Wirkleistungsbedarf in LAN relativ gering ist und die Pumpleistung nahe DMH maximal wird ist der Wirkleistungsfluss von LAN nach DMH, welcher sich in der positiven Wirkleistung darstellt. Daher ist der Wirkleistungsfluss im unregulierten Zustand bei 46MW und lässt sich mit der Querregelung zwischen 14MW und 77MW regeln.

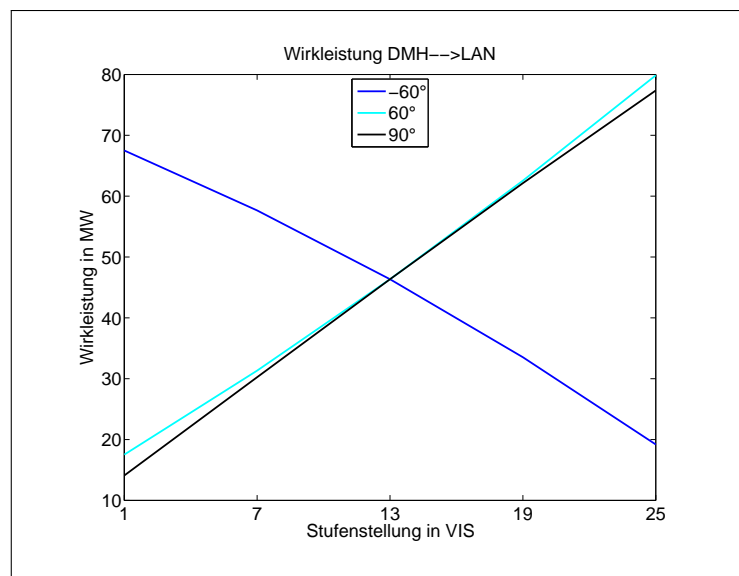


Abbildung 11.13.: Wirkleistungsfluss von DMH nach LAN

Die Spannungsgrenze von 121kV wird in den Stufenstellungen 13 bis 25 bei der -60° und 60° Regelung, sowie in den Stufenstellungen 7 bis 19 bei der 90° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in OSI überschritten. Ebenfalls wird die Spannungsgrenze von 121kV in der Stufenstellung 25 bei der -60° und 60° Regelung an der 110-kV-Sammelschiene in LAN übertreten.

Teil III.

Diskussion der Simulationsergebnisse

12. Diskussion

12.1. Diskussion - vereinfachtes/ vollständiges Netz

Die Simulationen des vollständigen und vereinfachten Netzes sind nur bedingt mit einander vergleichbar, da die Lasten und Generatoren in beiden Fällen unterschiedlich sind. Somit wird nicht auf absolute Leistungen Bezug genommen, sondern auf die jeweiligen Änderungen der Traforegelung.

Aus den Simulationen des vollständigen und vereinfachten Netzes ist zu erkennen, dass die Wirkleistungsregelung für die -60° , 60° und 90° Regelung zu durchaus ähnlichen Ergebnissen führt. Im Gegensatz zur Wirkleistung sind die Ergebnisse der Blindleistungsregelung sehr stark von der Belastungssituation im 110-kV-Netz abhängig. Dadurch ist die Blindleistungsregelung nur bedingt zwischen dem vereinfachten und vollständigen Netz vergleichbar.

Die folgenden Tabellen zeigen die Gegenüberstellung zwischen der Wirkleistungsregelung im vereinfachten und vollständigen Netz. Dabei wird jeweils dargestellt um welchen Wert sich die Wirkleistung maximal erhöhen oder vermindern lässt im Gegensatz dazu, wenn die Transformatoren in Mittelstellung sind.

Vollständiges Netz ohne VIS bei Starklast

| ΔP in MW | DMH | OSI |
|------------------|----------|----------|
| -60° | -55 / 64 | 32 / -40 |
| 60° | 71 / -83 | -50 / 55 |
| 90° | 78 / -74 | -51 / 47 |

Tabelle 12.1.: Regelung in DMH

Vereinfachtes Netz ohne VIS

| ΔP in MW | DMH | OSI |
|------------------|----------|----------|
| -60° | -33 / 43 | 26 / -38 |
| 60° | 60 / -68 | -57 / 61 |
| 90° | 62 / -58 | -57 / 50 |

Tabelle 12.2.: Regelung in DMH

Vollständiges Netz mit VIS - Netztrennung bei Starklast

| ΔP in MW | DMH | OSI | VIS1 | VIS2 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| -60° | 41 / -51 | 47 / -60 | -47 / 58 | -46 / 55 |
| 60° | -46 / 55 | -59 / 69 | 58 / -69 | 51 / -62 |
| 90° | -56 / 55 | -68 / 66 | 67 / -66 | 61 / -61 |

