



Wolfgang Mandl-Stangl, BSc

Optimale Blindleistungsregelung bei verteilter Einspeisung

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Elektrische Anlagen



Graz, Juni 2015

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei all den Personen, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner für das Bereitstellen dieses sehr interessanten Themas der Masterarbeit. Er stand mir stets freundlich und hilfsbereit mit interessanten Anregungen und Hilfestellungen zur Seite.

Vielen Dank für die Zeit und Mühen, die Sie in meine Arbeit investiert haben.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde versucht, allgemein gültige Regeln zur Aufteilung einer bestimmten, geforderten Blindleistung auf Kraftwerke in einem betrachteten Netzabschnitt, zu erarbeiten, wobei die Wirkverluste in diesem Netzabschnitt zusammen mit den Wirkverluste der Erregerwicklungen der Generatoren minimal ausfallen sollen. Je nach Spannungsverhältnissen im übergeordneten Netz soll Blindleistung in das übergelagerte Netz eingespeist oder daraus bezogen werden. Diese vom Netzbetreiber geforderte Blindleistung soll entsprechend auf die Erzeugungseinheiten im betrachteten Netzabschnitt verteilt werden.

An verschiedenen Beispielnetzen wurden bei unterschiedlichen Spannungsniveaus im übergeordneten Netz optimierte Blindlastflüsse bei verschiedensten Maschinenarbeitspunkten der Erzeugungseinheiten berechnet. Aus diesen Ergebnissen konnten Verhaltensmuster der Erzeugungseinheiten im Hinblick auf die gelieferte Blindleistung erkannt werden. Daraus wurden Regeln zur optimalen Aufteilung der geforderten Blindleistung abgeleitet.

Aus den Ergebnissen der Lastflussberechnungen an einfachen, kleinen Netzen konnte festgestellt werden, dass der Generator am Zweig mit der kleinsten Resistanz bzw. am Knoten mit dem kleinsten resistiven Anteil der Knotenimpedanz, am meisten Blindleistung einspeist, wenn die Generatoren die selbe Nennleistung aufweisen. Ist die Nennleistung eines Generators größer, nimmt die auf die Generatornennleistung bezogene eingespeiste Blindleistung dieser Maschine im Vergleich dazu ab. Im Falle eines realen Netzes konnte kein Zusammenhang zwischen Resistanzen bzw. Reaktanzen der Knotenimpedanzen und den Generatorblindleistungen erkannt werden.

Abstract

The goal of this master thesis is to find generally accepted rules for dispatching a required amount of reactive power to power plants in a distribution network. This demanded reactive power has to be dispatched in a way that the active power losses in this network and the losses of the excitation system of the generators are minimised. If the voltage level in the transmission network is above 1 p.u. the distribution network has to absorb reactive power from the transmission network. If the voltage is below, reactive power has to be fed in.

The amount of reactive power, fixed by the transmission system operator has to be dispatched to power plants so that the resulting power flow causes minimum active power losses. For various machine operating points and different voltage levels at the connection point, optimal power flows were calculated. From these simulations, basic rules for distributing reactive power to plants have been derived.

For simple radial systems the generator at the branch with the smallest resistance feeds in the most amount of reactive power. At a meshed grid the generator at the bus with the smallest resistance of the node impedance feeds in the highest portion of reactive power. In the case of a real meshed grid no relation between resistances or reactances of the node impedances could be found.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	4
2 Analytische Minimierung der Netzverluste	6
2.1 Berechnung der Verlustleistung auf einer Leitung	6
2.2 Aufteilung des Blindlastflusses bei minimalen Wirkverlusten	7
2.3 Erkenntnisse	10
3 Verlustoptimierung unter Berücksichtigung der Erregerverluste	12
3.1 Modellierung der Betriebsmittel in MATPOWER	12
3.2 Formulierung des Optimierungszieles und der Kostenfunktionen	14
3.3 Randbedingungen für die Optimierung	18
4 Ergebnisse aus den Simulationen	21
4.1 Strahlennetz mit Generatoren der selben Nennleistung	22
4.1.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} < 1$ p.u.	24
4.1.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} = 1$ p.u.	30
4.1.3 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} > 1$ p.u.	34
4.2 Vermaschtes Netz mit Generatoren der selben Nennleistung	41
4.2.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} < 1$ p.u.	43
4.2.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} \geq 1$ p.u.	46
4.3 Vermaschtes Netz mit Generatoren unterschiedlicher Nennleistungen	50
4.3.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} < 1$ p.u.	50
4.3.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} \geq 1$ p.u.	53
4.4 Reales vermaschtes Netz	56
4.4.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} < 1$ p.u.	57
4.4.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{ii} \geq 1$ p.u.	60
5 Gewonnene Erkenntnisse	64
Literaturverzeichnis	66
A Lastflussberechnungen in Matlab	67
A.1 Berechnung optimierender Lastflüsse mit MATPOWER	67
A.2 Daten der Betriebsmittel	69
A.3 Netzabschnitt in MATPOWER	70
A.4 Blindleistungsgrenzen der Generatoren	72

Abkürzungsverzeichnis

Δu_{Sh}	Spannungsabfall über die Shuntreaktanz in p.u.
φ_{min}	kleinster zugelassener Phasenwinkel am Übergabeknoten
ω	Kreisfrequenz
ap	Kosten für die Verlustleistung
ap_i	Kostenfaktor für die Wirkleistung
aq_i	Kostenfaktor für die Blindleistung
b_{Lt}	Suszeptanz einer Leitung in p.u.
c'	auf die Leitungslänge bezogene Kapazität
$\cos_{\ddot{u}}(\varphi)$	Wirkleistungsfaktor an der Übergabestelle
\underline{E}	Innere Spannung eines Generators
e	Innere Spannung eines Generators in p.u.
i_f	Erregerstrom in p.u.
i_g	Generatorstrom in p.u.
G_Z	Leitwert eines Zweiges
I	Strom
I_b	Blindstrom
\underline{I}_g	Generatorstrom
I_w	Wirkstrom
I_{f0}	Leerlauferrregerstrom
I_{gb}	Blindanteil des Generatorstromes
I_{gw}	Wirkanteil des Generatorstromes
K_Q	Kostenfunktion für die Blindleistungsbereitstellung
l	Länge einer Leitung
p_f	Erregerleistung in p.u.
P_{f0}	Leerlauferrregerleistung
P_{fQ}	Erregerleistung für die Bereitstellung von Blindleistung
P_g	eingespeiste Wirkleistung eines Generators
p_g	Wirkleistung eines Generators in p.u.
p_{Gen}	eingespeiste Wirkleistung aller Generatoren in p.u.
p_i	Wirkleistung über die Leitung i in p.u.
p_{ig}	gelieferte Wirkleistung des Generators i in p.u.
P_{Last}	Wirkleistung der Last
p_{Last}	Wirkleistung der Last in p.u.
p_N	eingespeiste Wirkleistung ins Netz in p.u.
P_v	Verlustwirkleistung
p_v	Wirkverlustleistung in p.u.
$P_{v,1ph}$	Wirkverlustleistung bei einphasigem Betrieb
$p_{v,i}$	Wirkverlustleistung der Leitung i in p.u.
$p_{v,uN}$	Wirkverlustleistung im untergeordneten Netz in p.u.
$p.u.$	Per Unit

q_{fp}	Anteil der Erregerleistung für die Bereitstellung von Wirkleistung in p.u.
q_{fq}	Anteil der Erregerleistung für die Bereitstellung von Blindleistung in p.u.
Q_g	eingespeiste Blindleistung eines Generators
q_g	Blindleistung eines Generators in p.u.
q_i	Blindleistung über die Leitung i in p.u.
q_{ig}	gelieferte Blindleistung des Generators i in p.u.
Q_{Last}	Blindleistung der Last
q_{Last}	Blindleistung der Last in p.u.
q_N	Blindleistung ins Netz in p.u.
$q_{N,max}$	maximal zulässiger Blindlastfluss am Übergabeknoten in p.u.
Q_v	Verlustblindleistung
r'	Widerstandsbelag einer Leitung
R	Ohmscher Widerstand
r_g	Ohmscher Widerstand der Generatorständerwicklung in p.u.
$r_{g,n}$	Ohmscher Widerstand der Generatorständerwicklung bezogen auf seine Nennleistung in p.u.
R_{Gen}	Ohmscher Widerstand der Generatorständerwicklung
R_{Lt}	Ohmscher Widerstand einer Leitung
r_{Lt}	Ohmscher Widerstand einer Leitung in p.u.
r_{Lti}	Ohmscher Widerstand der Leitung i in p.u.
R_{Tr}	Ohmscher Widerstand eines Transformators
r_{Tr}	Widerstand eines Transformators in p.u.
R_Z	Widerstand eines Zweiges
SS1	Sammelschiene 1
S_{Bez}	Bezugsscheinleistung
s_g	Nennleistung eines Generators in p.u.
$S_{n,g}$	Nennscheinleistung eines Generators
$S_{n,Tr}$	Nennscheinleistung eines Transformators
S_v	Verlustscheinleistung
$u_{\ddot{u}}$	Spannung im übergeordneten Netz in p.u.
U_{f0}	Leerlauferregerspannung
u_f	Erregerspannung in p.u.
\underline{U}_g	Generatorklemmenspannung
u_g	Generatorklemmenspannung in p.u.
u_{Hk}	Spannung am Hilfsknoten in p.u.
u_{ig}	Spannung am Generator i in p.u.
\underline{U}_{Lt}	Spannungsabfall über eine Leitung
U_n	Nennspannung
u_k, u_r	Relative Kurzschlussspannung eines Transformators
x'	Reaktanzbelag einer Leitung
X_d	Synchronreaktanz
x_d	Synchronreaktanz in p.u.
X_{Lt}	Reaktanz einer Leitung
x_{Lt}	Reaktanz einer Leitung in p.u.
x_{Lti}	Reaktanz der Leitung i in p.u.
X_{Sh}	Reaktanz des Shunts

x_{Sh}	Reaktanz des Shunts zur Beeinflussung des Blindlastflusses
X_{Tr}	Reaktanz eines Transformators
x_{Tr}	Reaktanz eines Transformators in p.u.
$\underline{\mathbf{Y}}$	Admittanzmatrix
$\underline{\mathbf{Z}}$	Impedanzmatrix
Z_{Bez}	Bezugsimpedanz
\overline{Z}_{ij}	Zweigimpedanz
\underline{Z}_{Lt}	Impedanz einer Leitung

1 Einleitung

Der bewusste und effiziente Umgang mit elektrischer Energie ist ein wichtiges Thema. Auch im Bereich der Verteilung von elektrischer Energie gibt es Einsparungspotenzial. In Übertragungs- und Verteilnetzen treten Verluste an den Übertragungsleitungen, Transformatoren und anderen Betriebsmitteln auf. Verluste ergeben sich nicht nur aus der Übertragung von Wirkleistung, sondern entstehen auch durch die Übertragung von Blindleistung. Den Zusammenhang zwischen Wirkverlusten und Lastfluss verdeutlicht die Formel 2.1.

Blindleistung muss von Generatoren oder Kompensationsanlagen bereitgestellt werden, um die Spannung im Netz innerhalb des erlaubten Spannungsbandes halten zu können. Da Blindleistung nicht über größere Distanzen transportiert werden soll, muss Blindleistung, möglichst gleichmäßig über das Netz verteilt, eingespeist werden [1]. Der Transport großer Blindleistung über die Hochspannungsleitungen, deren Impedanzen überwiegend induktiv sind, würden zu großen Spannungsabfällen führen und auch noch größere Wirkverluste verursachen. Aus diesem Grund macht es Sinn, die benötigte Blindleistung, abhängig vom Einspeiseort, so auf die im betrachteten Netzabschnitt befindlichen Kraftwerke zu verteilen, dass die Verluste für die Bereitstellung dieser zusätzlichen Blindleistung und die Verluste für die Übertragung der Blindleistung minimiert werden.

In dieser Arbeit werden einfache, allgemein gültige Regeln zur Aufteilung der Blindleistung, die vom Betreiber des übergeordneten Netzes gefordert wird, auf Kraftwerke in einem bestimmten Netzabschnitt erarbeitet. Die einzuspeisende Blindleistung soll so aufgeteilt werden, dass einerseits die Wirkverluste in diesem betrachteten Netzabschnitt minimiert werden und andererseits soll die zusätzliche Erregerleistung, der notwendig ist, um die zusätzlich benötigte Blindleistung bereitstellen zu können, minimiert werden. Die erarbeiteten Regeln sollen Lösungen für die Blindleistungsaufteilung darstellen, die nicht zwingend mit den verlustoptimalen Lösungen zusammenfallen, jedoch in deren Nähe liegen.

Diese beiden Kriterien sind konträr. Die Forderung nach kleinen Wirkverluste würde bedeuten, die Spannung im Netz möglichst hoch zu halten. Um die Spannung im Netz zu erhöhen, müssen die Generatoren in diesem Netzabschnitt mit höheren Klemmenspannungen betrieben werden. Dazu ist es notwendig die Erregerspannung zu erhöhen und mehr Blindleistung einzuspeisen, was wiederum zu höheren Erregerverlusten führen würde. So muss ein Optimum zwischen minimalen Erregerverlusten und minimalen Wirkverlusten im betrachteten Netzabschnitt gefunden werden. Diese Optimierung soll unter Berücksichtigung der erlaubten Spannungsgrenzen an allen Netzknoten und unter Einhaltung der Betriebsgrenzen aller Betriebsmittel durchgeführt werden. Des weiteren wird gefordert, dass der Leistungsfaktor an der Übergabestelle vom betrachteten Netzabschnitt zum übergeordneten Netz innerhalb bestimmter Grenzen gehalten wird.

Zu Beginn wurden an einem einfachen Strahlennetz optimale Lastflüsse berechnet, um einen Überblick über das komplexe Optimierungsproblem zu erhalten. Für jede einzelne Simulation wurde die einzuspeisende Wirkleistung jeder Erzeugungseinheit im gegebenen Netzabschnitt fixiert. Aus den berechneten optimalen Lastflüssen erhält man die eingespeiste Blindleistung jedes Generators, bei der die Verlustleistung minimal gehalten wird. Diese Simulationen wurden für unterschiedliche Spannungen am Übergabepunkt zum übergeordneten Netz und unter Variation der Arbeitspunkte der Erzeugungseinheiten durchgeführt. Aus den erhaltenen Ergebnissen sollen Rückschlüsse auf die optimale Aufteilung der Blindleistung auf die Kraftwerke gezogen werden.

Im nächsten Schritt wird das Strahlennetz zu einem vermaschten Netz erweitert. An diesem Beispielnetz wurden ebenfalls optimale Lastflüsse berechnet, wobei hier gleich wie am einfachen Strahlennetz vorgegangen wird.

Im letzten Schritt soll festgestellt werden, ob die zuvor erarbeiteten Regeln zur optimalen Aufteilung der geforderten Blindleistung auf die Kraftwerke, auch für ein reales, eng vermaschtes Netz anwendbar sind. Dafür werden optimale Lastflüsse mit unterschiedlichen einzuspeisenden Generatorwirkleistungen an einem realen Übertragungsnetz berechnet.

Abschließend sollen die aufgestellten Gesetzmäßigkeiten, die anhand der Simulationen an den beiden Beispielnetzen und dem realen Netz herausgefunden werden konnten, miteinander verglichen werden. Diese Gesetzmäßigkeiten sollen einen Grundstein für eine mögliche Implementierung in eine innovative Kraftwerksregelung darstellen.

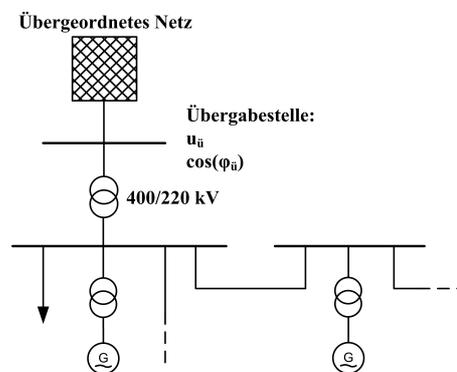


Abbildung 1.1: Über- und untergeordneter Netzabschnitt

2 Analytische Minimierung der Netzverluste

Der Lastfluss über einen elektrischen Leiter verursacht gemäß der Formel 2.1 unerwünschte Wirkverluste. Die transportierte Leistung setzt sich im Allgemeinen aus einem Anteil an Wirk- und einem weiten Anteil an Blindleistung zusammen. Somit ist schon erkennbar, dass sowohl der Wirklastfluss als auch der unerwünschte Blindlastfluss für Verluste bei der Übertragung elektrischer Energie verantwortlich ist (siehe Formel 2.2).

$$P_{v,1ph} = R \cdot I^2 \quad (2.1)$$

2.1 Berechnung der Verlustleistung auf einer Leitung

Die Verlustleistung \underline{S}_v in einem drei phasigen Energieübertragungssystem berechnet sich nach der Formel 2.2. Die Berechnung der Verlustleistung liegt der Abbildung 2.1 zugrunde.

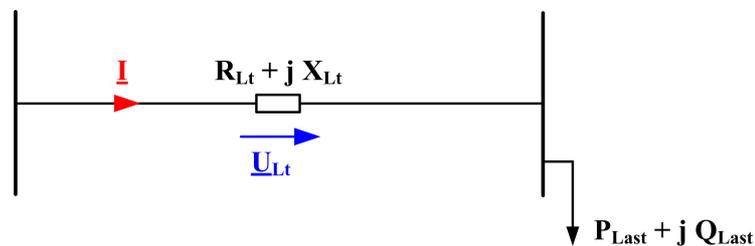


Abbildung 2.1: Zur Berechnung der Verluste an einer Übertragungsleitung

$$\begin{aligned} \underline{S}_v &= 3 \underline{U}_{Lt} \underline{I}^* \\ &= 3 \underline{Z}_{Lt} \underline{I} \underline{I}^* \\ &= 3 (R_{Lt} + j X_{Lt}) \cdot (I_w^2 + I_b^2) \\ &= \underbrace{3 R_{Lt} \cdot (I_w^2 + I_b^2)}_{=P_v} + j \underbrace{3 X_{Lt} \cdot (I_w^2 + I_b^2)}_{=Q_v} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Da das Ziel dieser Arbeit die Minimierung der Wirkverluste ist, wird nur der Realteil P_v der komplexen Scheinverlustleistung \underline{S}_v weiter betrachtet. Für die Berechnungen stehen meist statt Strömen, Wirk- und Blindleistungen, die übertragen werden sollen, zur

Verfügung. Daher werden Wirk- und Blindstrom durch die Leistungen ausgedrückt.

$$P_{Last} = \sqrt{3} U_n I_w \quad \Longrightarrow \quad I_w = \frac{P_{Last}}{\sqrt{3} U_n} \quad (2.3)$$

Äquivalent kann für den Blindstrom I_b geschrieben werden:

$$I_b = \frac{Q_{Last}}{\sqrt{3} U_n} \quad (2.4)$$

Die Wirkverlustleistung P_v kann so durch die transportierte Wirk- und Blindleistung ausgedrückt werden.

$$P_v = \frac{R_{Lt}}{U_n^2} \cdot (P_{Last}^2 + Q_{Last}^2) \quad (2.5)$$

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Spannung ungefähr der Nennspannung entspricht, so ist es möglich P_v näherungsweise wie folgt in per Unit Werten anzuschreiben.

$$p_v = r_{Lt} \cdot (p_{Last}^2 + q_{Last}^2) \quad (2.6)$$

Aus den Formeln 2.5 und 2.6 ist ersichtlich, dass der Blindlastfluss unabhängig vom Wirklastfluss Wirkverluste an den Übertragungswegen verursacht.

2.2 Aufteilung des Blindlastflusses bei minimalen Wirkverlusten

An einem einfachen Strahlennetz soll analytisch gezeigt werden, wie die vom Betreiber des übergeordneten Netzes geforderte Blindleistung q_N auf Kraftwerke aufzuteilen ist, dass sich die Wirkverluste im betrachteten Netzabschnitt auf ein Minimum dezimieren. Anhand des in Abbildung 2.2 dargestellten Netzes wird die verlustoptimale Aufteilung der angeforderten Blindleistung q_N auf die Generatoren 1 und 2 demonstriert.

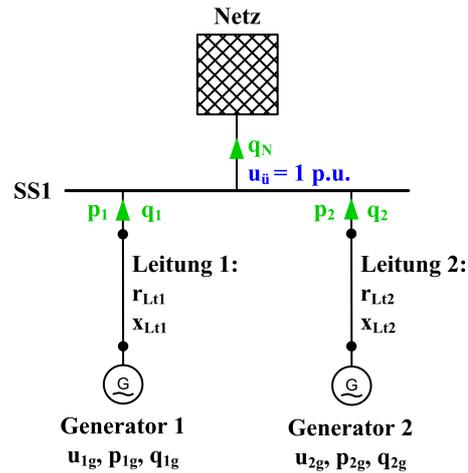


Abbildung 2.2: Beispielnetz für die Berechnung des optimalen Lastflusses

Das Ziel ist es die gesamten Wirkverluste $p_{v,uN}$ im untergeordneten Netz, welche durch die Formel 2.7 beschrieben sind, zu minimieren. Die gesamten Wirkverluste setzen sich aus den Verlusten, die durch den Stromfluss über die Leitung 1 und 2 entstehen, zusammen.

$$\begin{aligned} p_{v,uN} &= p_{v,1} + p_{v,2} \\ &= r_{Lt1} \cdot (p_1^2 + q_1^2) + r_{Lt2} \cdot (p_2^2 + q_2^2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Für diese Optimierungsaufgabe ist noch eine Nebenbedingung zu definieren. Die vom übergeordneten Netz geforderte Blindleistung q_N ist auf die beiden Leitungen aufzuteilen.

$$q_N = q_1 + q_2 \quad (2.8)$$

Die auf q_2 umgeformte Nebenbedingung wird in die Formel 2.7 eingesetzt. Für diese Funktion, die dann nur mehr von der Blindleistung q_1 abhängig ist, soll das Minimum, welches auch das Verlustminimum darstellt, gesucht werden. Dabei wird nach der üblichen Methode der Extremwertfindung vorgegangen. Es wird angenommen, dass die Wirkleistungen p_1 und p_2 , die in das übergeordnete Netz eingespeist werden, vorgegeben sind. Die eingespeisten Wirkleistungen der Erzeugungseinheiten müssen um die jeweiligen Wirkverlustleistungen der jeweiligen Zweige größer ausfallen.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_{v,uN}}{\partial q_1} &= \frac{\partial}{\partial q_1} \left[r_{Lt1} \cdot (p_1^2 + q_1^2) + r_{Lt2} \cdot (p_2^2 + q_2^2) \right] \stackrel{!}{=} 0 \\
 &= \frac{d}{dq_1} \left[r_{Lt1} \cdot (p_1^2 + q_1^2) + r_{Lt2} \cdot (p_2^2 + (q_N - q_1)^2) \right] \\
 &= \frac{d}{dq_1} \left[r_{Lt1} p_1^2 + r_{Lt1} q_1^2 + r_{Lt2} p_2^2 + r_{Lt2} q_n^2 - 2 r_{Lt2} q_1 q_n + r_{Lt2} q_1^2 \right] \\
 &= 2 r_{Lt1} q_1 - 2 r_{Lt2} q_n + 2 r_{Lt2} q_1
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Daraus erhält man die optimale Blindleistung q_1 der Leitung 1, welche ins übergeordnete Netz eingespeist oder aus dem Netz bezogen wird.

$$q_1 = q_N \cdot \frac{r_{Lt2}}{r_{Lt1} + r_{Lt2}} \tag{2.10}$$

Mithilfe der Nebenbedingung 2.8 kann die Blindleistung q_2 berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 q_2 &= q_N - q_1 \\
 &= q_N - q_N \cdot \frac{r_{Lt2}}{r_{Lt1} + r_{Lt2}} \\
 &= q_N \cdot \left(1 - \frac{r_{Lt2}}{r_{Lt1} + r_{Lt2}} \right) \\
 &= q_N \cdot \frac{r_{Lt1}}{r_{Lt1} + r_{Lt2}}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Wird die geforderte Blindleistung q_N entsprechend den Formeln 2.10 und 2.11 auf die beiden Leitungen aufgeteilt, fällt die gesamte Wirkverlustleistung im betrachteten Netzabschnitt am minimalsten aus.

Die zu liefernde Blindleistung eines Generators ergibt sich aus der Blindleistung des jeweiligen Zweiges zuzüglich des Blindleistungsbedarfes der entsprechenden Übertragungsleitung. Die einzuspeisende Blindleistung des jeweiligen Generators ergibt sich nach den Formeln 2.12 und 2.13.

$$\begin{aligned} q_{1g} &= q_1 + x_{Lt1} \cdot (p_1^2 + q_1^2) \\ &= \frac{q_N r_{Lt2}}{r_{Lt1} + r_{Lt2}} + x_{Lt1} \cdot \left(p_1^2 + \frac{q_N^2 r_{Lt2}^2}{(r_{Lt1} + r_{Lt2})^2} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Äquivalent kann die Formel für die Blindleistung q_{2g} des Generators 2 angeschrieben werden, bei welcher die geforderte Blindleistung verlustminimal auf die beiden Generatoren aufgeteilt ist.

$$\begin{aligned} q_{2g} &= q_2 + x_{Lt2} \cdot (p_2^2 + q_2^2) \\ &= \frac{q_N r_{Lt1}}{r_{Lt1} + r_{Lt2}} + x_{Lt2} \cdot \left(p_2^2 + \frac{q_N^2 r_{Lt1}^2}{(r_{Lt1} + r_{Lt2})^2} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Aus dem Spannungsabfall über die Leitung sollen die Klemmenspannungen am Generator 1 und Generator 2 berechnet werden. Der Spannungsabfall an einer Leitung setzt sich aus einem Spannungsabfall, der sich entsprechend des Wirkleistungstransportes und einem Anteil, der sich aus dem Blindlastfluss ergibt, zusammen.

$$u_{1g} = 1 + x_{Lt1} \cdot q_1 + r_{Lt1} \cdot p_1 \quad (2.14)$$

$$u_{2g} = 1 + x_{Lt2} \cdot q_2 + r_{Lt2} \cdot p_2$$

2.3 Erkenntnisse

Aus den Formeln 2.10 und 2.11 ist zu erkennen, dass die geforderte Blindleistung q_N nach der Stromteilerregel entsprechend den ohmschen Widerständen der Abzweige auf die Leitungen aufzuteilen ist, damit die gesamte Wirkverlustleistung im Netzabschnitt minimal wird. Somit übernimmt der Zweig mit dem kleinsten ohmschen Widerstand den größeren Anteil der geforderten Blindleistung. Die vom jeweiligen Generator einzuspeisende Blindleistung setzt sich aus der ins Netz zu liefernden Blindleistung und dem Blindleistungsbedarf des jeweiligen Zweiges zusammen. Die von den Generatoren zu liefernden Blindleistungen werden durch die Formeln 2.12 und 2.13 beschrieben.

Diese Art der Aufteilung ist nur anzuwenden, so lange keiner der Generatoren an seine Spannungs- oder Blindleistungsgrenzen stößt. Kommt einer der Generatoren an seine zulässigen Betriebsgrenzen, kann die Blindleistung nicht mehr verlustoptimal auf die Generatoren aufgeteilt werden. Die anderen Erzeugungseinheiten müssen die restliche Blindleistung, die der Generator, welcher an seine Betriebsgrenze gekommen ist, nicht mehr übernehmen kann, aufbringen. Daraus ergibt sich ein neues Optimierungsproblem, worauf nicht näher eingegangen wird.

Die Generatorklemmenspannungen ergeben sich gemäß den Formeln 2.14. Daraus lässt sich erkennen, dass sich im Allgemeinen am Generator, am Ende des Zweiges mit der größten Impedanz, die größte Klemmenspannung einstellt.

3 Verlustoptimierung unter Berücksichtigung der Erregerverluste

Unter Berücksichtigung sämtlicher Betriebsgrenzen ist das Optimierungsproblem bereits für einfache, kleine Netzabschnitte nicht mehr analytisch lösbar. Daher sollen mithilfe von MATLAB möglichst viele Betriebszustände in bestimmten Netzabschnitten simuliert und optimiert werden, um aussagekräftige Rückschlüsse auf die optimale Blindleistungsaufteilung auf Kraftwerke in diesem Teil des Netzes ziehen zu können. Bei diesen Simulationen werden die Arbeitspunkte der Generatoren variiert. Die Wirkleistung soll jedem Generator für jedes simulierte Szenario fix vorgegeben werden. Aus den berechneten optimalen Lastflüssen wird die eingespeiste Blindleistung jedes Generators in Abhängigkeit seiner gelieferten Wirkleistung analysiert. Das Verhalten der Generatoren soll auch bei unterschiedlich großen Spannungen am Übergabepunkt zum übergeordneten Netz betrachtet werden. Ist die Spannung am Übergabeknoten kleiner 1 p.u., so soll Blindleistung in das übergeordnete Netz eingespeist werden. Übersteigt die Spannung am Übergabepunkt die Nennspannung, muss Blindleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen werden. Am Übergabepunkt wird ein minimaler Wirkleistungsfaktor von $\cos_{min}(\varphi) = 0,9$ gefordert, damit der Blindleistungsaustausch zum Übertragungsnetz nicht beliebig groß werden kann.

Die optimierenden Lastflüsse für die verschiedensten Maschinenarbeitspunkte wurden mit MATPOWER 4.1, einem freien Package für MATLAB, berechnet. Mit diesem Softwarepaket ist es leicht möglich zahlreichen Lastflussberechnungen unter Variation vieler Parametern in moderater Zeit automatisiert durchzuführen.

3.1 Modellierung der Betriebsmittel in MATPOWER

In MATPOWER werden die Parameter der Betriebsmittel, wie zum Beispiel Leitungen, Transformatoren, Erzeugungseinheiten und andere, in Matrizen hinterlegt. Die Impedanzwerte der Zweigelemente sind in p.u.-Werten anzugeben und sind daher auf die Bezugsimpedanz zu beziehen [2].

Leitungen und Kabel

In MATPOWER werden Leitungen gemäß dem π -Ersatzschaltbild (Abbildung 3.1) eingebunden.

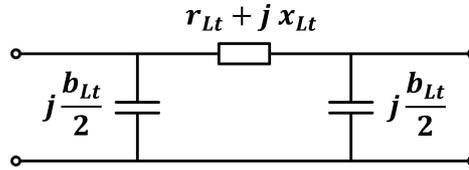


Abbildung 3.1: π -Ersatzschaltbild einer Leitung

Der Ohmsche Widerstand bzw. die Reaktanz einer Leitung ist durch deren Impedanzbelag ($r' + j x'$) und der Leitungslänge l bestimmt. Die physikalischen Werte müssen auf die Bezugsimpedanz Z_{Bez} bezogen werden. Für die Bezugsleistung S_{Bez} werden die in der Energietechnik üblichen 100 MVA eingesetzt.

$$\begin{aligned}
 r_{Lt} &= \frac{r' \cdot l}{Z_{Bez}} = \frac{r' \cdot l \cdot S_{Bez}}{U_n^2} \\
 x_{Lt} &= \frac{x'_l \cdot l}{Z_{Bez}} = \frac{x'_l \cdot l \cdot S_{Bez}}{U_n^2} \\
 b_{Lt} &= \frac{Z_{Bez}}{x'_c \cdot l} = \frac{\omega \cdot c'}{l} \cdot \frac{U_n^2}{S_{Bez}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Transformatoren

Transformatoren werden dem Lastflussprogramm auf dieselbe Weise, wie die Leitungen, angegeben. Wieder sind die Impedanzen in p.u.-Werte überzuführen.

$$\begin{aligned}
 r_{Tr} &= \frac{R_{Tr}}{Z_{Bez}} = u_r \cdot \frac{U_n^2}{S_{n,Tr}} \cdot \frac{S_{Bez}}{U_n^2} = u_r \cdot \frac{S_{Bez}}{S_{n,Tr}} \\
 x_{Tr} &= \frac{X_{Tr}}{Z_{Bez}} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n,Tr}} \cdot \frac{S_{Bez}}{U_n^2} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \cdot \frac{S_{Bez}}{S_{n,Tr}}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Generatoren

Der resistive Widerstand R_{Gen} der Generatorständerwicklung wird für alle Generatoren in der Größe von $r_{g,n} = 0,25 \%$, bezogen auf die Generatornennleistung, angenommen. Für die Lastflussberechnung ist dieser Wert auf die generell eingesetzte Bezugsleistung zu beziehen.

$$r_g = \frac{R_{Gen}}{Z_{Bez}} = r_{g,n} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n,g}} \cdot \frac{S_{Bez}}{U_n^2} = r_{g,n} \cdot \frac{S_{Bez}}{S_{n,g}} \quad (3.3)$$

3.2 Formulierung des Optimierungszieles und der Kostenfunktionen

Minimierung der Netzverluste

Das Ziel dieser Optimierung ist die optimale Zuordnung der geforderten Blindleistung zu den einzelnen Kraftwerken in einem bestimmten Netzabschnitt. Diese zusätzlich zu liefernde Blindleistung ist so auf die Kraftwerke zu verteilen, dass die gesamte, im betrachteten Netzabschnitt, anfallende Wirkverlustleistung minimal ausfällt. Dazu müssen alle Wirkverluste sämtlicher Betriebsmittel in der Lastflussberechnung Berücksichtigung finden.

Wirkverluste der Freileitungen und Kabel

Bei der Übertragung elektrischer Energie kommt es unvermeidlich an allen Betriebsmitteln zu Wirkverlusten. Elektrische Energie wird vorwiegend über Freileitungen oder Hochspannungskabel übertragen. Die Ohmschen Widerstände der Übertragungsleitungen sind ohnehin in der Lastflussberechnung mit berücksichtigt und stehen für die Verlustbetrachtung bei der Optimierung ohne weiteres Zutun zur Verfügung.

Verlustleistung der Transformatoren

Die Transformatoren werden in MATPOWER nach demselben Modell, wie die Leitungen, nachgebildet. Wobei die Leerlaufverluste der Transformatoren gesondert berücksichtigt werden. Dazu wird in MATPOWER ein Parallelwiderstand eingefügt, welcher die vorgegebene Verlustleistung bei seiner Nennspannung umsetzt. Die Leerlaufverlustleistung sind in MW bei $u = 1$ p.u. dem Lastflussrechenprogramm vorzugeben.

Die Leerlaufverlustleistung der Transformatoren wird generell bei allen Betrachtungen in der Größe von $0,2 \%$ von dessen Nennscheinleistung angenommen.

Alle Transformatoren werden als unregelt behandelt. Es wird stets mit der Nennübersetzung gerechnet.

Wirkverluste der Generatoren

Die elektrischen Verluste der Generatoren werden bei dem eingesetzten Lastflussrechenprogramm nicht mit einbezogen. Es muss ein Weg gefunden werden, um die Wirkverluste der Erzeugungseinheiten in der Lastflussberechnung berücksichtigen zu können.

Durch Einfügen eines zum Generator in Serie geschalteten Ohmschen Widerstandes R_{Gen} , können die Wirkverlustleistung der Ständerwicklung in die Berechnung mit eingebracht werden.

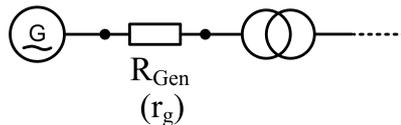


Abbildung 3.2: Darstellung zur Berücksichtigung der Wirkverluste der Generatorwicklung durch R_{Gen}

Da die Wirkleistungs-Betriebspunkte der Generatoren im Netz während der Optimierung konstant gehalten werden, erfolgt die Deckung der Verluste über das externe Netz. Die Verlustoptimierung erfolgt daher durch Minimierung der Wirkleistungserzeugungskosten des externen Netzes.

Eine optimierende Lastflussberechnung wird mit MATPOWER durch die Vorgabe einer zu minimierenden Kostenfunktion, welche für die Erzeugungskosten von Wirk- oder/und Blindleistung stehen, realisiert. Die Kostenfunktion für die eingespeiste Wirkleistung ist in 3.4 ersichtlich [2].

$$ap_0 + ap_1 \cdot P_g + ap_2 \cdot P_g^2 + \dots + ap_n \cdot P_g^n \quad (3.4)$$

Durch Zuordnen von Kosten für die gelieferte Wirkleistung durch den Slackgenerator, kann eine Minimierung der Wirkverluste im betrachteten Netzabschnitt erzielt werden. Den Generatoren ist eine feste Wirkleistung zugeordnet, so muss der Slack für die entstehende Verlustleistung im Netzabschnitt aufkommen. Werden die Kosten für die Verlustleistung minimiert, werden auch die Wirkverluste minimal, was zu höheren Spannungen im betrachteten Netzabschnitt führt. Ein höheres Spannungsniveau im Netz bringt geringere Verluste mit sich.

Minimierung der Erregerverluste der Generatoren

Um in einem Netzwerk hohen Wirkverlusten entgegen zu wirken, ist ein möglichst hohes Spannungsniveau notwendig. Ein höheres Spannungsniveau kann durch höhere

Spannung und die einhergehende Einspeisung von Blindleistung der Erzeugungseinheiten erreicht werden, wozu eine höhere Erregerleistung notwendig ist. Der, für die Bereitstellung der zusätzlich geforderten Blindleistung notwendige größere Erregerstrom, verursacht wiederum zusätzliche Wirkverluste in der Erregerwicklung der Synchronmaschine.

Die Wirkverluste der Erregereinrichtung der Generatoren werden vom verwendeten Lastflussrechenprogramm nicht berücksichtigt. Es musste ein indirekter Weg gefunden werden, damit der Erregeraufwand in die Optimierungsaufgabe einbezogen werden kann.

In MATPOWER besteht die Möglichkeit eine Kostenfunktion, die die Erzeugungskosten für Wirk- oder Blindleistung repräsentiert, zu minimieren. Dafür konnte eine Kostenfunktion K_Q aufgestellt werden, die proportional zur Erregerleistung ist, die für die Bereitstellung von Blindleistung aufgewendet werden muss. Durch die Minimierung der anfallenden Kosten für die Bereitstellung von Blindleistung, werden auch die Erregerverluste minimiert. Diese Optimierung tendiert zu geringerer Erregung und zu einer kleineren gelieferten Blindleistung. In weiterer Folge führt dies zu einer niedrigeren Generatorklemmenspannung.

Ausgehend vom Zeigerdiagramm der Synchronmaschine werden die nachstehenden Formeln hergeleitet. Der Ständerwicklungswiderstand der Maschine wird hier nicht berücksichtigt, da die Wirkverluste der Ständerwicklung bereits durch den Widerstand R_{Gen} repräsentiert werden.

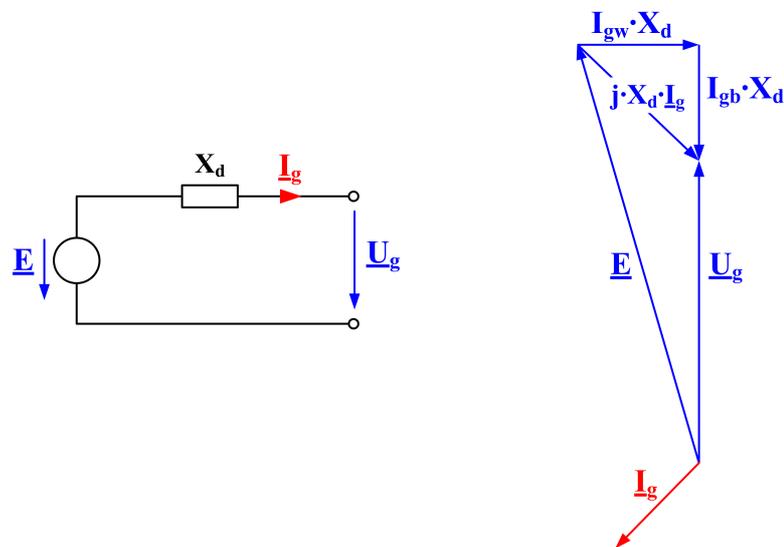


Abbildung 3.3: Zeigerdiagramm der Synchronmaschine im übererregten, generatorischen Betriebszustand [3]

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Generatorklemmenspannung ungefähr der Nennspannung entspricht. Daher können folgenden Vereinfachungen festgelegt werden:

$$u_g = 1 \text{ p.u.}, \quad i_g = s_g, \quad i_{gw} = p_g, \quad i_{gb} = q_g \quad (3.5)$$

Als Bezugsgrößen werden die Leerlauferregerspannung U_{f0} , der Leerlauferregere Strom I_{f0} und die Leerlauferregerleistung P_{f0} , die aufgewendet werden muss, um bei unbelastetem Generator, die Generatornennspannung zu erzeugen, herangezogen. Für eine Generatorklemmenspannung $u_g = 1 \text{ p.u.}$ wird ohne den Generator zu belasten ein Erregerstrom $i_f = 1 \text{ p.u.}$ bei der Erregerspannung $u_f = 1 \text{ p.u.}$ benötigt.

Für den stationären Zustand gilt, ohne dass Sättigungserscheinungen berücksichtigt werden:

$$i_f = u_f = e = \sqrt{(u_g + i_{gb} \cdot x_d)^2 + (i_{gw} \cdot x_d)^2} \quad (3.6)$$

Daraus lässt sich die Erregerleistung p_f berechnen.

$$\begin{aligned} p_f &= u_f \cdot i_f = u_f^2 = (u_g + i_{gb} \cdot x_d)^2 + (i_{gw} \cdot x_d)^2 \\ &= \underbrace{(1 + q_g \cdot x_d)^2}_{p_{fq} = f(q_g)} + \underbrace{(p_g \cdot x_d)^2}_{p_{fp} = \text{konst.}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Der Anteil p_{fq} steht für die Erregerleistung, die aufgewendet werden muss, um Blindleistung bereit stellen zu können. Für die Optimierung kann auf den konstanten Term verzichtet werden.

Die Erregerleistung p_{fp} , die für die Wirkleistungsbereitstellung benötigt wird, ist für jede Lastflussberechnung fix vorgegeben und soll nicht optimiert werden. Sie wird daher für die weiteren Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt.