Tabelle 12.3.: Regelung in VIS1 und VIS2

Vereinfachtes Netz mit VIS - Netztrennung

| ΔP in MW | DMH | OSI | VIS1 | VIS2 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| -60° | 43 / -51 | 43 / -52 | -41 / 47 | -45 / 52 |
| 60° | -49 / 54 | -55 / 61 | 45 / -51 | 54 / -62 |
| 90° | -60 / 56 | -62 / 56 | 55 / -53 | 61 / -57 |

Tabelle 12.4.: Regelung in VIS1 und VIS2

Vollständiges Netz mit VIS - Netzkopplung bei Starklast

| ΔP in MW | DMH | OSI | VIS |
|------------------|----------|----------|------------|
| -60° | 41 / -50 | 47 / -61 | -93 / 114 |
| 60° | -44 / 53 | -62 / 72 | 109 / -132 |
| 90° | -54 / 54 | -70 / 68 | 128 / -128 |

Tabelle 12.5.: Regelung in VIS

Vereinfachtes Netz mit VIS - Netzkopplung

| ΔP in MW | DMH | OSI | VIS |
|------------------|----------|----------|------------|
| -60° | 44 / -50 | 43 / -53 | -86 / 99 |
| 60° | -45 / 50 | -59 / 65 | 100 / -114 |
| 90° | -56 / 52 | -66 / 59 | 117 / -110 |

Tabelle 12.6.: Regelung in VIS

Wie in den Tabellen zu sehen, ist das vereinfachte Modell durchaus dazu geeignet um prinzipielle Regelungen der Wirkleistung zu simulieren. Die Simulationsergebnisse stimmen dann zwischen vereinfachtem und vollständigem Netz am besten überein, wenn der Leistungsfluss über die Transformatoren, bei Mittelstellung möglichst gleich groß ist, da die Regelung belastungsabhängig ist.

Die Simulationsergebnisse weichen im vereinfachten Modell gegenüber dem vollständigen mit Ausnahme der -60° Regelung ohne VIS zwischen -5% und 26% ab.

12.2. Diskussion - unterschiedliche Belastungen (vollständiges Netz)

Bei der Simulation ohne VIS ist die Wirkleistungssensitivität wesentlich von der Belastung abhängig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Wirkleistungsfluss über die Transformatoren in DMH bei der Stufenstellung 13 sehr unterschiedlich bei den Lastfällen *Starklast*, *maximale Erzeugung* und *maximaler Pumpbetrieb* ist.

Bei der Simulation mit VIS und Netztrennung ist der Effekt, dass die Wirkleistungssensitivität von der Belastung abhängig ist im Westnetz nicht zu erkennen, allerdings im Ostnetz sehr wohl. Dies beruht darauf, dass der Wirkleistungsfluss über den Transformator in VIS1 bei Mittelstellung in allen drei Lastfällen (*Starklast*, *maximale Erzeugung* und *maximaler Pumpbetrieb*) ähnlich groß ist. Im Gegensatz ist der Wirkleistungsfluss über den Transformator in VIS2 bei Mittelstellung in allen drei Lastfällen wesentlich unterschiedlich.

| P-Sensitivität in MW/Stufe | VIS1 | VIS2 |
|-------------------------------|-------|-------|
| -60° | 4,39 | 4,21 |
| 60° | -5,3 | -4,71 |
| 90° | -5,55 | -5,1 |

Tabelle 12.7.: Wirkleistungssensitivität in VIS1 und VIS2 bei Netztrennung und Starklast

| P-Sensitivität in MW/Stufe | VIS1 | VIS2 |
|-------------------------------|-------|-------|
| -60° | 4,5 | 4,49 |
| 60° | -5,22 | -3,86 |
| 90° | -5,56 | -4,77 |

Tabelle 12.8.: Wirkleistungssensitivität in VIS1 und VIS2 bei Netztrennung und max. Erzeugung

| P-Sensitivität in MW/Stufe | VIS1 | VIS2 |
|-------------------------------|-------|-------|
| -60° | 4,52 | 4,05 |
| 60° | -5,25 | -5,2 |
| 90° | -5,59 | -5,29 |

Tabelle 12.9.: Wirkleistungssensitivität in VIS1 und VIS2 bei Netztrennung und max. Pumpbetrieb

Vollständiges Netz mit VIS - Netzkopplung

| ΔP in MW | DMH | OSI | VIS |
|------------------|----------|----------|------------|
| -60° | 41 / -50 | 47 / -61 | -93 / 114 |
| 60° | -44 / 53 | -62 / 72 | 109 / -132 |
| 90° | -54 / 54 | -70 / 68 | 128 / -128 |