In physikalischen Größen ausgedrückt, ergibt sich die Erregerleistung P_{fQ} wie folgt:

$$\begin{aligned} P_{fQ} &= P_{f0} \cdot p_{fq} = P_{f0} \cdot (q_g \cdot x_d)^2 \\ &= P_{f0} \cdot \left(\frac{Q_g}{S_{n,g}} \cdot x_d \right)^2 \\ &= \frac{P_{f0} \cdot 2 \cdot x_d}{S_{n,g}} \cdot Q_g + \frac{P_{f0} \cdot x_d^2}{S_{n,g}^2} \cdot Q_g^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Für die Optimierung wird eine Kostenfunktion für die eingespeiste Blindleistung eines Generators benötigt. Diese Funktion muss dem Lastflussrechenprogramm in folgender Form vorgegeben werden [2]:

$$aq_0 + aq_1 \cdot Q_g + aq_2 \cdot Q_g^2 + \dots + aq_n \cdot Q_g^n \quad (3.9)$$

Durch die Multiplikation der aufgewendeten Erregerleistung für die Blindleistungseinspeisung mit den Erzeugungskosten ap , ergibt sich die zu minimierende Kostenfunktion K_Q .

$$K_Q = P_{fQ} \cdot ap = \underbrace{\frac{P_{f0} \cdot ap \cdot 2 \cdot x_d}{S_{n,g}}}_{aq_1} \cdot Q_g + \underbrace{\frac{P_{f0} \cdot ap \cdot x_d^2}{S_{n,g}^2}}_{aq_2} \cdot Q_g^2 \quad (3.10)$$

Die Leerläufererregerleistung P_{f0} der Generatoren wird für alle Simulationen in der Größe von 0,15 %, bezogen auf die Generatornennleistung, angenommen.

3.3 Randbedingungen für die Optimierung

Spannungsgrenzen an den Netzknoten

Für die Lastflussberechnungen wurde das erlaubte Spannungsband für die Netzknoten auf ± 10 % bezogen auf die Nennspannung eingegrenzt. Nur die Spannung am eingeführten Hilfsknoten werden in Abhängigkeit der Erzeugungsverhältnisse im betrachteten Netzabschnitt, wie im nächsten Punkt beschrieben, gesondert vorgegeben.

Einschränkung des Blindlastflusses ins übergeordnete Netz

Je nach Spannungsverhältnissen im übergeordneten Netz, muss zur Spannungsstabilisierung Blindleistung ins Netz eingespeist oder aus dem Netz bezogen werden. Bei zu hoher Spannung ($u \geq 1$ p.u.) im übergeordneten Netz wird dem Optimierungsprogramm nur zugelassen, dass keine Blindleistung bzw. dass Blindleistung bis zum Erreichen des minimalen zugelassenen Wirkleistungsfaktor am Übergabepunkt aus dem Netz bezogen werden kann. Ein Einspeisen von Blindleistung wird bei diesem Zustand verhindert.

Ist die Spannung im vorgelagerten Netz unter 1 p.u. abgesunken, wird der Optimierungsberechnung das Einspeisen von Blindleistung, maximal bis zum Erreichen des kleinsten erlaubten Wirkleistungsfaktors, zugelassen. Ein möglicher Zustand ist auch, dass wegen der Verlustverhältnisse keine Blindleistung eingespeist wird. Bei zu geringer Spannung im übergeordneten Netz wird ein Bezug von Blindleistung untersagt.

Bei einer Spannung von 1 p.u. im überlagerten Netz ist der optimierenden Lastflussberechnung überlassen, ob Blindleistung ins Netz eingespeist oder Blindleistung bis zum Erreichen des maximal erlaubten Blindlastflusses aus dem Netz bezogen wird.

Für die Simulation wird zwischen dem Transformator und dem übergeordneten Netz eine kleine Reaktanz eingefügt, um den Blindlastfluss ins überlagerte Netz kontrollieren zu können. Da die eingespeiste Wirkleistung der Generatoren für jede Berechnung bekannt ist, kann über den kleinsten zugelassenen Wirkleistungsfaktor der maximal erlaubte Blindlastfluss ins übergeordnete Netz berechnet werden (siehe Formel 3.11). Der maximale Blindleistungsbezug bzw. die Blindleistungslieferung wird indirekt über den Spannungsabfall über die eingefügte Reaktanz vorgegeben.

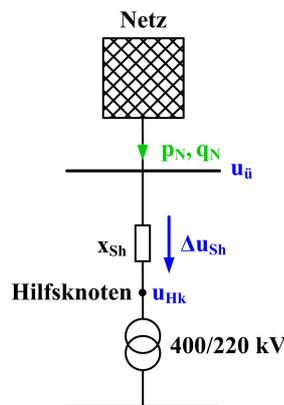


Abbildung 3.4: Zusätzliche Reaktanz zur Beeinflussung des Blindlastflusses

Je nach eingespeister Wirkleistung p_{Gen} der Generatoren, wird der maximal zulässige Spannungsabfall Δu_{sh} über die Reaktanz x_{sh} berechnet, damit der minimal zugelassene Wirkleistungsfaktor $\cos_{min}(\varphi) = 0,9$ nicht unterschritten werden kann. Der maximal zulässige Blindlastfluss $q_{N,max}$ in oder aus dem übergeordneten Netz berechnet sich aus dem Wirklastfluss p_N ins oder aus dem übergeordneten Netz nach der Formel 3.11.

$$\begin{aligned} q_{N,max} &= |p_N| \cdot \tan(\varphi_{min}) \\ &= |p_{Gen} - p_{Last}| \cdot \tan(\arccos(0,9)) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Aus dem maximalen Blindlastfluss lässt sich der höchste erlaubte Spannungsabfall Δu_{sh} berechnen.

$$\Delta u_{sh} = q_{N,max} \cdot x_{sh} \quad (3.12)$$

Daraus ergibt sich das erlaubte Spannungsband für den eingeführten Hilfsknoten bei vorgegebenem Spannungsniveau $u_{\ddot{u}}$ im überlagerten Netz (Slackspannung).

$$\begin{array}{lll}
 u_{\ddot{u}} & \leq & u_{Hk} \leq u_{\ddot{u}} + \Delta u_{Sh} & \text{für } u_{\ddot{u}} < 1 \text{ p.u.} \\
 u_{\ddot{u}} - \Delta u_{Sh} & \leq & u_{Hk} \leq u_{\ddot{u}} + \Delta u_{Sh} & \text{für } u_{\ddot{u}} = 1 \text{ p.u.} \\
 u_{\ddot{u}} - \Delta u_{Sh} & \leq & u_{Hk} \leq u_{\ddot{u}} & \text{für } u_{\ddot{u}} > 1 \text{ p.u.}
 \end{array}$$

Damit erfolgt die Begrenzung des Blindleistungsaustausches durch die Einführung von Spannungsgrenzen am Hilfsknoten.

Einbeziehen der Betriebsgrenzen der Generatoren

Die maximal mögliche Grenze Blindleistung zu liefern oder zu beziehen, ist bei der Synchronmaschine vom aktuellen Betriebszustand abhängig. Die Betriebsgrenzen sind durch die Nennleistung der Maschine begrenzt. Zusätzliche Grenzen stellen der maximale bzw. minimale Erregerstromes dar. In der Abbildung 3.5 ist das Leistungsdiagramm der Synchronmaschine mit den Betriebsgrenzen ersichtlich. Gemäß dieser Abbildung werden die Blindleistungsgrenzen für die Lastflussberechnungen bei einer gegebenen zu liefernden Wirkleistung ermittelt. Dabei wurde die Grenzkurve für $u = 1$ p.u. herangezogen.

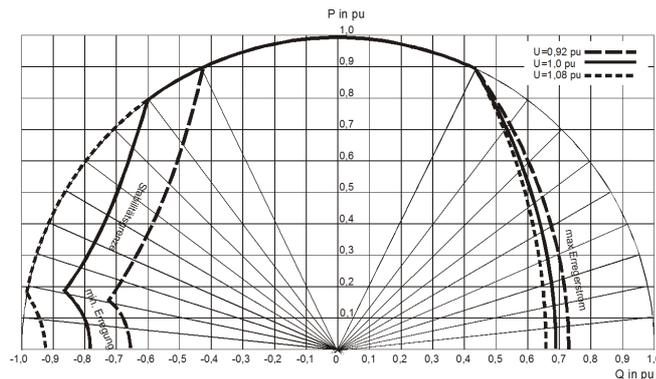


Abbildung 3.5: Leistungsdiagramm einer Synchronmaschine [1]

Für die Ermittlung der Grenzen der Blindleistungsbereitstellung bei einer bestimmten eingespeisten Wirkleistung, wurde eine MATLAB-Funktion erstellt, die die Betriebsgrenzen in einem Polygonzug nachstellt. Daraus werden die maximale Blindleistung für den unter- und den übererregten Betriebszustand ermittelt. Die erhaltenen Blindleistungsgrenzen werden dem Lastflussrechenprogramm übergeben, um das Verhalten eines Generators möglichst realitätsnah nachempfinden zu können.

4 Ergebnisse aus den Simulationen

Begonnen wird mit den optimierenden Lastflussberechnungen an einem einfachen Strahlennetz, wie es in der Abbildung 4.1 dargestellt ist. Bei der ersten Versuchsreihe speisen vier Generatoren mit gleich großer Nennleistung in den betrachteten, untergeordneten Netzabschnitt ein. Das Verhalten der Erzeugungseinheiten soll einmal dargestellt werden, wenn die Wirkverluste des Netzabschnittes und die Erregerverluste in den optimierenden Lastflussberechnungen berücksichtigt werden und ein weiteres Mal, wenn der Lastfluss nur hinsichtlich der Wirkverluste im Netzabschnitt optimiert wird.

Um einem realen Netz etwas näher zu kommen, werden später optimierende Lastflüsse an einem kleinen, vermaschten Netz berechnet. Hierbei soll unter anderem der Einfluss der Generatornennleistung auf die Aufteilung der Blindleistung auf die Kraftwerke untersucht werden.

Zum Abschluss wird geprüft, ob sich die zuvor in den vereinfachten Netzen empirisch ermittelten Gesetzmäßigkeiten auch in einem realen, eng vermaschten Netz wieder finden lassen.

Die berechneten optimalen Lastflüsse sollen dazu dienen, das Verhalten der Erzeugungseinheiten in Abhängigkeit der eingespeisten Wirkleistung der einzelnen Generatoren und der Spannung am Übergabepunkt zum übergeordneten Netz zu untersuchen. Bei allen Simulationen wird sichergestellt, dass sämtliche Betriebsgrenzen, wie Knotenspannungen, Leistungsgrenzen der Generatoren, nicht überschritten werden. Prinzipiell wird bei allen Simulationen, wie im Kapitel 3 beschrieben ist, vorgegangen.

Für die Beurteilung des Verhaltens der Maschinen wird die eingespeiste Blindleistung in Abhängigkeit der vorgegebenen Wirkleistung der Generatoren und der Spannung am Netzknoten 1 in Diagrammen dargestellt. Aus den Simulationen bei unterschiedlichen Arbeitspunkten der Maschinen und unterschiedlichen Spannungsverhältnissen im Netz sollen Verhaltensmuster der Erzeugungseinheiten erkannt werden, woraus allgemein gültige Regeln abgeleitet werden sollen. Diese Regeln dienen dazu, eine bestimmte Blindleistung, die zur Spannungsstützung im übergeordneten Netz dienen soll, auf Kraftwerke im Netzabschnitt aufzuteilen, dass einerseits die Wirkverluste im Netzabschnitt möglichst klein ausfallen und andererseits soll die zusätzlich benötigte Erregerleistung (Erregerverluste) für die Generatoren möglichst gering gehalten werden.

4.1 Strahlennetz mit Generatoren der selben Nennleistung

Das, in der Abbildung 4.1 dargestellte Beispielnetz, wurde in MATPOWER für die Berechnungen nachgebildet. Vier Generatoren mit gleich großer Nennscheinleistung speisen über unterschiedlich lange Leitungen in den Netzknoten 3 (Sammelschiene 2) ein. Jeder der vier Generatoren ist über einen Blocktransformator mit der selben Nennscheinleistung, wie der jeweilige Generator, mit der entsprechenden Leitung verbunden. Für jede Lastflussberechnung wird jedem Generator eine Wirkleistung fix vorgegeben. Die Wirkleistung jedes Generators wird von 1,2 MW in 1,2 MW Schritten bis 12 MW variiert. Simuliert werden alle möglichen Kombinationen an einzuspeisenden Wirkleistungen der vier Generatoren. An die Sammelschiene 2 ist eine Last mit $P = 5$ MW und $Q = 10$ MVAR angeschlossen. Dieser untergeordnete Netzabschnitt ist über einen Transformator mit dem übergeordneten Netz (Übertragungsnetz) verbunden. Um den Blindlastfluss zum übergeordneten Netz kontrollieren zu können, wurde ein zusätzlicher Knoten (Knoten 2 - Hilfsknoten) und eine kleine Reaktanz X_{Sh} eingefügt. Durch die Vorgabe eines Spannungsabfalles an dieser Reaktanz, wird der Blindlastfluss entsprechend beeinflusst.

Für das betrachtete Netzwerk wird das Verhalten der Erzeugungseinheiten bei Berücksichtigung der Erregerverluste mit dem Verhalten, ohne die Erregerverluste mit in die optimierenden Lastflussberechnungen einzubeziehen, verglichen. Dabei werden die Generatorspannungen, die Blindleistungen und der Blindlastfluss am Übergabeknoten mit und ohne Einbezug der Erregerverluste gegenübergestellt.

Je nach Spannungsniveau im übergeordneten Netz wird die gelieferte Blindleistung der Generatoren bzw. der Blindlastfluss am Übergabeknoten betrachtet. Bei zu geringer Spannung im übergelagerten Netz wird als Beitrag zur Spannungsstützung der Leistungsfaktor an der Übergabestelle zwischen 1 und 0,9 so eingestellt, dass sich eine Blindleistungslieferung in das übergeordnete Netz ergibt. Ist die Spannung hingegen zu hoch, soll Blindleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen werden.

Mit den Simulationen soll eine verlustoptimale Aufteilung der Blindleistung auf die Generatoren im betrachteten Netzabschnitt gefunden werden, bei der auch der Forderung nach der Spannungsstützung nachgekommen wird.

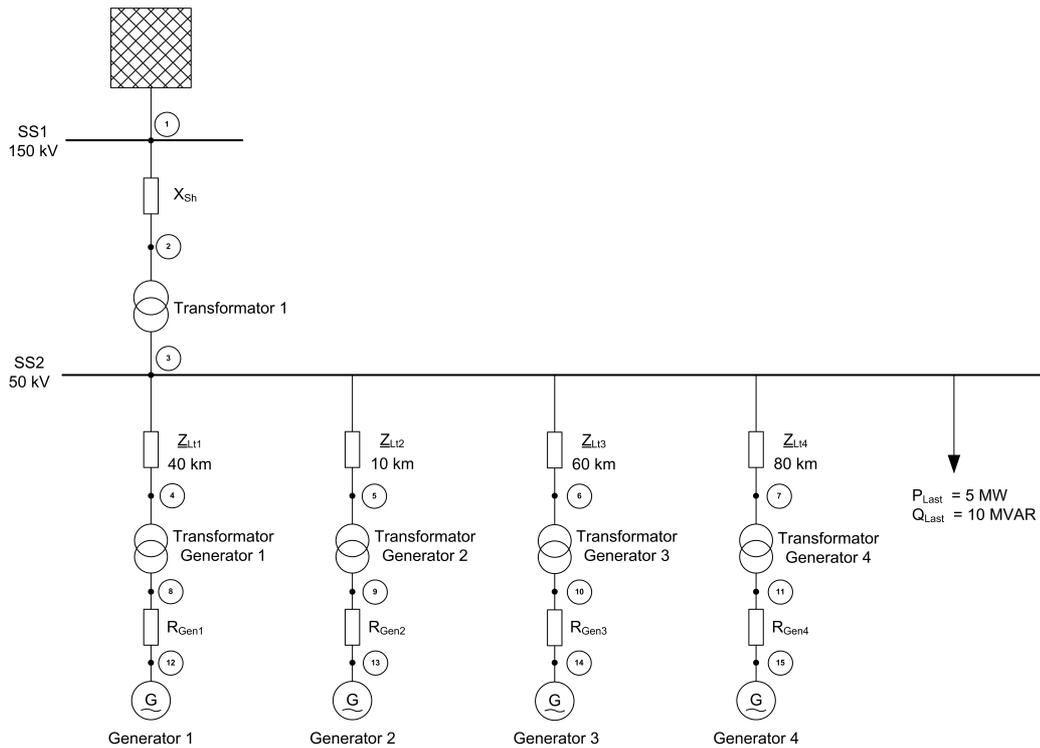


Abbildung 4.1: Betrachteter Netzabschnitt für die Lastflussberechnungen

Kenndaten der Betriebsmittel

Transformator 1: $S_{n,Tr1} = 200 \text{ MVA}$
 $u_{k,Tr1} = 10 \%$
 $u_{r,Tr1} = 4 \%$

Leitungsparameter: $r' = 0,1 \ \Omega/\text{km}$
 $x' = 0,4 \ \Omega/\text{km}$
 $c' = 0,01 \ \mu\text{F}/\text{km}$

Blocktransformatoren

Generator 1-4: $S_n = 15 \text{ MVA}$
 $u_k = 8 \%$
 $u_r = 1 \%$

Generator 1-4: $S_n = 15 \text{ MVA}$
 $U_n = 15 \text{ kV}$
 $x_d = 1,8 \text{ p.u.}$

Reaktanz: $x_{Sh} = 0,023 \text{ p.u.}$

Zweigwiderstände

Für die Darstellung der eingespeisten Blindleistungen in Abhängigkeit des Widerstandes bzw. des Leitwertes des jeweiligen Zweiges, über den der jeweilige Generator an die Sammelschiene 2 angebunden ist, werden die vier Zweigwiderstände R_Z berechnet.

$$R_{z,i} = R_{Gen,i} + R_{Tr,i} + R_{Lt,i} \quad (4.1)$$

	Generator			
	1	2	3	4
R_z	6,09 Ω	3,09 Ω	8,09 Ω	10,09 Ω
G_z	0,16 S	0,32 S	0,32 S	0,099 S

Tabelle 4.1: Widerstände der Zweige vom jeweiligen Generator bis zur Sammelschiene 2

Alle Widerstände sind auf die 50 kV-Ebene bezogen.

4.1.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{\ddot{u}} < 1$ p.u.

Um den Einfluss der Verluste, die sich für die Blindleistungsbereitstellung bei den Generatoren ergeben, festzustellen, wird das Verhalten der Erzeugungseinheiten einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Erregerverluste dargestellt.

Die nachstehenden Diagramme beziehen sich auf eine Spannung von $u_{\ddot{u}} = 0.98$ p.u. im übergeordneten Netz.

Generatorklemmenspannungen

In den Diagrammen sind die Klemmenspannungen u_g der einzelnen Generatoren in Abhängigkeit der eingespeisten Wirkleistung P_g abgebildet.

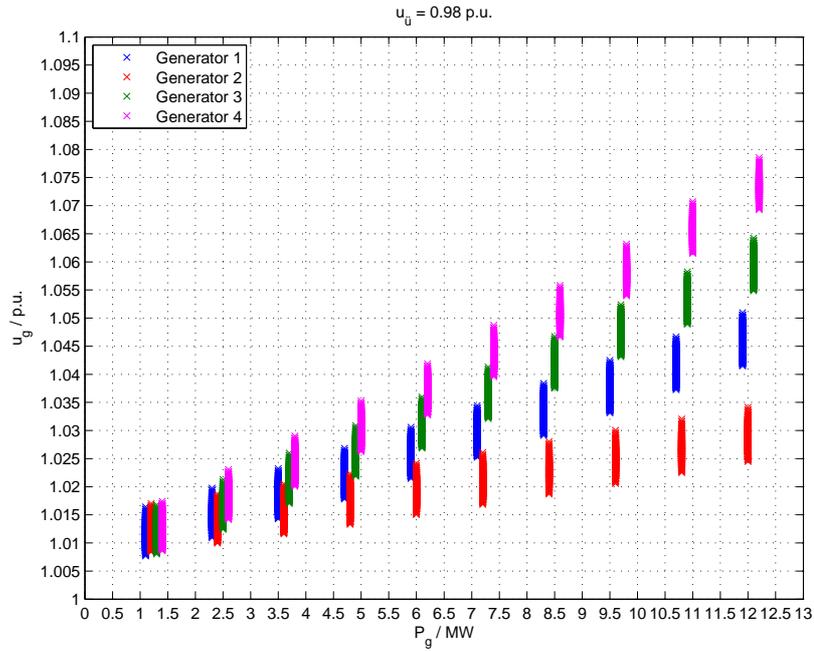


Abbildung 4.2: Generatorklemmenspannungen bei Berücksichtigung der Erregerverluste ¹

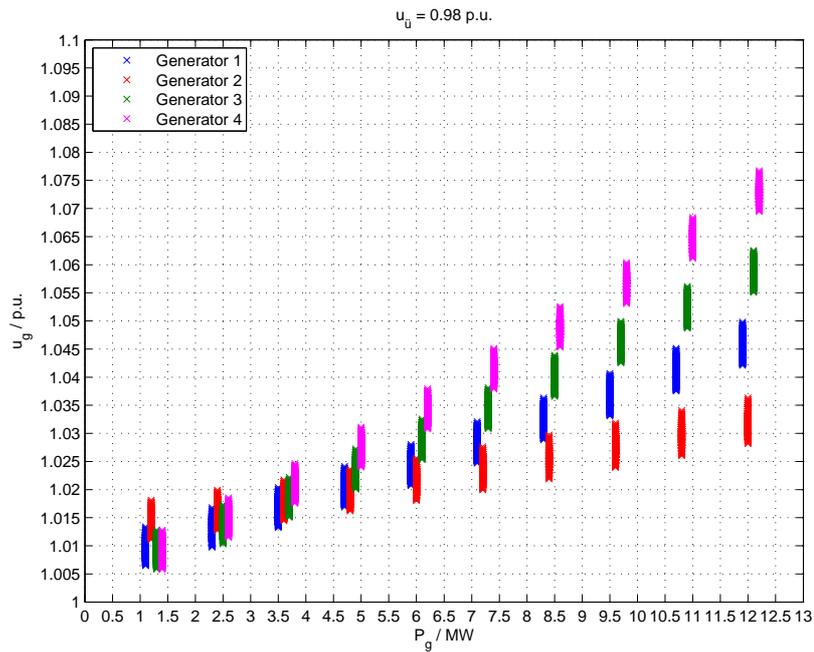


Abbildung 4.3: Generatorklemmenspannungen ohne Berücksichtigung der Erregerverluste ¹

¹ Um den Spannungsbereich jedes Generators erkennen zu können, wurden die Wirkleistungen in der Abszisse verschoben dargestellt.

Eingespeiste Blindleistungen der Generatoren

Die folgenden Diagramme zeigen die eingespeiste Blindleistung Q_g jedes Generators bei unterschiedlichen Maschinenarbeitspunkten.

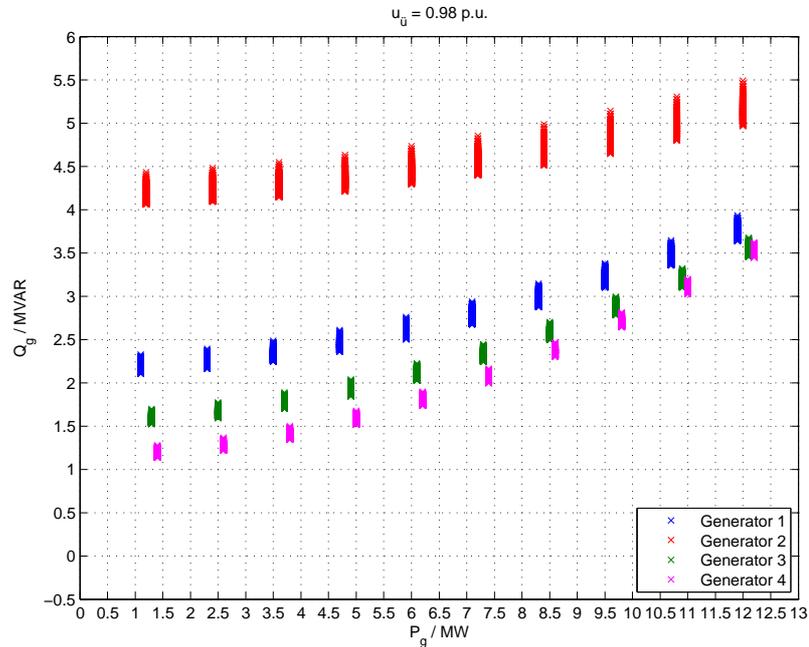


Abbildung 4.4: Blindleistung der Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen, unter Berücksichtigung der Erregerverluste ²

² Die Wirkleistungen wurden in der Abszisse verschoben dargestellt.

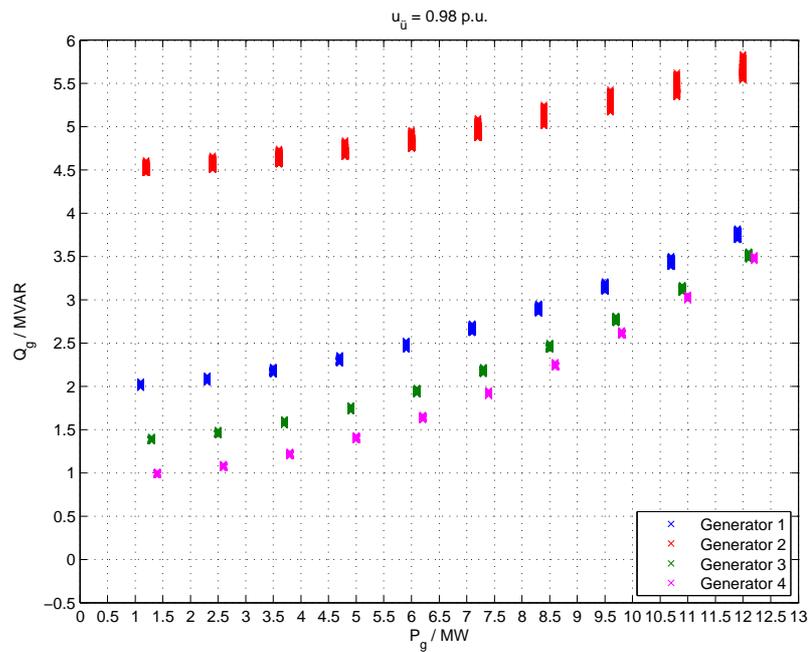


Abbildung 4.5: Blindleistung der Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen, ohne Berücksichtigung der Erregerverluste ²

Blindleistungsaufteilung in Abhängigkeit des Einspeiseortes

Die Blindleistung jedes Generators ist in Abhängigkeit seines Einspeiseortes in den nachstehenden Diagrammen dargestellt. Der Einspeiseort wird durch den Leitwert des jeweiligen Zweiges, über welchen der Generator an die Sammelschiene 2 angebunden ist, repräsentiert. Jede Farbe steht für eine bestimmte Wirkleistung, die jeder der vier Generatoren einspeist.

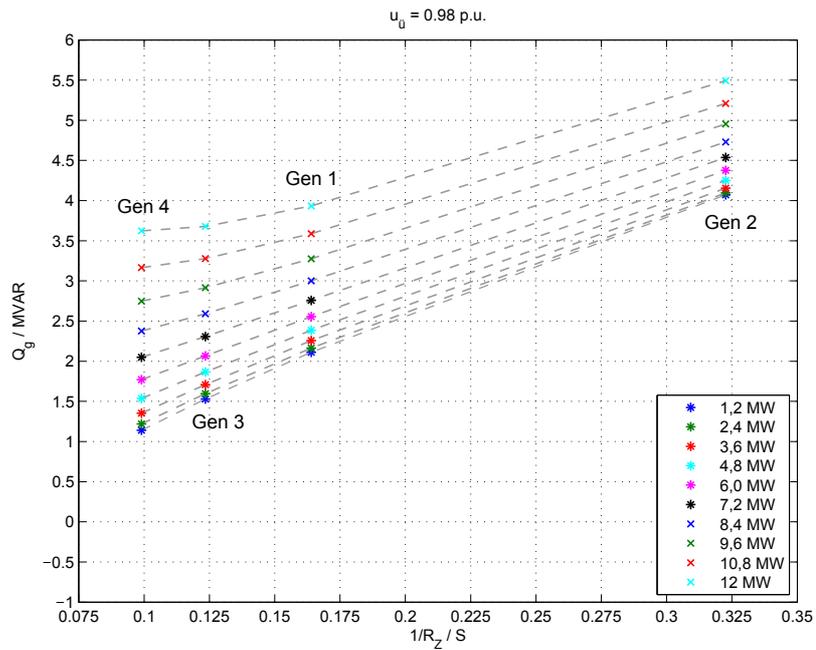


Abbildung 4.6: Eingespeiste Blindleistung in Abhängigkeit des Leitwertes des Anbindungs-
zweiges, bei Berücksichtigung der Erregerverluste

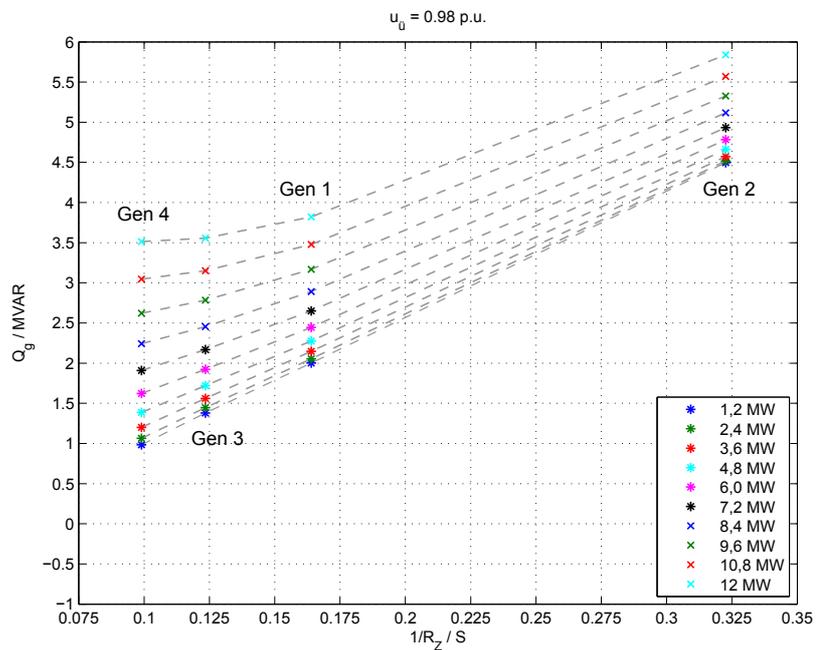


Abbildung 4.7: Eingespeiste Blindleistung in Abhängigkeit des Leitwertes des Anbindungs-
zweiges, ohne Berücksichtigung der Erregerverluste

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Bei optimalem Lastfluss, wenn die Wirkverluste im betrachteten Netzabschnitt am geringsten sind, stellt sich der Blindlastfluss Q_N am Übergabeknoten, wie in der Abbildung 4.8 ersichtlich ist, ein. Eine negative Blindleistung Q_N am Übergabeknoten bedeutet, dass Blindleistung vom betrachteten Netzabschnitt in das übergeordnete Netz geliefert wird. Auf der Abszisse ist die gesamte von den Generatoren eingespeiste Wirkleistung abzüglich der Wirkleistung der Last aufgetragen. Anhand der Ergebnisse aus den Simulationen wurde festgestellt, dass sich der Blindlastfluss bei Einbezug der Erregerverluste nicht vom Blindlastfluss unterscheidet, wenn die Erregerverluste vernachlässigt werden. Es kommt nur zu einer sehr geringen Einspeisung von Blindleistung in das übergeordnete Netz. Die Generatoren liefern die Blindleistung der Last und den Blindleistungsbedarf des jeweiligen Anbindungszweiges.

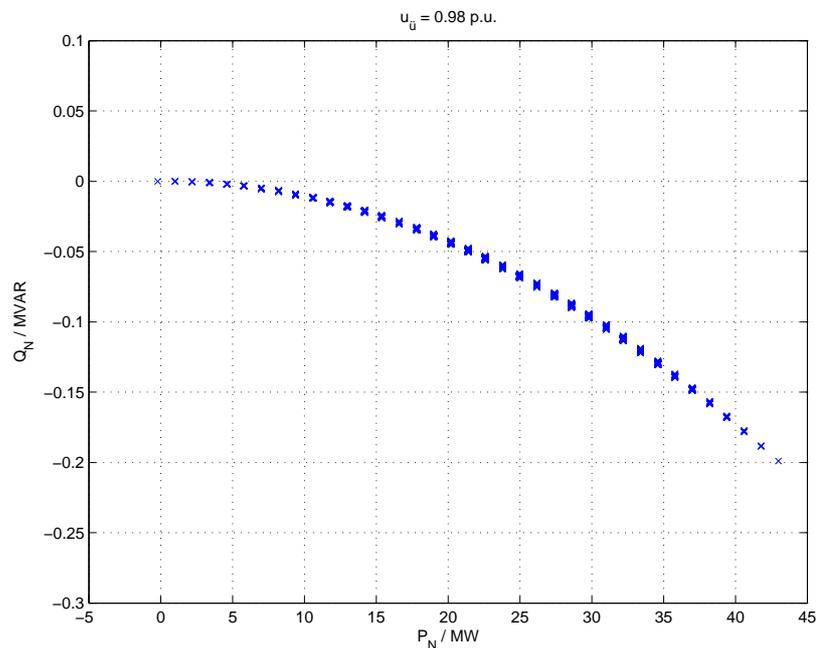


Abbildung 4.8: Blindlastfluss in das übergeordnete Netz, mit Berücksichtigung der Erregerverluste

Schlussfolgerungen

Bei den Generatorspannungen ist zu erkennen, dass sich bei größeren eingespeisten Wirkleistung am Generator 4, der über den Zweig mit dem größten Widerstand (längste Leitung) zur Sammelschiene angebunden ist, stets die größte Spannung einstellt. Vergleicht man die Generatorspannungen der Abbildungen 4.2 und 4.3 miteinander, stellt man fest, dass die Spannung am Generator 2 etwas geringer ist, wenn die Verluste der Erregerleinrichtung mit berücksichtigt werden. Durch die Minimierung der Erregerverluste wird die Erregerleistung minimiert, was zu geringeren Generatorspannungen führt. Die Spannung an den anderen Generatoren ist hingegen angestiegen. Da eine kleinere Spannung zu höheren Wirkverlusten an den Leitungen führen würde, ist es hinsichtlich der Wirkverluste günstiger die Erregung an den Generatoren, die über die längeren

Leitungen an die Sammelschiene 2 angebunden sind, zu erhöhen. Es werden für geringere Wirkverluste an den Übertragungswegen etwas höhere Wirkverluste der Generatorerregung in Kauf genommen, da die Gesamtverluste bei diesem Betriebspunkt am geringsten sind.

Bei den eingespeisten Blindleistungen (Abbildung 4.4 und 4.5) ist verständlicher Weise die selbe Tendenz, wie bei den Spannungen zu erkennen. Da die Erregung auf die Spannung und die Blindleistung des Generators Einfluss hat. Die eingespeiste Blindleistung jedes einzelnen Generators ist nur sehr gering von den Betriebszuständen der restlichen Erzeugungseinheiten abhängig, wenn die Verlustleistung der Erregereinrichtung nicht berücksichtigt wird. In der Abbildung 4.5 ist ersichtlich, dass die Blindleistung des Generators 2, der Generator am Zweig mit dem kleinsten Zweigwiderstand, am stärksten variiert. Die Arbeitspunkte der Generatoren 1,3 und 4 haben einen starken Einfluss auf die eingespeiste Blindleistung der Maschine 2.

Schaut man sich die eingespeiste Blindleistung der Generatoren in Abhängigkeit des Zweigleitwertes an, ist erkenntlich, dass der Generator am Zweig mit dem größten Leitwert, stets am meisten Blindleistung einspeist (siehe Abbildung 4.6 und 4.7). Mit ansteigender übertragener Wirkleistung steigt der Blindleistungsbedarf der Leitungen, woraufhin die Blindleistungseinspeisung der Generatoren auch zunimmt. Fließt die Minimierung der Erregerverluste mit in die Optimierung ein, so ist zu erkennen, dass die eingespeiste Blindleistung am Generator 2 kleiner ist, als bei den Ergebnissen ohne Einbezug der Erregerverluste. Im Gegenzug ist die Blindleistung am Generator 4 größer geworden.

Da die Spannung im übergeordneten Netz zu gering ist, wird eine Blindleistungseinspeisung in das Netz gefordert. Die Abbildung 4.8 verdeutlicht jedoch, dass es bei einem verlustminimalen Lastfluss, nur zu einer sehr geringen Einspeisung von Blindleistung in das übergelagerte Netz kommt, auch dann, wenn für die Optimierung die Verluste der Generatorerregung außer Acht gelassen werden. Speisen die Generatoren viel Wirkleistung ein, kommt es wenigstens zu einem sehr kleinen Blindlastfluss in das übergeordnete Netz, was aber für eine Spannungsstützung viel zu wenig ist. Durch eine entsprechende Vorgabe eines möglichen Spannungsbandes am eingeführten Hilfsknoten wird das Einspeisen von Blindleistung ins Netz untersagt.

4.1.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{\bar{u}} = 1$ p.u.

Für eine Spannung von $u_{\bar{u}} = 1,00$ p.u. im übergeordneten Netz wurde wieder die Blindleistung jedes Generators bei unterschiedlichen Arbeitspunkten und bei minimalen Wirkverlusten ermittelt. Bei ausgeglichenen Spannungsverhältnissen im Netz, unterscheidet sich das Verhalten der Erzeugungseinheiten bei der Optimierung mit oder ohne Einfluss der Erregerverlusten nicht voneinander. Daher wird in diesem Punkt nicht zwischen den beiden Optimierungsvarianten unterschieden.

Generatorklemmenspannungen

In der Abbildung 4.9 sind die Generatorspannungen in Abhängigkeit der eingespeisten Wirkleistungen dargestellt.

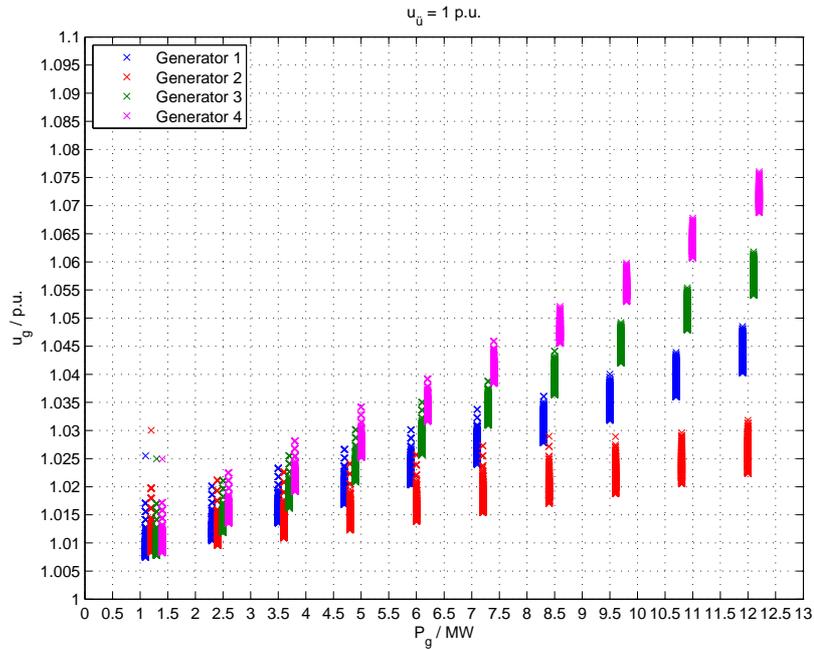


Abbildung 4.9: Generatorklemmenspannung mit bzw. ohne Berücksichtigung der Erregerverluste ¹

Eingespeiste Blindleistungen der Generatoren

Die Blindleistungen, wie sie in der Abbildung 4.11 dargestellt sind, stellen sich an den Generatoren ein, wenn der Lastfluss hinsichtlich minimaler Wirkverluste optimiert wird.

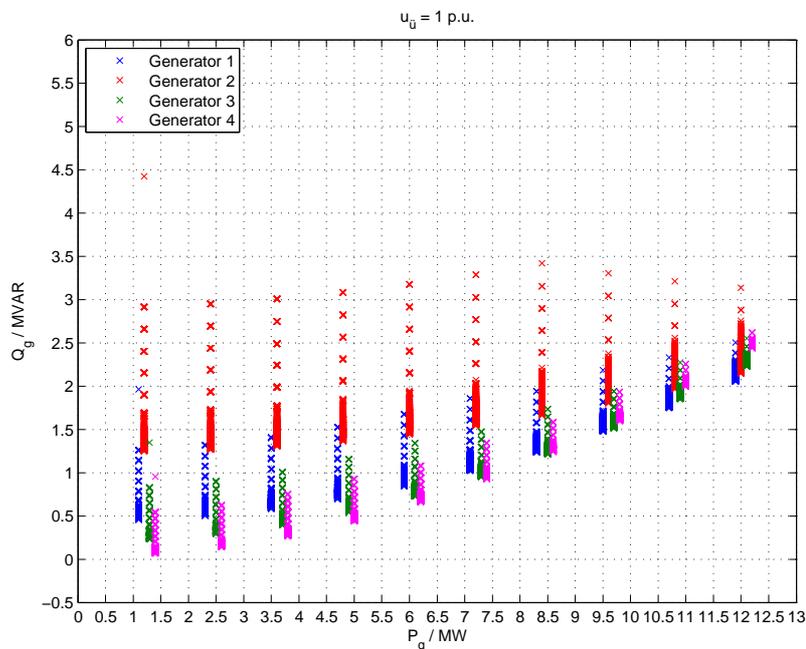


Abbildung 4.10: Blindleistung der Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen, mit bzw. ohne Einbezug der Erregerverluste ²

Blindleistungsaufteilung in Abhängigkeit des Einspeiseortes

Aus der Abbildung 4.11 kann der Beitrag zur Blindleistungslieferung jedes Generators in Abhängigkeit des Leitwertes des jeweiligen Zweiges abgelesen werden.

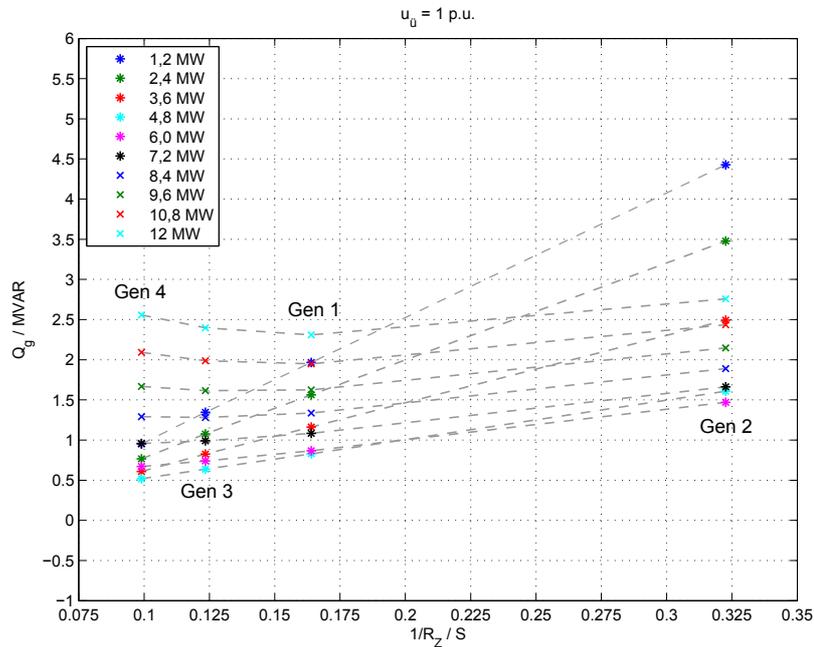


Abbildung 4.11: Eingespeiste Blindleistung in Abhängigkeit des Leitwertes des Anbindungszweiges, mit bzw. ohne Berücksichtigung der Erregerverluste

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Bei einer Spannung $u_{\bar{i}} = 1,00$ p.u. wird bei einem verlustoptimalen Lastfluss Blindleistung aus dem übergeordneten, wie in der Abbildung 4.12 zu sehen ist, bezogen.