Tabelle 12.10.: Regelung in VIS bei Starklast

| ΔP in MW | DMH | OSI | VIS |
|------------------|----------|----------|------------|
| -60° | 46 / -55 | 49 / -61 | -99 / 118 |
| 60° | -37 / 47 | -60 / 70 | 98 / -122 |
| 90° | -52 / 54 | -70 / 68 | 124 / -126 |

Tabelle 12.11.: Regelung in VIS bei max. Erzeugung

| ΔP in MW | DMH | OSI | VIS |
|------------------|----------|----------|------------|
| -60° | 35 / -45 | 50 / -63 | -91 / 112 |
| 60° | -48 / 56 | -61 / 71 | 114 / -136 |
| 90° | -54 / 51 | -71 / 69 | 131 / -129 |

Tabelle 12.12.: Regelung in VIS bei max. Pumpbetrieb

Aus den Tabellen ist zu sehen, dass der Wirkleistungsregelbereich von der Belastung abhängt. Dies ist dadurch zu erklären, da bei den unterschiedlichen Belastungen die 110-kV-Spannungszeiger an den zu regelnden 110-kV-Sammelschienen verschieden von einander stehen und somit die Regelung beeinflussen. In den Tabellen sind jeweils die maximale Änderung der Wirkleistung dargestellt.

Mit der Netzkopplung und VIS ist die Sensitivität der Wirkleistung unterschiedlich stark von der Belastung abhängig. Einerseits wird die Querregelung kaum von der Belastung beeinflusst und andererseits ist die 60° Schrägregelung sehr wohl in beträchtlichem Maß von der Belastungssituation abhängig.

12.3. Diskussion - Leitungsbelastung

Um die Doppelleitung 115/4B und 115/3A (von DMH nach LAN) zu entlasten, empfiehlt sich der Schaltzustand Netztrennung, wodurch die Regelung in VIS1 die Belastung der Leitung sehr gut regeln kann. Soll die Leitung in einem möglichst großem Bereich geregelt werden, so müssen die Transformatoren in DMH und der Transformator in VIS1 gegengleich geregelt werden. Dadurch kann der maximale Regelbereich ausgenutzt werden. Die Doppelleitung

ist vor allem dann stark belastet, wenn in LAN ein hoher Wirkleistungsbedarf herrscht. Dies ist im Lastfall *Starklast* gegeben, allerdings ist die Doppelleitung im Lastfall *max. Erzeugung* noch stärker belastet, da neben einem hohen Wirkleistungsbedarf in LAN auch der Wirkleistungsüberschuss ins Höchstspannungsnetz abgeführt werden muss. In den Tabellen wird dargestellt auf welche Wirkleistung die Doppelleitung maximal entlastbar oder mehr belastbar ist.

Vollständiges Netz mit VIS - Netztrennung

| P in MW | Minimum | Mittel | Maximum |
|---------|---------|--------|---------|
| -60° | -122 | -150 | -182 |
| 60° | -120 | -150 | -173 |
| 90° | -117 | -150 | -181 |

Tabelle 12.13.: Regelung in VIS1 bei max. Erzeugung

Vollständiges Netz mit VIS - Netzkopplung

| P in MW | Minimum | Mittel | Maximum |
|---------|---------|--------|---------|
| -60° | -174 | -201 | -232 |
| 60° | -172 | -201 | -224 |
| 90° | -169 | -201 | -232 |

Tabelle 12.14.: Regelung in VIS bei max. Erzeugung

12.4. Abschlussempfehlung

Um die Doppelleitung 115/4B und 115/3A zu entlasten empfiehlt sich eine 220/110-kV-Netzabstützung in VIS mit zwei Querregeltransformatoren. Die Regelspannung kann dabei einen Wert von $\pm 11,16\%$ der Bezugsspannung annehmen, welche in ± 12 Stufen unterteilt ist. Die Querregelung ist der 60° -Schrägregelung vorzuziehen, da die Querregelung weniger problematisch bezüglich der Spannungshaltung ist. Um die Regelbereiche zu erhöhen kann die Regelspannung beim primärseitig geregelten Querregeltransformator auch auf $\pm 17,67\%$ (± 19 Stufen) der Bezugsspannung erhöht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] V. Crastan. *Elektrische Energieversorgung 1*. Springer, 2006.
- [2] H. Renner. *Regulierung und Stabilität elektrischer Energiesysteme*. TU Graz, 2010.
- [3] K. Heuck and D. Dettmann, K. und Schulz. *Elektrische Energieversorgung*. Vieweg, 2007.
- [4] KNG. *Hoch- und Höchstspannungsnetz in Kärnten*. KELAG Netz GmbH, 2011.