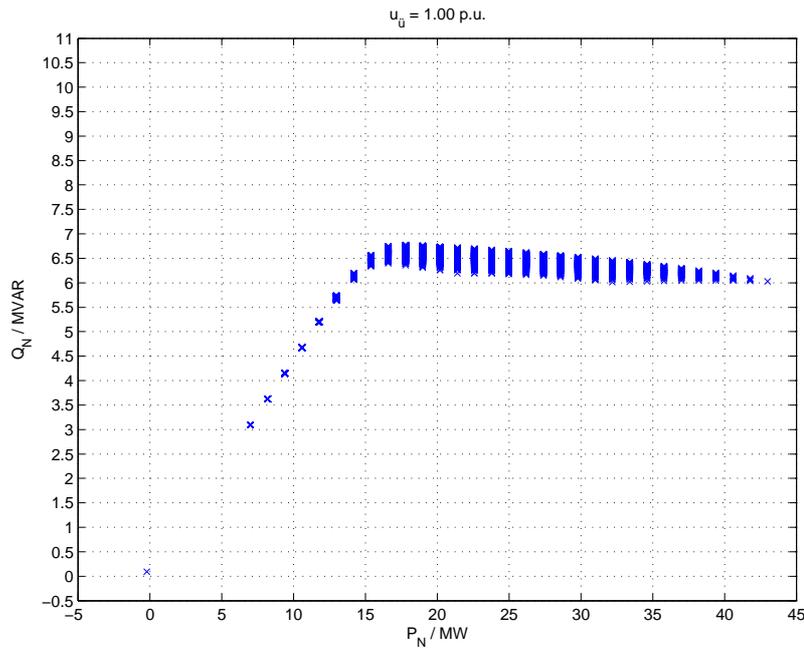


Abbildung 4.12: Blindlastfluss aus dem übergeordneten Netz, mit bzw. ohne Berücksichtigung der Erregerverluste

Schlussfolgerungen

Zu den Ergebnissen, die sich aus den Simulationen bei $u_{\bar{u}} = 1$ p.u. ergeben, kann prinzipiell gesagt werden, dass der optimale Blindlastfluss nicht durch die Verluste der Erregerrichtungen beeinflusst wird. Es ergeben sich die selben Spannungen und Blindlastflüsse bei den Simulationen, wenn die Erregerverluste mit einfließen und auch ohne Berücksichtigung der Erregerverluste.

Die Spannungen an den Generatoren sind gegenüber den Spannungen aus der Simulation mit $u_{\bar{u}} = 0,98$ p.u. etwas geringer. Die kleinste Generatorspannung ergibt sich, wie zu erwarten, am Generator 2, der über die kürzeste Leitung ans Netz angebunden ist.

Bei den eingespeisten Blindleistungen (Abbildung 4.10) ist auffällig, dass die Generatoren wesentlich weniger Blindleistung liefern, als zuvor bei einer kleineren Spannung am Übergabeknoten, da bei kleinen eingespeisten Wirkleistungen so viel wie möglich Blindleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen wird. Begrenzt wird der Blindlastfluss, bei kleinen Wirkleistungen, durch die Vorgabe des kleinsten, erlaubten Wirkleistungsfaktors am Übergabeknoten. Aus der Abbildung 4.12 ist zu erkennen, dass es in Bezug auf die Wirkverluste günstiger ist, wenn die Blindleistung der Last (10 MVAR), bei großen Generatorwirkleistungen, zum Großteil vom übergeordneten Netz gedeckt wird. Diese Tatsache ist auch aus der Abbildung 4.11 erkennbar. Speisen die Generatoren eine große Wirkleistung ein, wird mehr als die halbe Blindleistung der Last aus dem übergeordneten Netz bezogen. Der Rest teilt sich auf die Generatoren in untergeordneten Netzabschnitt auf, wobei die jeweiligen Kraftwerke zusätzlich für den Blindleistungsbedarf des jeweiligen Zweiges aufkommen. Bei dieser vorgegebenen Spannung ($u_{\bar{u}} = 1,00$ p.u.) wurde das er-

laubte Spannungsband am Hilfsknoten 2 so vorgegeben, dass ein Beziehen oder Einspeisen von Blindleistung in das übergeordnete Netz grundsätzlich möglich wäre.

Aus der Abbildung 4.10 ist eine stärkere Abhängigkeit der gelieferten Blindleistung jedes Generators von den Betriebspunkten der restlichen Erzeugungseinheiten erkennbar, als bei einer Spannung kleiner 1 p.u. im übergeordneten Netz.

4.1.3 Spannung am Übergabepunkt $u_{\bar{u}} > 1$ p.u.

Bei einer Spannung im übergelagerten Netz größer 1 p.u. wird durch die Vorgabe, eines von den eingespeisten Wirkleistungen abhängigen erlaubten Spannungsbereiches am Hilfsknoten, das Einspeisen von Blindleistung verhindert. Die Ergebnisse aus den optimierenden Lastflussberechnungen sind in den folgenden Diagrammen für $u_{\bar{u}} = 1,02$ p.u. dargestellt. Die Ergebnisse aus der Optimierung mit Berücksichtigung der Erregerverluste unterscheiden sich bei höheren Spannungen von den Ergebnissen, bei denen die Erregerverluste nicht in die Optimierung einfließen. Aus diesem Grund wird auf die Unterschiede zwischen den beiden Fällen eingegangen.

Generatorklemmenspannungen

Mit steigender Spannung am Übergabeknoten, steigen auch die Generatorklemmenspannungen an. Dargestellt werden hier nur die Ergebnisse für eine Spannung $u_{\bar{u}} = 1.02$ p.u. am Knoten zum Übergeordneten Netz.

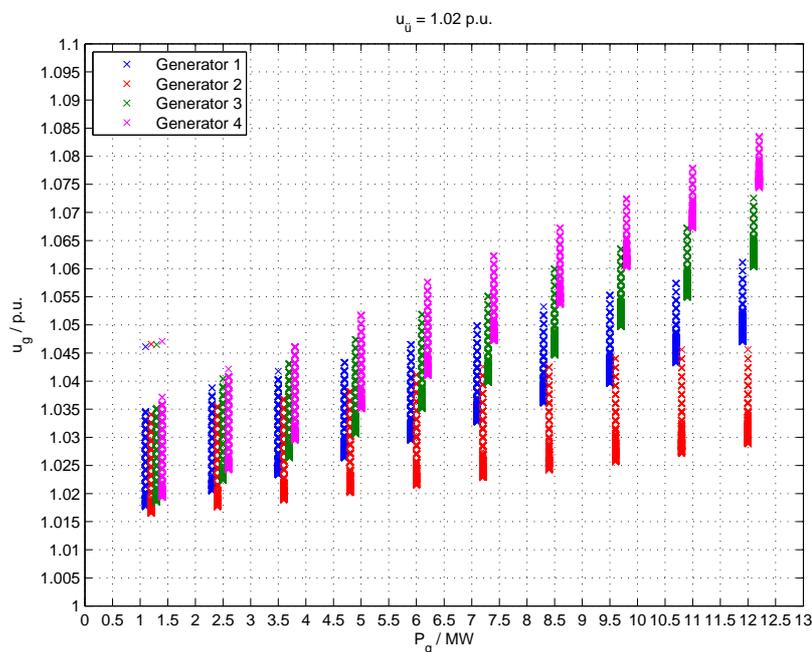


Abbildung 4.13: Generatorklemmenspannungen bei Berücksichtigung der Erregerverluste ¹

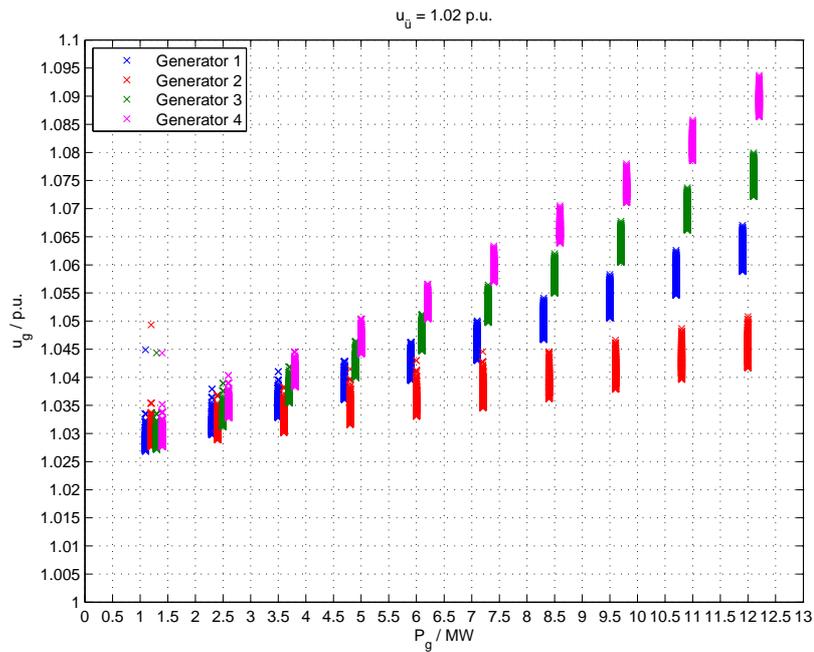


Abbildung 4.14: Generatorklemmenspannungen ohne Berücksichtigung der Erregerverluste ¹

Eingespeiste Blindleistungen der Generatoren

Die gelieferten Blindleistungen der Generatoren nimmt mit steigender Spannung im Übergeordneten Netz ab. Bei kleineren eingespeisten Wirkleistungen gelangen die Erzeugungseinheiten sogar in den untererregten Betriebszustand, wenn die Erregerverluste in der Optimierung mit berücksichtigt werden.

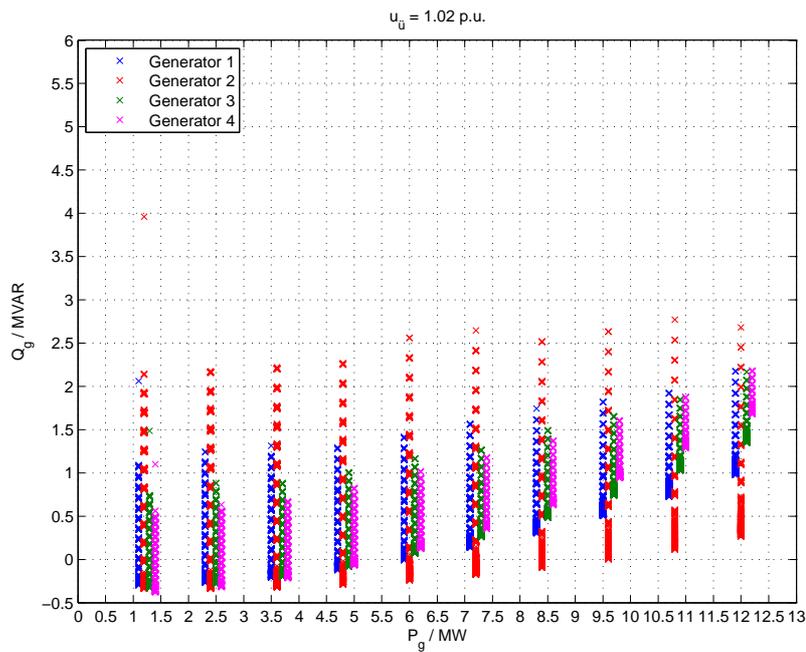


Abbildung 4.15: Blindleistung der Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen, unter Berücksichtigung der Erregerverluste ²

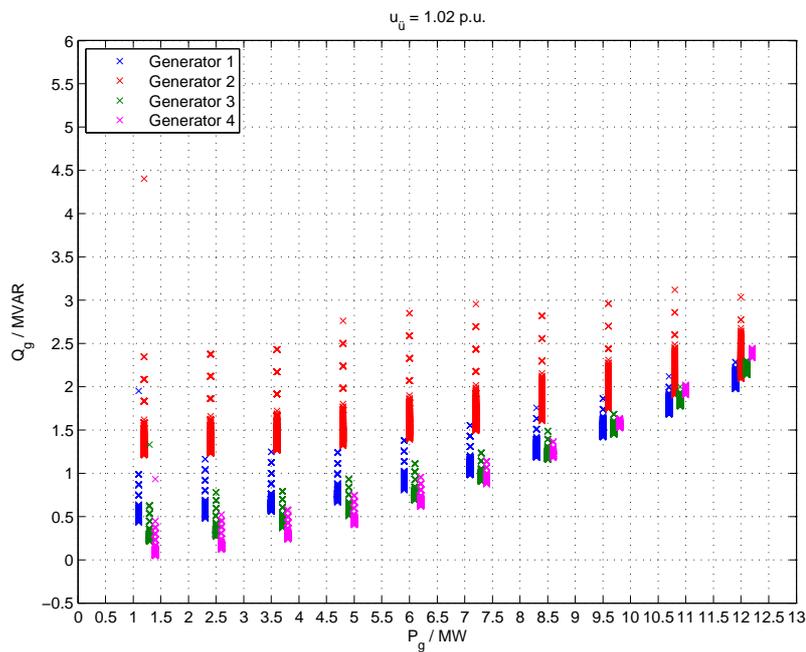


Abbildung 4.16: Blindleistung der Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen, ohne Berücksichtigung der Erregerverluste ²

Blindleistungsaufteilung in Abhängigkeit des Einspeiseortes

Das unterschiedliche Verhalten der Erzeugungseinheiten bei einer Spannung von 1,02 p.u. im übergelagerten Netz ist in den nachstehenden Diagrammen zu sehen. Generell ist zu erkennen, dass die Generatoren etwas weniger Blindleistung bereitstellen, wenn die Verluste, die durch die Blindleistungsbereitstellung an den Erregereinrichtungen entstehen, Berücksichtigung finden.

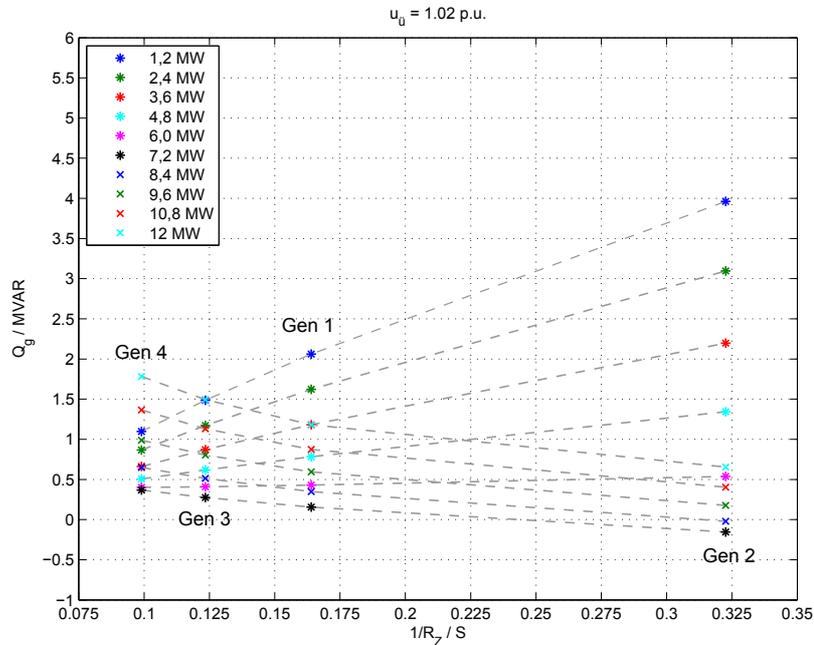


Abbildung 4.17: Eingespeiste Blindleistung in Abhängigkeit des Leitwertes des Anbindungszweiges, bei Berücksichtigung der Erregerverluste

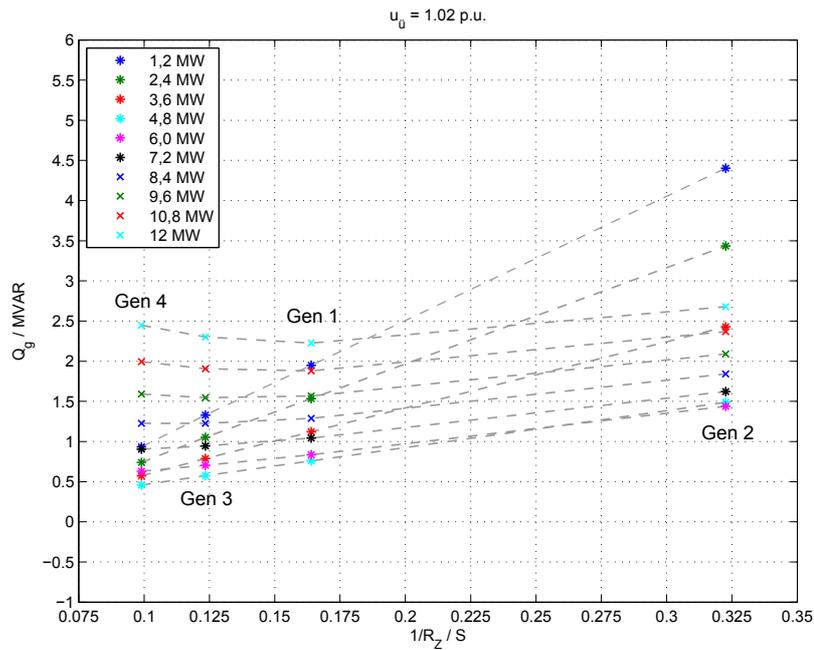


Abbildung 4.18: Eingespeiste Blindleistung in Abhängigkeit des Leitwertes des Anbindungszweiges, bei Berücksichtigung der Erregerverluste

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Werden von den Kraftwerken kleine Wirkleistungen eingespeist, wird stets so viel wie möglich Blindleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen. Bei großen Generatorwirkleistungen speist das überlagerte Netz die Blindleistung der Last ($Q_{Last} = 10 \text{ MVAR}$) ein, wenn die Erregerverluste in die Optimierung einbezogen werden.

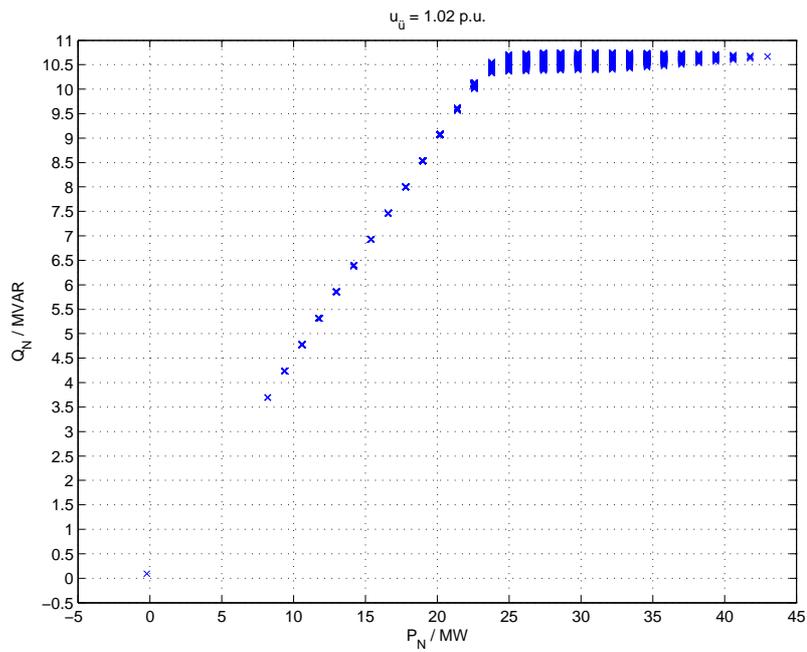


Abbildung 4.19: Blindlastfluss aus dem übergeordneten Netz, mit Berücksichtigung der Erregerverluste

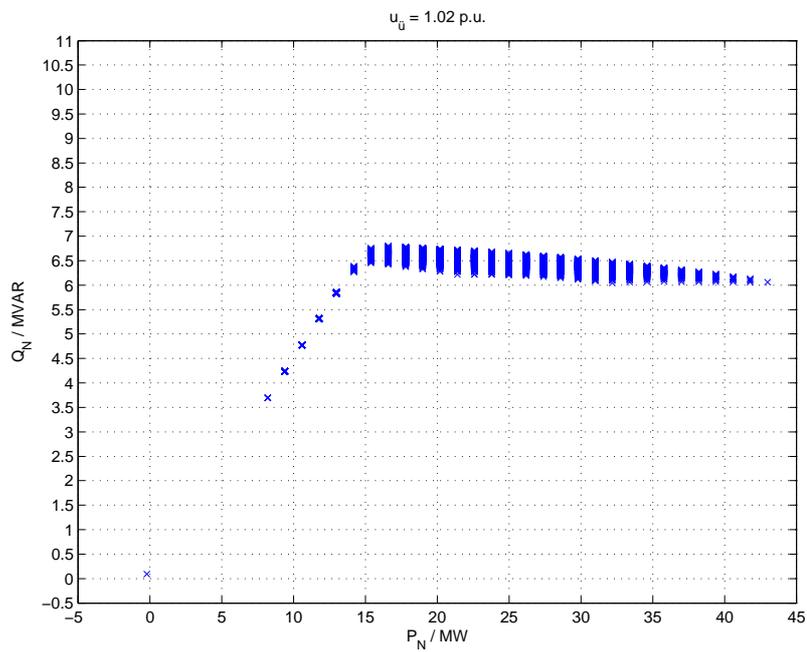


Abbildung 4.20: Blindlastfluss aus dem übergeordneten Netz, ohne Berücksichtigung der Erregerverluste

Schlussfolgerungen

Bei der Optimierung mit Berücksichtigung der Erregerverluste ist zu bemerken, dass die Generatorspannungen sehr stark vom Betriebspunkten der anderen Generatoren abhängen. Dies ist in der Abbildung 4.13 ersichtlich. Generell variiert die Generatorspannung am Generator 2 am meisten. Die Klemmenspannung am Generator 4, am Zweig mit dem größten Zweigwiderstand, ändert sich, in Abhängigkeit der Arbeitspunkte der restlichen Erzeugungseinheiten, am geringsten. Das Verhalten der Blindleistungen der Generatoren spiegelt sich im Verhalten der Generatorspannungen wider.

Da ab einer großen eingespeisten Wirkleistung und unter Einbezug der Erregerverluste jeder Generator nur mehr den Blindleistungsbedarf seines Zweiges deckt, speist der Generator 2 weniger Blindleistung ein, als die übrigen Generatoren. Bleiben die Verluste der Erregung unberücksichtigt, ist es in Betracht auf die Wirkverluste im Netzabschnitt günstiger, wenn der Generator 2 den größten Anteil an Blindleistung einspeist (siehe Abbildung 4.18).

Werden die Verlustleistungen der Erregeranlagen nicht in der Optimierung berücksichtigt, verhält sich der Blindlastfluss zum übergeordneten Netz gleich wie bei einer Spannung $u_{\bar{u}} = 1,00$ p.u. im übergeordneten Netz. Aus der Abbildung 4.17 ist zu erkennen, dass die Generatoren, unter Berücksichtigung der Erregerverluste, ab einer gesamten eingespeisten Wirkleistung von ca. 24 MW ($4 \cdot 6$ MW) keine Blindleistung für die Last bereitstellen, denn sie liefern nur mehr den Blindleistungsbedarf des jeweiligen Zweiges. Mit größer werdenden Generatorwirkleistungen nimmt bei kleineren Wirkleistung die gelieferte Blindleistung ab, da immer mehr Blindleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen werden kann. Wird mehr als 24 MW eingespeist, steigt die Generatorblindleistung mit steigender gelieferter Wirkleistung wieder an. Der, durch die größer werdende übertragene Wirkleistung steigende Blindleistungsbedarf der Leitungen, wird von den Generatoren bereitgestellt. Sollen die Erregerverluste mit einbezogen werden, bezieht die Last bei großen eingespeisten Wirkleistungen ihre Blindleistung zur Gänze aus dem übergelagerten Netz. Bei kleinen Generatorwirkleistungen wird der Blindlastfluss am Übergabeknoten durch die Beschränkung des Wirkleistungsfaktors eingegrenzt. Es wird die maximal erlaubte Blindleistung, mit $\cos(\varphi) = 0,9$ aus dem übergeordneten Netz bezogen, wie in der Abbildung 4.19 ersichtlich ist.

In der Simulation wurde ein mögliches Einspeisen von Blindleistung verhindert.

Kenndaten der Betriebsmittel

$$\begin{aligned} \text{Transformator 1} \quad S_n &= 50 \text{ MVA} \\ \text{und 2:} \quad u_k &= 10 \% \\ &u_r = 1 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Leitungsparameter:} \quad r' &= 0,1 \ \Omega/\text{km} \\ &x' = 0,4 \ \Omega/\text{km} \\ &c' = 0,01 \ \mu\text{F}/\text{km} \end{aligned}$$

Blocktransformatoren

$$\begin{aligned} \text{Generator 1-4:} \quad S_n &= 15 \text{ MVA} \\ &u_k = 8 \% \\ &u_r = 1 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Generator 1-4:} \quad S_n &= 15 \text{ MVA} \\ &U_n = 15 \text{ kV} \\ &x_d = 1,8 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\text{Reaktanz:} \quad x_{Sh} = 0,05 \text{ p.u.}$$

Impedanzen der Generatoreinspeiseknoten

Für das, in der Abbildung 4.21 dargestellte Netz, ergeben sich die unten stehenden Knotenimpedanzen für die Knoten, in welche die Generatoren einspeisen. Für die Berechnung der Impedanzen wurden die Leitungskapazitäten vernachlässigt.

Aus der leicht zu ermittelnden Admittanzmatrix $\underline{\mathbf{Y}}$ wird die Impedanzmatrix $\underline{\mathbf{Z}}$ berechnet. Die Einträge in der Hauptdiagonale \underline{Z}_{ii} der Impedanzmatrix entsprechen den Kurzschlussimpedanzen an den entsprechenden Knoten i .

Die Admittanzmatrix wird folgendermaßen ermittelt [4]:

$$\underline{Y}_{ii} = \sum_j \frac{1}{\underline{Z}_{ij}} \quad \underline{Y}_{ij} = \underline{Y}_{ji} = -\frac{1}{\underline{Z}_{ij}} \quad (4.2)$$

Aus der Admittanzmatrix $\underline{\mathbf{Y}}$ kann die Impedanzmatrix $\underline{\mathbf{Z}}$ ermittelt werden.

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{\mathbf{Y}}^{-1} \quad (4.3)$$

Für die Netzeinspeisung wurde eine Kurzschlussleistung von 2 GW angenommen. Die berechneten Impedanzen wurden auf die 50 kV Ebene bezogen.

Generator			
1	2	3	4
$(3,59 + j 22,60) \Omega$	$(4,97 + j 27,58) \Omega$	$(3,15 + j 20,50) \Omega$	$(5,61 + j 30,58) \Omega$

Tabelle 4.2: Knotenimpedanz an den Generatoreinspeiseknoten

4.2.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{\ddot{u}} < 1$ p.u.

Bei einer zu geringen Spannung im übergeordneten Netz wird grundsätzlich eine Einspeisung von Blindleistung in das Netz gefordert, um die Netzspannung innerhalb bestimmter Grenzen halten zu können. Dem Optimierungsalgorithmus wird es überlassen, ob Blindleistung in das übergeordnete Netz eingespeist wird oder nicht. Ein Bezug von Blindleistung aus dem übergelagerten Netz wird durch die Vorgabe des erlaubten Spannungsbandes an der Sammelschiene 2 verhindert.

In den folgenden Diagrammen wurden die Generatorwirkleistungen jeweils auf die Generatornennleistung bezogen, um die erhaltenen Ergebnisse mit denen aus 4.3 (Erzeugungseinheiten mit unterschiedlichen Generatornennleistungen) besser vergleichen zu können.

Generatorklemmenspannungen

Im Vergleich zu den Generatorspannungen im einfachen Strahlennetz ist hier zu erkennen, dass die Spannungen an den Generatoren wesentlich geringer sind.

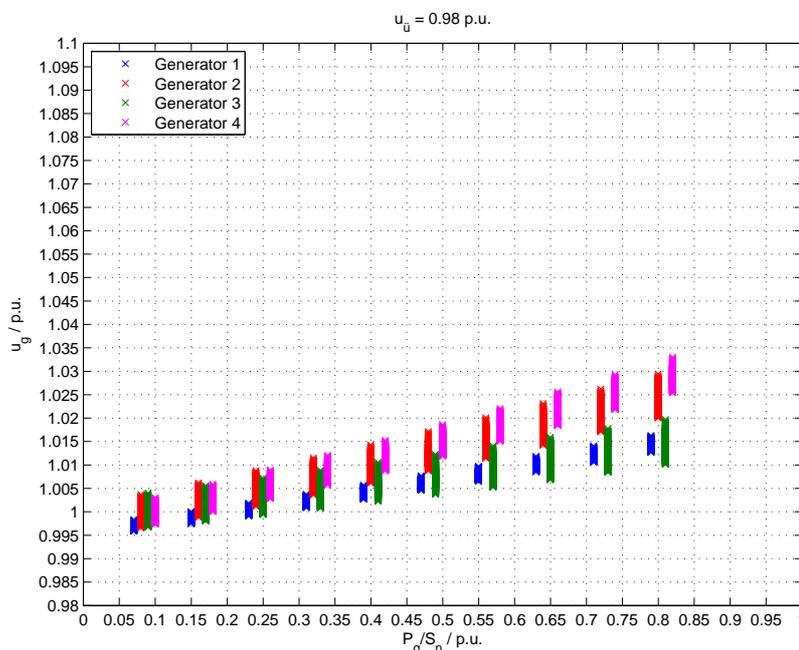


Abbildung 4.22: Spannungen an den Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen ¹

Eingespeiste Blindleistungen der Generatoren

Bei großer eingespeister Wirkleistung liefern alle Generatoren annähernd gleich viel Blindleistung.

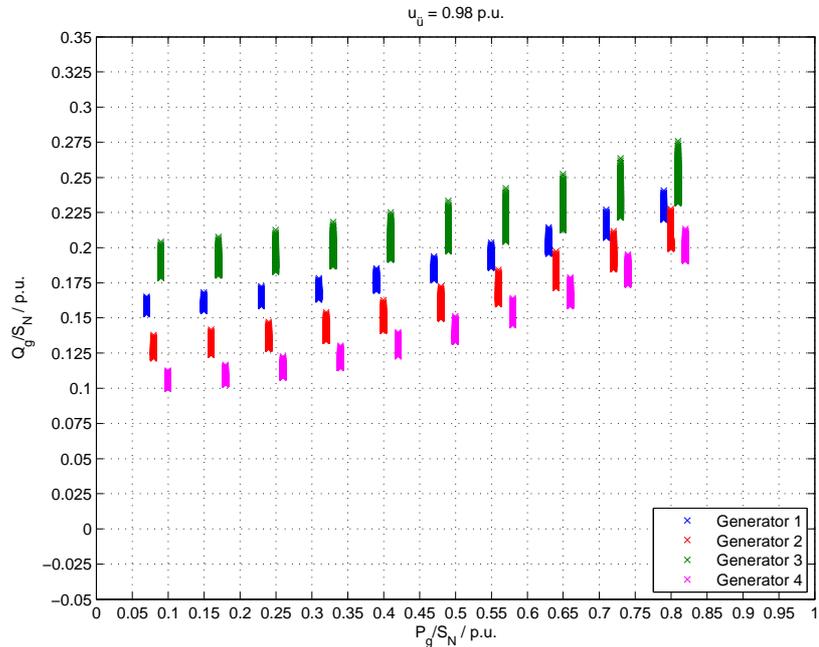


Abbildung 4.23: Blindleistung der Generatoren in Abhängigkeit der Generatorwirkleistung ²

Blindleistungsaufteilung in Abhängigkeit des Einspeiseortes

Auch im vermaschten Netz ist ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Generatorblindleistung und dem Leitwert zu erkennen. Wobei hier der Leitwert dem Kehrwert der Resistanz der Knotenimpedanz entspricht.

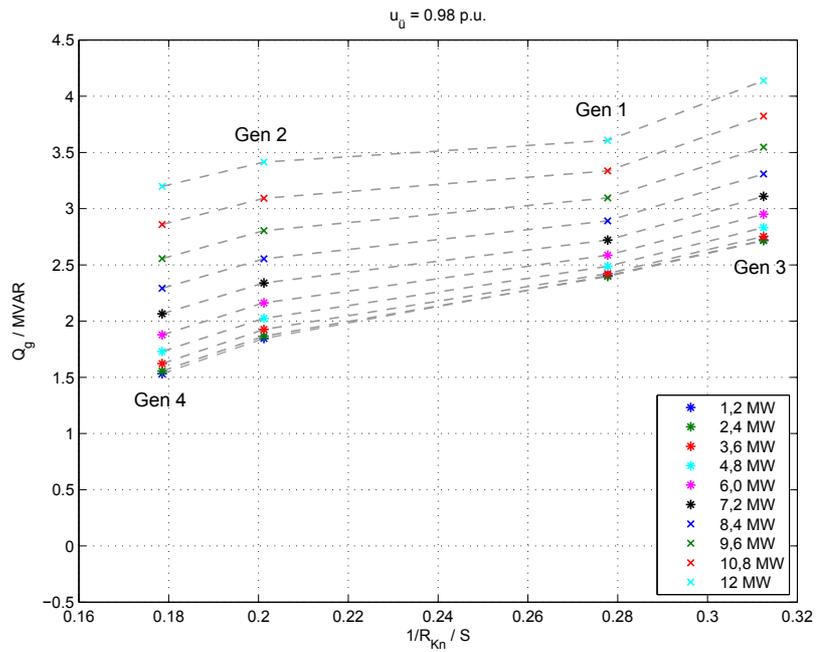


Abbildung 4.24: Darstellung der Generatorblindleistungen in Abhängigkeit der Resistenzen der Knotenimpedanzen

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Der verlustoptimalste Lastfluss ergibt sich auch in diesem betrachteten Netzabschnitt, wenn keine bzw. bei großen gelieferten Wirkleistungen von den Generatoren nur sehr wenig Blindleistung in das übergeordnete Netz eingespeist wird.

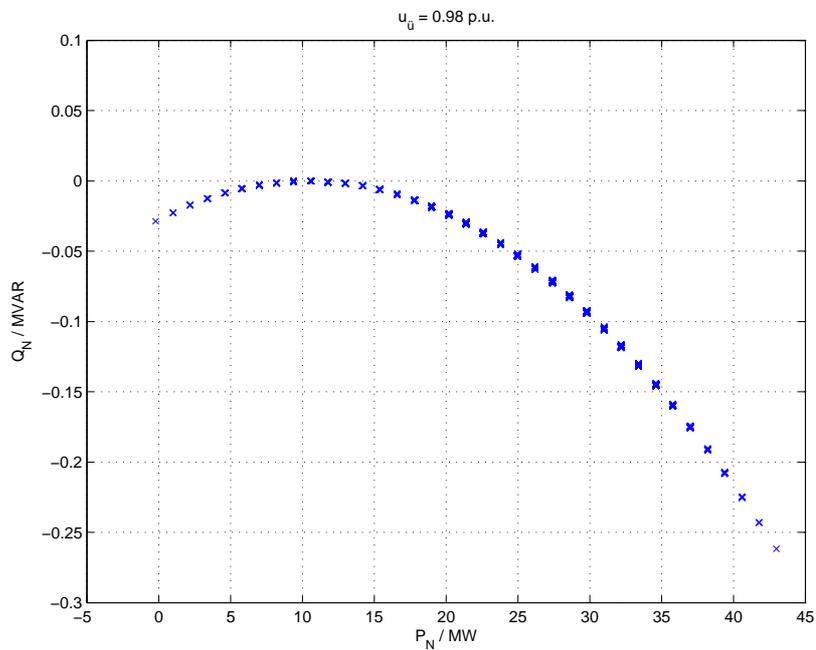


Abbildung 4.25: Blindlastfluss zum übergeordneten Netz

Schlussfolgerungen

Im vermaschten Netz ist selbst bei einer großen eingespeisten Wirkleistung die Generator клемmenspannung relativ gering. Die Spannung an den Generatoren ändert sich im Gegensatz zu den Generatorspannungen im Strahlennetz nur wenig, wenn die Generatorwirkleistung von einer sehr geringen eingespeisten Wirkleistung bis annähernd der Nennleistung erhöht wird.

Im vermaschten Netz konnte ein Zusammenhang zwischen Generatorblindleistung und der Resistanz der Knotenimpedanz festgestellt werden. Es ist zu erkennen, dass der Generator am Knoten mit dem kleinsten Realteil der Knotenimpedanz (Generator 3) die größte Blindleistung einspeist. Der Generator 4 liefert hingegen stets am wenigsten Blindleistung, wenn alle vier Generatoren die selbe Wirkleistung einspeisen (siehe Abbildung 4.24).

Aus der Abbildung 4.25 ist ersichtlich, dass bei einem optimalen Lastfluss mit den geringsten Wirk- und Erregerverlusten nur sehr wenig Blindleistung in das übergeordnete Netz eingespeist wird. Wird Blindleistung für die Stützung der Spannung im übergeordneten Netz benötigt, findet sich keine verlustminimalste Lösung für den Lastfluss im untergeordneten Netzabschnitt, bei dem Blindleistung ins Netz geliefert wird.

4.2.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{\bar{u}} \geq 1$ p.u.

Ist die Spannung im überlagerten Netz zu hoch, soll Blindleistung aus dem Netz bezogen werden. Das Einspeisen von Blindleistung ist bei einem zu hohen Spannungsniveau nicht erlaubt.

Da es keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus den Lastflussberechnungen bei einer Spannung von 1 p.u. und größer 1 p.u. im übergeordneten Netz gibt, werden in diesem Abschnitt nicht beide Fälle getrennt behandelt.

Generatorklemmenspannungen

Die Spannungen an den Generatoren sind sehr stark von der Wirkleistung der anderen Generatoren abhängig.

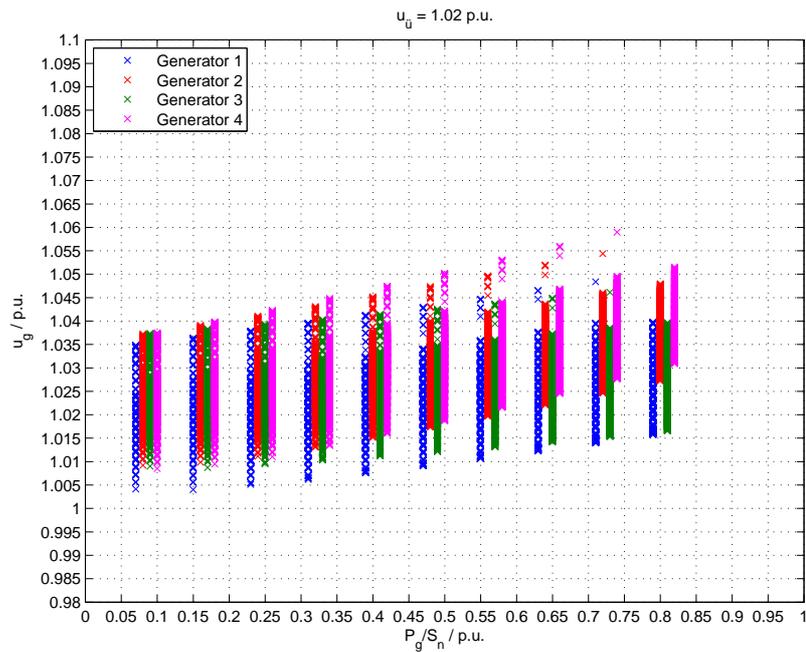


Abbildung 4.26: Spannungen an den Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen ¹

Eingespeiste Blindleistungen der Generatoren

Wie bei den Spannungen ist auch eine starke Abhängigkeit der Generatorblindleistung vom Betriebspunkt der anderen Generatoren wahrzunehmen.

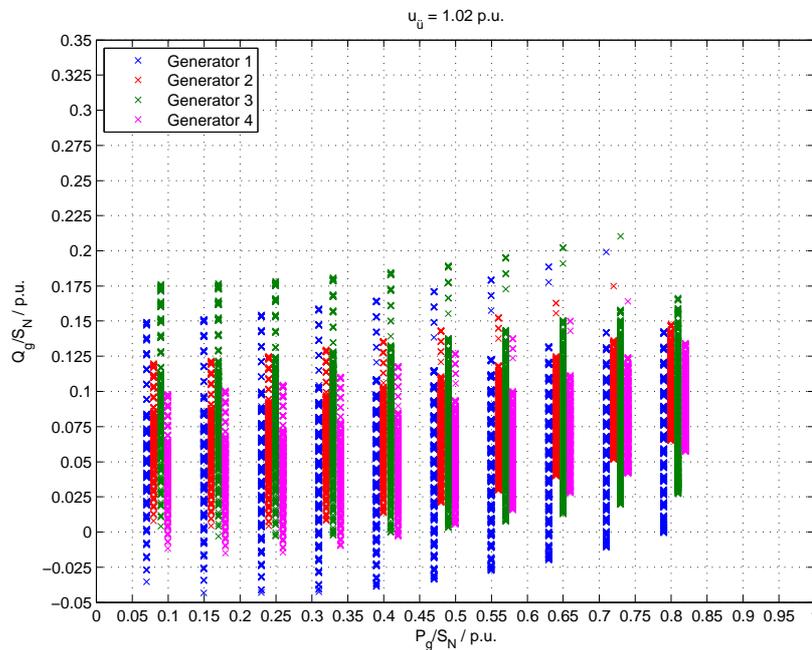


Abbildung 4.27: Blindleistung der Generatoren in Abhängigkeit der Generatorwirkleistung ²

Blindleistungsaufteilung in Abhängigkeit des Einspeiseortes

Bei kleinen eingespeisten Wirkleistungen speist der Generator am Knoten mit dem geringsten Knotenwiderstand stets am meisten Blindleistung ein.

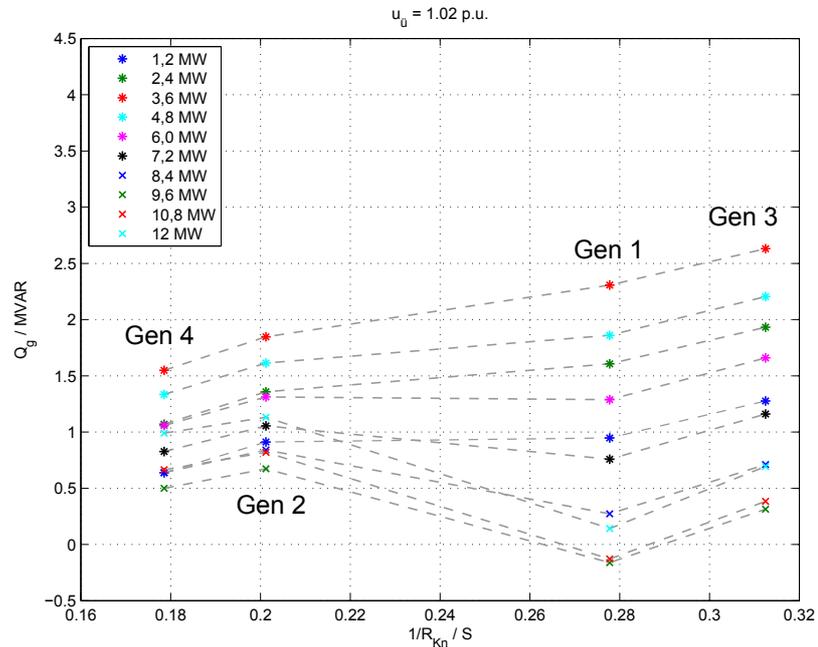


Abbildung 4.28: Darstellung der Generatorblindleistungen in Abhängigkeit der Resistenzen der Knotenimpedanzen

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Wenn es die vorgegebene Wirkleistungsfaktorgrenze erlaubt, ist es im Hinblick auf die Verluste günstiger, wenn die Blindleistung der Last zur Gänze aus dem übergeordneten Netz bezogen wird.

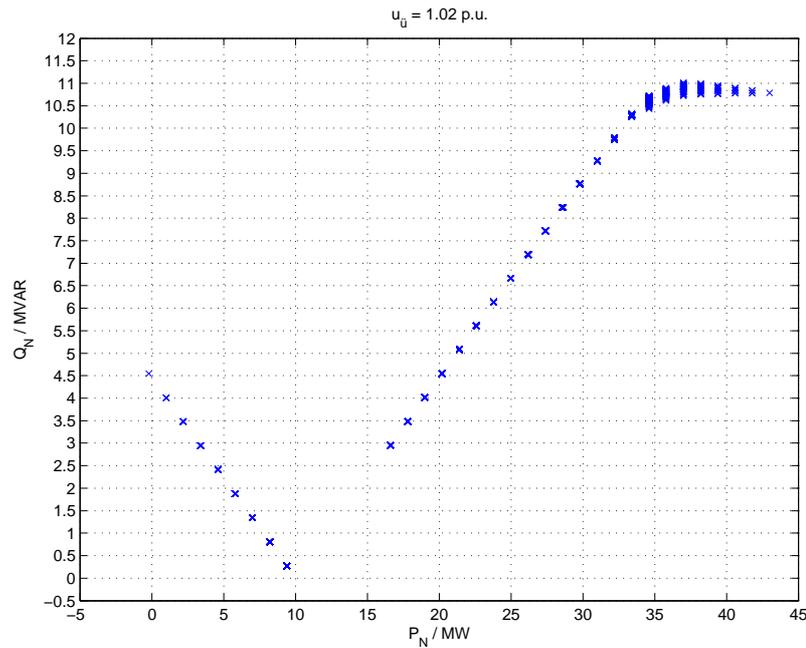


Abbildung 4.29: Blindlastfluss zum übergeordneten Netz

Schlussfolgerungen

Wie die Generatorspannungen variieren auch die Blindleistungen jedes Generators (Abbildung 4.27) sehr stark in Abhängigkeit der Betriebspunkte der restlichen Erzeugungseinheiten. Generell ist zu erkennen, dass die Blindleistung des Generators (Generator 4) am Knoten mit dem größten resistiven Anteil der Knotenimpedanz am wenigsten von den Arbeitspunkten der restlichen Generatoren abhängig ist.

Liefern die Generatoren kleine Wirkleistungen, ist wieder ein nahezu lineares Verhalten zwischen dem Kehrwert der Resistanz der Knotenimpedanz, des Knotens, in den der jeweilige Generator einspeist, und der eingespeisten Blindleistung erkennbar. Demnach speist der Generator 3, die Maschine am Knoten mit dem kleinsten resistiven Anteil der Knotenimpedanz, am meisten Blindleistung ein. Werden die Generatorwirkleistung gesteigert, wird immer mehr Blindleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen, wobei die Blindleistungseinspeisung der Kraftwerke im betrachteten Netzabschnitt abnimmt. Werden die gelieferten Wirkleistungen der Generatoren sehr groß, kann, wie in der Abbildung 4.28 zu sehen ist, nicht von der Reaktanz bzw. Resistanz der Knotenimpedanz auf die Generatorblindleistung geschlossen werden.

Bei einer großen Spannung im übergeordneten Netz und bei sehr großen eingespeisten Wirkleistungen von den Generatoren, wird die Blindleistung der Last ($Q_{Last} = 9$ MVAR) und der Blindleistungsbedarf der beiden Transformatoren 1 und 2 bei minimalen Wirkverlusten aus dem übergeordneten Netz bezogen. Bei geringen eingespeisten Wirkleistungen wird stets die maximal erlaubte Blindleistung, bei $\cos \bar{u}(\varphi) = 0,90$ am Übergabeknoten, aus dem Netzbezogen.

4.3 Vermaschtes Netz mit Generatoren unterschiedlicher Nennleistungen

Für die nächsten Lastflussberechnungen wird wieder der Netzabschnitt der Abbildung 4.21 herangezogen. Es werden nur die Nennleistungen der Erzeugungseinheiten geändert und als unterschiedlich groß angenommen. Die Nennleistungen der Blocktransformatoren werden als gleich groß, wie die der dazugehörigen Generatoren, angenommen. Aus diesen Simulationen soll der Einfluss der Nennleistungen der Generatoren auf die Zuteilung der Blindleistung zu den einzelnen Kraftwerken dargelegt werden.

Kenndaten der Betriebsmittel

Generator 1:	$S_{n,g1}$	=	30 MVA
Generator 2:	$S_{n,g2}$	=	15 MVA
Generator 3:	$S_{n,g3}$	=	5 MVA
Generator 4:	$S_{n,g4}$	=	15 MVA

Alle anderen Nenndaten bleiben gegenüber den Daten aus dem Abschnitt 4.2 unverändert.

4.3.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{\bar{u}} < 1$ p.u.

Für eine Spannung im übergeordneten Netz $u_{\bar{u}} < 1$ p.u. werden nur die Ergebnisse aus den Simulationen für $u_{\bar{u}} = 0.98$ p.u. dargestellt. Für noch kleinere Spannungen im übergeordneten Netz stellen sich bloß kleinere Spannungen an den Generatoren ein und die gelieferten Blindleistungen nehmen geringfügig zu.

Generatorklemmenspannungen

Der Generator 1 speist auf Grund seiner größeren Nennleistung mehr Wirkleistung, als die übrigen Maschinen, ein. Daher stellt sich bei einem optimierten Lastfluss eine höhere Spannung im Vergleich zu vorher (Abbildung 4.22) ein.

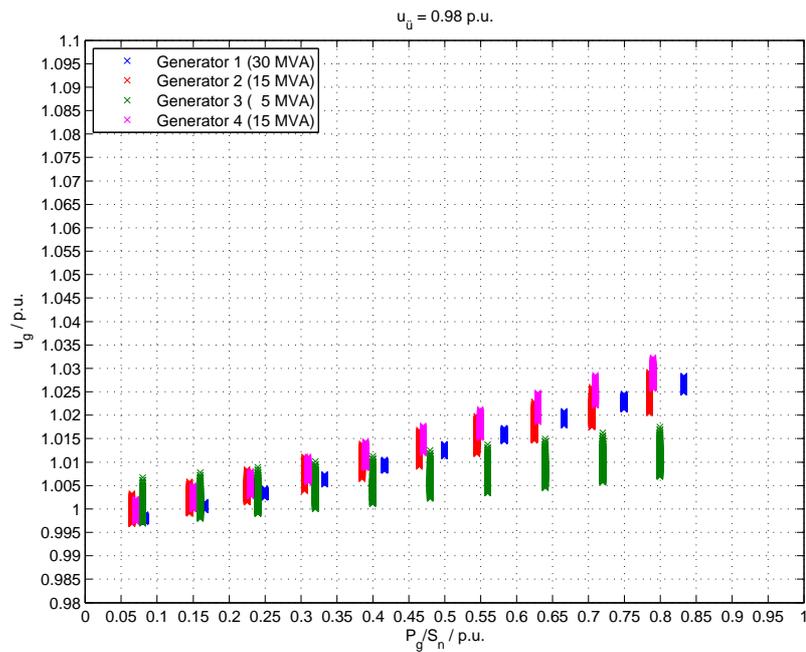


Abbildung 4.30: Spannungen an den Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen ¹

Eingespeiste Blindleistungen der Generatoren

Werden die Generatorwirkleistungen jeweils auf die Generatornennleistung bezogen, ist zu erkennen, dass die relative gelieferte Blindleistung des Generators 1 im Vergleich zu den Ergebnissen aus 4.2 abgenommen und die relative Blindleistung des Generators 3 zugenommen hat.

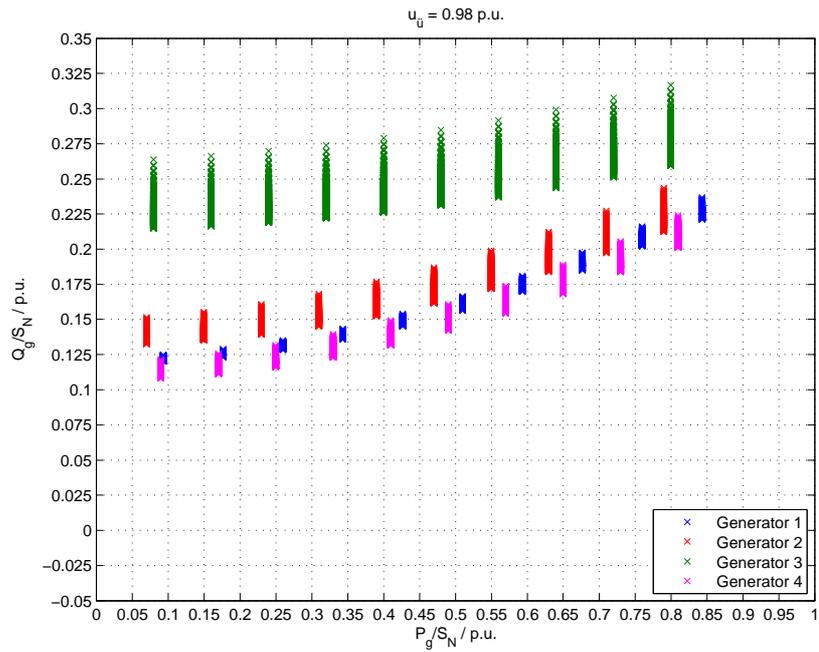


Abbildung 4.31: Blindleistung der Generatoren in Abhängigkeit der Generatorwirkleistung ²

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Bei optimalen Wirk- und Erregerverlusten wird auch bei dieser Konstellation nur sehr wenig Blindleistung für die Stützung der Spannung in das übergeordnete Netz eingespeist.

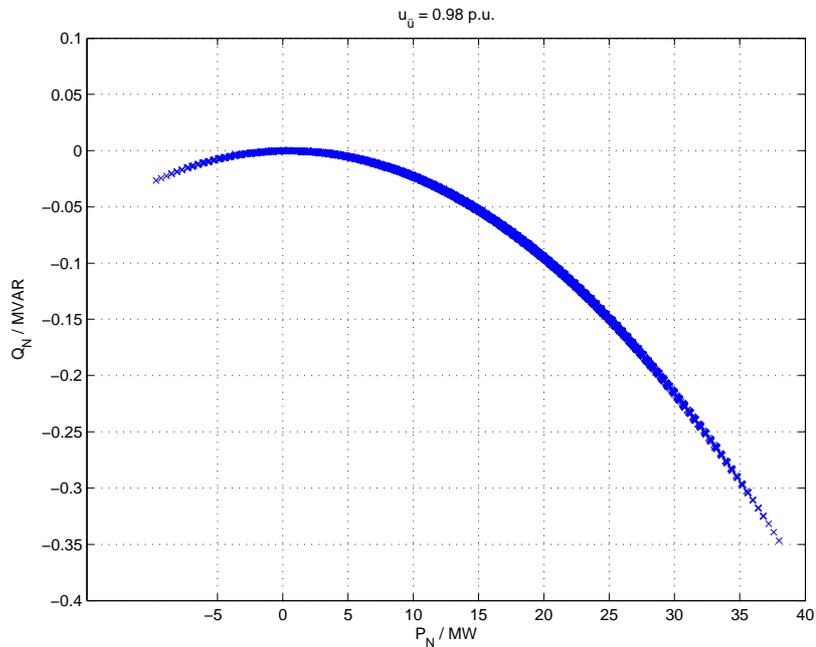


Abbildung 4.32: Blindlastfluss zum übergeordneten Netz

Schlussfolgerungen

Vergleicht man die Generatorspannungen der Abbildungen 4.22 und 4.30, so kann man erkennen, dass im Fall, wenn die Generatoren unterschiedliche Nennleistungen aufweisen, die Generatorspannung des Generators mit der größten Nennleistung höher ist. Ist die Generatornennleistung einer Maschine im Vergleich zu den Simulationen aus dem Fall gleich großer Generatornennleistungen kleiner geworden, ergibt sich auch eine kleinere Generatorspannung, da die absolute eingespeiste Wirkleistung kleiner ist.

Im Vergleich der eingespeisten Blindleistungen im Fall, wenn alle Generatoren eine gleich große Nennleistung aufwiesen mit der Variante, bei der die Generatoren unterschiedliche Nennleistungen besitzen, können Unterschiede bei der eingespeisten Blindleistung erkannt werden. Ist die Generatornennleistung, gegenüber den Simulationen aus dem Kapitel 4.2, kleiner geworden, steigt die, auf die Generatornennleistung bezogene Blindleistung an. Wird die Nennleistung dagegen vergrößert, so wird die bezogene Blindleistung im Vergleich dazu kleiner.

Im Allgemeinen steigt die Leerlauferregerleistung mit größer werdender Generatornennleistung an. Folge dessen ergeben sich größere Erregerverluste an Generatoren größerer Nennleistung. Da unter anderem auch eine Optimierung der Erregerverluste gefordert wird, liefern Generatoren großer Nennleistung im verlustoptimierten Lastfluss eine kleinere auf dessen Nennleistung bezogene Blindleistung.

4.3.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{\bar{u}} \geq 1$ p.u.

Bei Spannungen im übergeordneten Netz größer 1 p.u. steigen auch die Generatorspannungen mit steigender Spannung am Übergabeknoten an. Die Blindleistungen nehmen hingegen mit steigender Netzspannung ab. In den Diagrammen werden nur die Ergebnisse für $u_{\bar{u}} = 1.02$ p.u. dargestellt.

Generatorklemmenspannungen

Die Spannungen der einzelnen Generatoren sind stärker von den Betriebspunkten der übrigen Erzeugungseinheiten abhängig, als im Fall, wenn sich nur Generatoren der selben Nennleistung im betrachteten Netzabschnitt befinden.

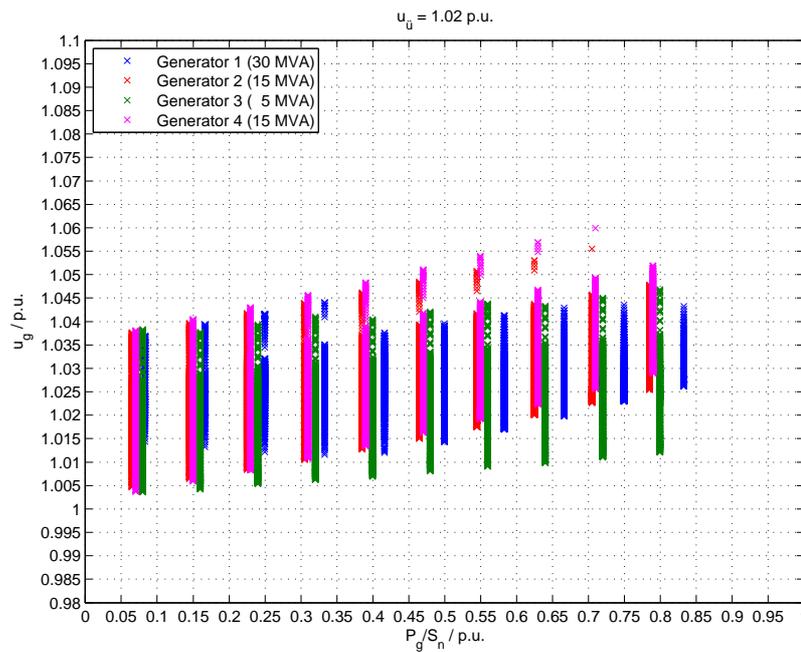


Abbildung 4.33: Spannungen an den Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen ¹

Eingespeiste Blindleistungen der Generatoren

Die Blindleistung des leistungsschwächsten Generators variiert sehr stark, je nach Betriebspunkt der übrigen Erzeugungseinheiten.

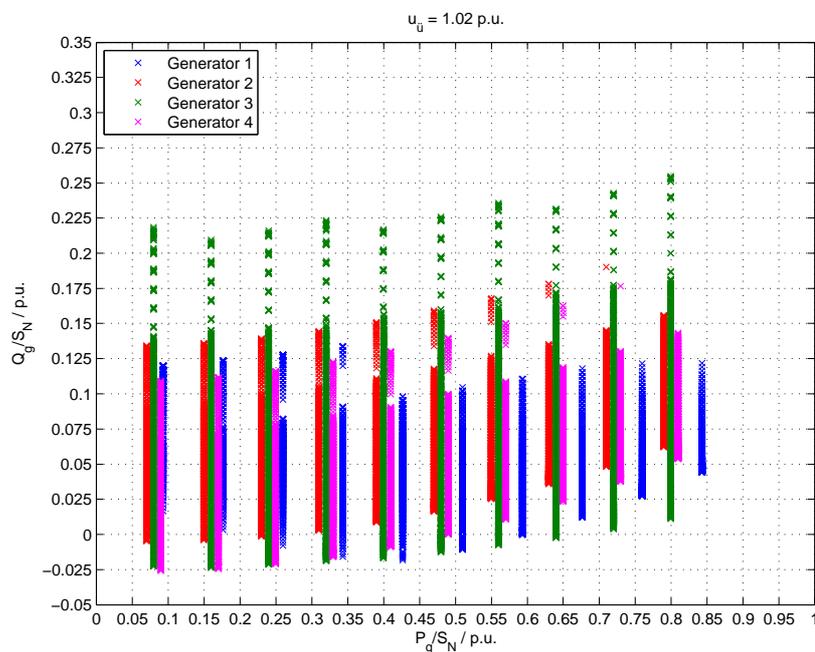


Abbildung 4.34: Blindleistung der Generatoren in Abhängigkeit der Generatorwirkleistung ²

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Der Blindleistungsbezug aus dem übergeordneten Netz wird bei kleinen eingespeisten Wirkleistungen durch die Vorgabe des minimalen Wirkleistungsfaktors am Knoten zum übergeordneten Netz beschränkt.

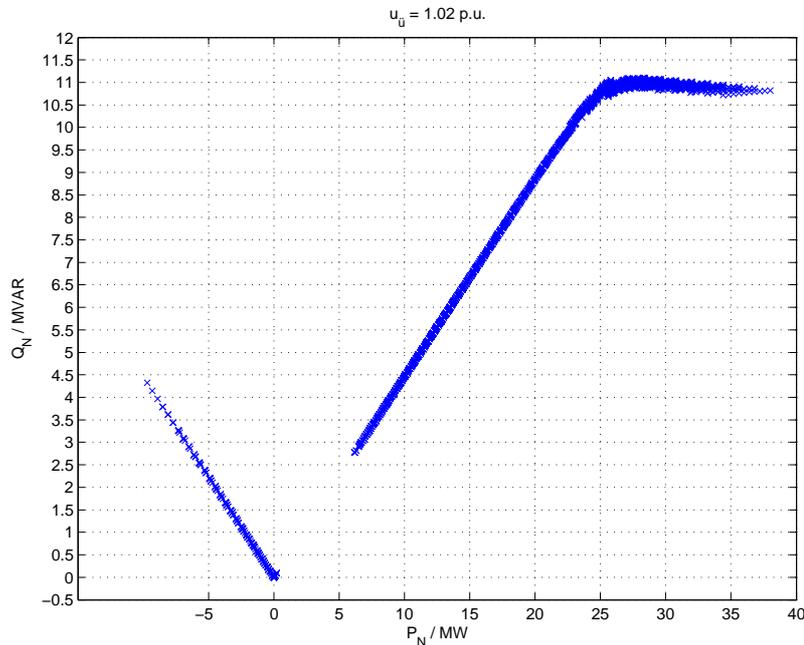


Abbildung 4.35: Blindlastfluss zum übergeordneten Netz

Schlussfolgerungen

Befinden sich Generatoren mit unterschiedlichen Nennleistungen im betrachteten Netzabschnitt, ist zu erkennen, dass sich die Spannungen an den einzelnen Generatoren über einen größeren Bereich, für unterschiedliche Betriebspunkte der restlichen Maschinen, streuen, als im Fall, wenn alle Erzeugungseinheiten eine gleich große Nennleistung aufweisen. Auch die Blindleistung jedes Generators ist stärker von den Arbeitspunkten der anderen Generatoren abhängig.

Der Blindlastfluss am Übergabeknoten (Abbildung 4.35) verhält sich gleich, wie zuvor bei der simulierten Variante mit Generatoren der selben Nennleistung. Bei sehr großer eingespeister Wirkleistung durch die Generatoren, ist es in Hinsicht auf die Verlustleistung günstiger, wenn die Blindleistung der Last zuzüglich des Blindleistungsbedarfs der Transformatoren 1 und 2 aus dem übergeordneten Netz bezogen wird. Den Blindleistungsbedarf des restlichen untergeordneten Netzabschnittes wird von den Generatoren in diesem Netzabschnitt bereitgestellt.

4.4 Reales vermaschtes Netz

In diesem Abschnitt wird das Verhalten der Erzeugungseinheiten in einem realen Netz bei optimierten Lastflüssen untersucht. Als Optimierungsziele sind wieder möglichst kleine Wirkverluste im Netzabschnitt bei möglichst geringem zusätzlichem Erregeraufwand an den Generatoren definiert. Für die optimierenden Lastflussberechnungen wird das Hochspannungsnetz eines Landes, das als Simulationsmodell in Neplan vorliegt, herangezogen. Dabei werden sämtliche Leitungen, die dieses Landesnetz verlassen, abgeschaltet, um es als Insel zu betreiben. Das Neplan Netzmodell muss zuerst für die Lastflussberechnungen in MATPOWER konvertiert werden. Weiters sind an diesem Netz ein paar Modifikationen vorzunehmen. Um die Ständerwicklungsverluste der Generatoren in der Optimierung zu berücksichtigen, wird ein Wirkwiderstand in Serie zu jeder Erzeugungseinheit eingefügt. Eine Netzeinspeisung mit einer Kurzschlussleistung von 20 GW wird an einem 400 kV Umspannwerk hinzugefügt. Zwischen der Sammelschiene im Umspannwerk und der Netzeinspeisung kommt eine kleine Reaktanz $X_{Sh} = 0,0063$ p.u. hinzu, um den Blindlastfluss der Netzeinspeisung gezielt beeinflussen zu können. Für jede Lastflussberechnung werden die Lasten je nach eingespeister Wirkleistung durch die Kraftwerke in diesem Netzabschnitt so skaliert, dass die, in das übergeordnete Netz eingespeiste Wirkleistung, für jede Lastflussberechnung gleich groß ist. Diese gelieferte Wirkleistung wird mit 170 MW angenommen.

An diesem Netz werden 2000 optimierende Lastflüsse berechnet. Für jedes Szenario wird jedem, der 48 im Netz befindlichen Generatoren, zufällig eine zu liefernde Wirkleistung vorgegeben. Wobei die Generatorwirkleistung jeder Maschine zwischen 20 und 90 % der Generatornennleistung liegen soll.

Die Generatorblindleistungen werden in Abhängigkeit der eingespeisten Wirkleistung in Diagrammen dargestellt. Woraus Verhaltensmuster der Erzeugungseinheiten für unterschiedlichste Maschinenarbeitspunkte und bei unterschiedlichen Spannungsniveaus im übergeordneten Netz ausfindig gemacht werden.

Nr	Nennleistung
1	70 MVA
22	275 MVA
23	150 MVA
24	190 MVA
25	360 MVA
40	70 MVA
41	50 MVA
42	62,5 MVA
47	170 MVA
48	170 MVA

Tabelle 4.3: Erzeugungseinheiten mit Nennleistungen, für die die Generatorblindleistungen in Diagrammen dargestellt werden

In der Tabelle 4.4 sind die Knotenimpedanzen der Knoten, an denen die oben angeführten Generatoren einspeisen, ersichtlich. Diese Impedanzen beziehen sich auf die 110 kV Ebene.

Generator	Knotenimpedanz
1	$(6,86 + j 49,87) \Omega$
22	$(0,28 + j 8,93) \Omega$
23	$(0,44 + j 11,39) \Omega$
24	$(0,38 + j 10,97) \Omega$
25	$(0,75 + j 8,67) \Omega$
40	$(6,41 + j 30,00) \Omega$
41	$(2,50 + j 8,13) \Omega$
42	$(2,38 + j 8,13) \Omega$
47	$(0,68 + j 4,39) \Omega$
48	$(1,06 + j 6,25) \Omega$

Tabelle 4.4: Knotenimpedanzen an den Generatoreinspeiseknoten

4.4.1 Spannung am Übergabepunkt $u_{\ddot{u}} < 1$ p.u.

Die Generatorblindleistungen sollen für unterschiedliche Spannungsniveaus im übergeordneten Netz aus verschiedenen Gesichtspunkten untersucht werden. Die folgenden Diagramme zeigen die Blindleistungen der Generatoren bei einer Spannung von $u_{\ddot{u}} = 0,98$ p.u. im überlagerten Netz. Dargestellt sind jeweils die Blindleistungen der zehn leistungsstärksten Erzeugungseinheiten aus dem betrachteten Netzabschnitt.

Eingespeiste Blindleistung der Generatoren

Die Abbildung 4.36 zeigt die Blindleistung der Generatoren mit der größten Nennleistung für die ersten 200 Lastflussberechnungen. Die Nummern in der Legende stehen für die einzelnen Generatoren, wie sie in der Tabelle 4.3 angeführt sind.

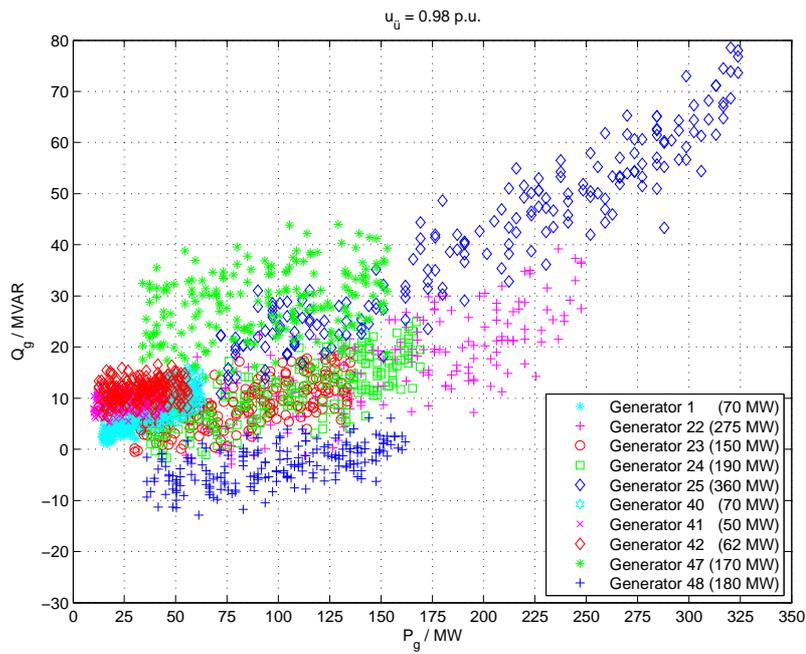


Abbildung 4.36: Blindleistung der Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen

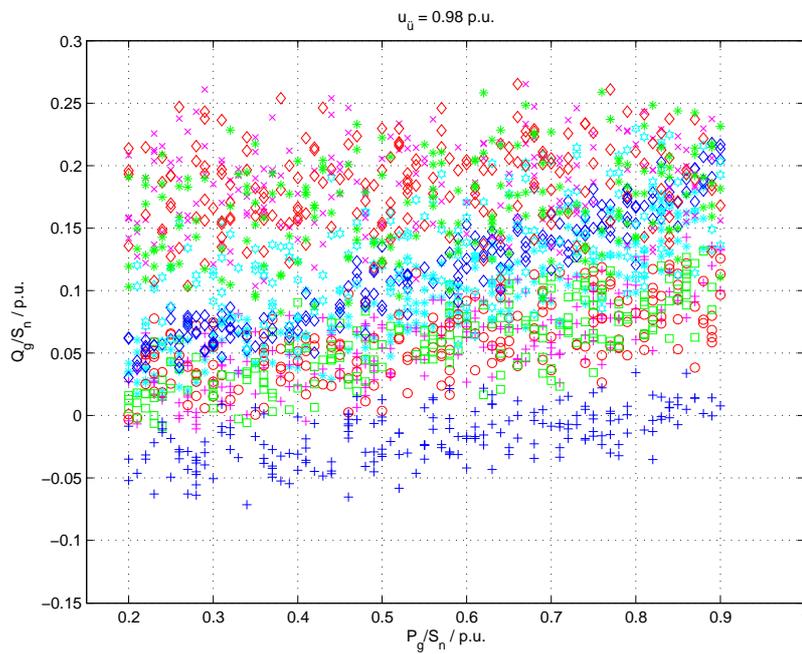


Abbildung 4.37: Blindleistungen der Generatoren bezogen auf die Generatormennleistungen

Blindleistungsaufteilung in Abhängigkeit des Einspeiseortes

Im untenstehenden Diagramm sind die Generatorblindleistungen in Abhängigkeit der ohmschen Anteile der Knotenimpedanzen dargestellt. Bei diesen Simulationen wurden allen zehn leistungsmäßig größten Erzeugungseinheiten eine gleich große Wirkleistung vorgegeben, wobei die zu liefernde Wirkleistung variiert wurde. Die restlichen Generatoren lieferten bei alle drei Simulationen eine Wirkleistung von 80 % der jeweiligen Generator-nennleistung.

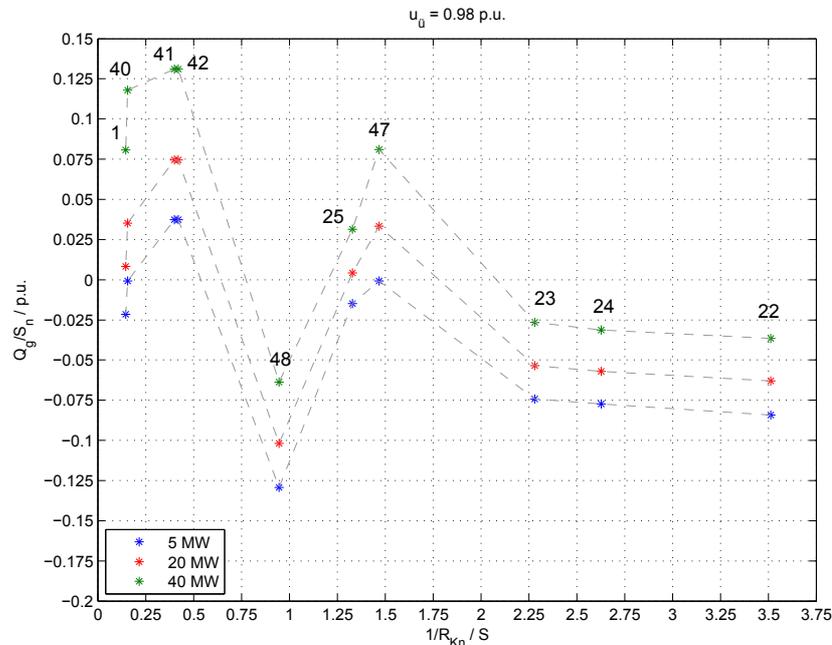


Abbildung 4.38: Generatorblindleistungen in Abhängigkeit der Resistenzen der Knotenimpedanzen

Schlussfolgerungen

In der Abbildung 4.36 ist zu erkennen, dass sich die Generatoren großer Nennleistung sehr stark an der Bereitstellung von Blindleistung beteiligen. Generatoren kleinerer Nennleistungen speisen hingegen bei unterschiedlichen Wirkleistung nahezu stets eine gleich große Blindleistung ein.

Aus der Abbildung 4.38 ist kein Zusammenhang zwischen den Generatorblindleistungen und dem resistiven Anteil der Knotenimpedanz zu erkennen. Es kann jedoch erkannt werden, dass die Generatoren mit der größeren Nennleistung eine kleinere auf die Generatornennleistung bezogene Blindleistung bereitstellen oder sich sogar im untererregten Betriebszustand befinden. Die Maschinen kleinerer Nennleistungen (Generator 1, 40, 41 und 42) speisen bei großer Wirkleistung die größte auf die Nennleistung bezogene Blindleistung ein. Da für die Simulationen angenommen wird, dass die Leerlauferregerleistung linear mit der Generatornennleistung zunimmt, benötigen kleine Generatoren eine geringere Erregerleistung (kleine Erregerverluste) für die Bereitstellung von Blindleistung. Mit

Rücksicht auf die Wirkverluste, die an der Erregereinrichtung an den Generatoren entstehen, ist es günstiger, wenn die Generatoren kleinerer Nennleistungen übererregt betrieben werden und somit Blindleistung einspeisen.

4.4.2 Spannung am Übergabepunkt $u_{\ddot{u}} \geq 1$ p.u.

Zum Vergleich mit den Simulationsergebnissen von vorhin, wird das Verhalten der Generatoren bei einem hohen Spannungsniveau im Netz dargestellt. Die gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf eine Spannung $u_{\ddot{u}} = 1,02$ p.u. im übergeordneten Netz.

Eingespeiste Blindleistung der Generatoren

Bei einer hohen Spannung im übergelagerten Netz speisen die Generatoren weniger Blindleistung, als bei kleinerer Spannung, ein.

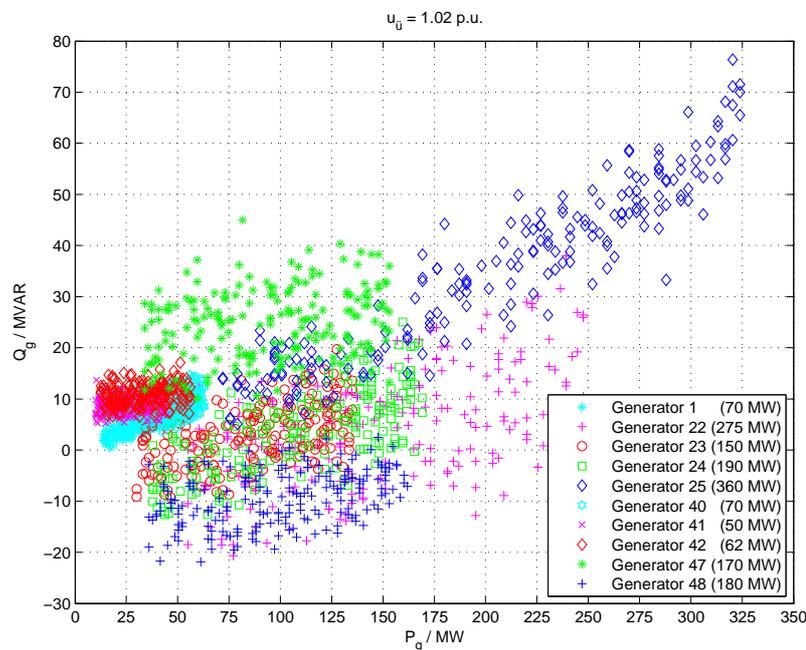


Abbildung 4.39: Blindleistung der Generatoren bei unterschiedlichen eingespeisten Wirkleistungen

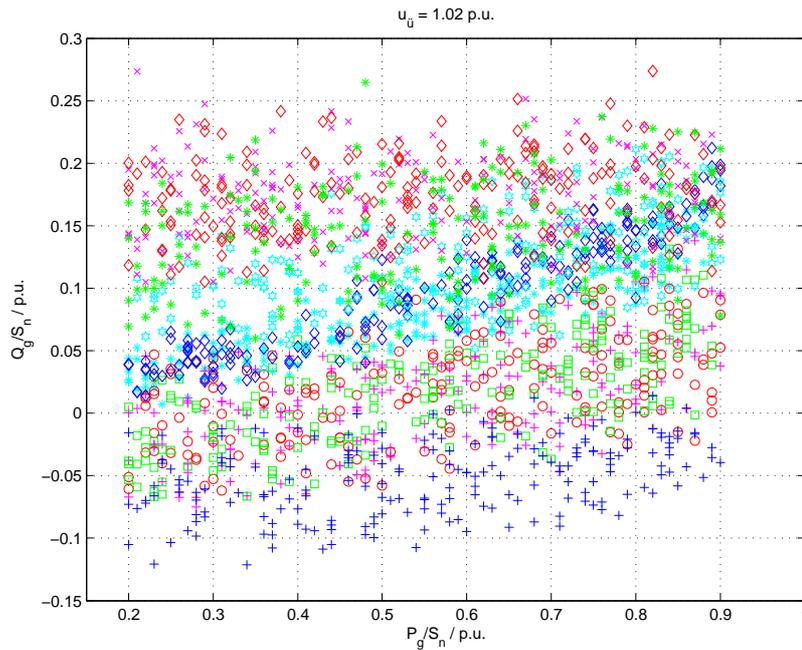


Abbildung 4.40: Blindleistung der Generatoren bezogen auf die Generatornennleistung

Blindleistungsaufteilung in Abhängigkeit des Einspeiseortes

Auch in der Abbildung 4.41 ist zu erkennen, dass die Generatorblindleistungen gegenüber den Simulationen von vorher, abgenommen haben. Es kann kein Schluss vom Realteil der Knotenimpedanz auf die Aufteilung der Blindleistung auf die einzelnen Generatoren gezogen werden.

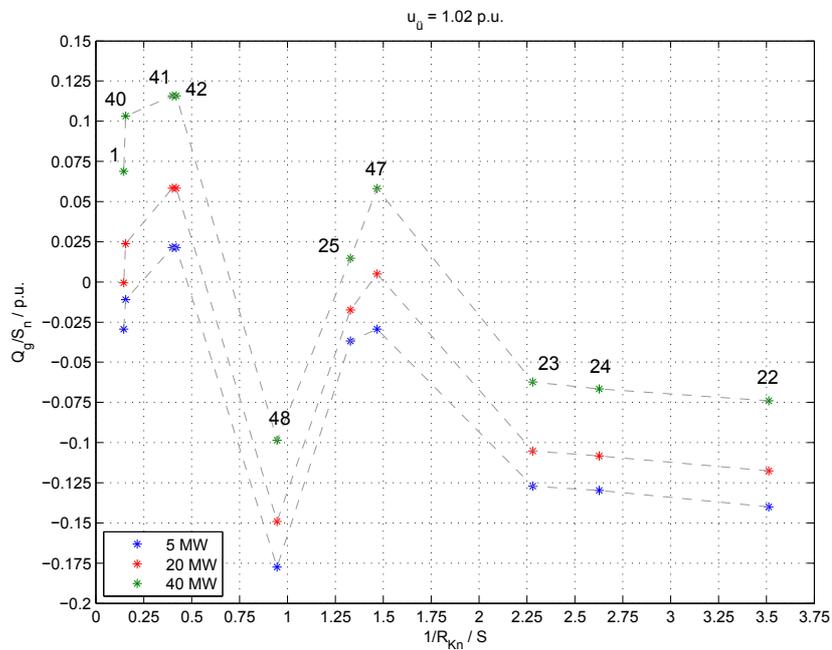


Abbildung 4.41: Generatorblindleistungen in Abhängigkeit der Resistenzen der Knotenimpedanzen

Blindlastfluss am Übergabeknoten

Die in das übergeordnete Netz eingespeiste Wirkleistung beträgt für jede Lastflussberechnung ungefähr 170 MW. Der Blindlastfluss für unterschiedliche Spannungen am Übergabeknoten und unterschiedliche Maschinenarbeitspunkte je Lastflussberechnung ist im Diagramm 4.42 abgebildet. Eine positive Blindleistung am Übergabeknoten bedeutet, dass das übergeordnete Netz Blindleistung in den betrachteten Netzabschnitt einspeist.

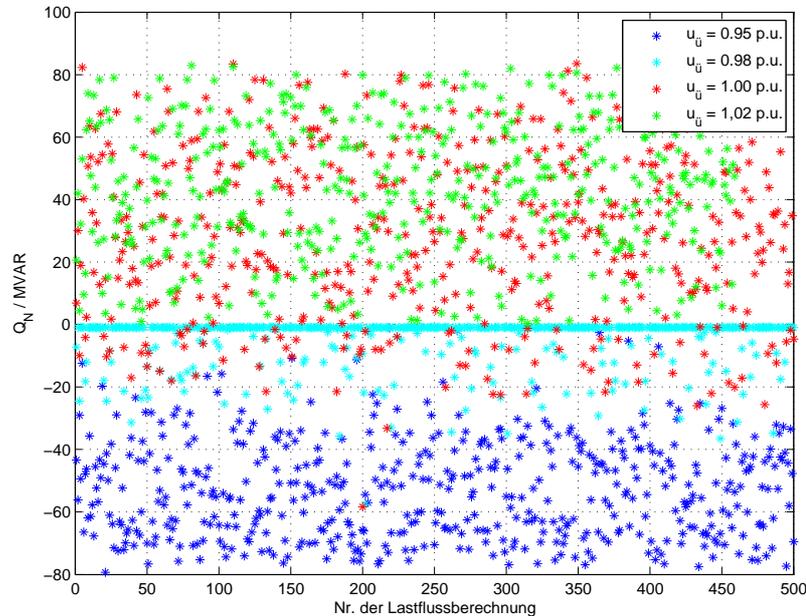


Abbildung 4.42: Blindlastfluss am Übergabeknoten zum übergeordneten Netz

Schlussfolgerungen

Im realen Netz ist auch eine Abnahme der Generatorblindleistungen mit größer werdender Spannung im übergeordneten Netz zu bemerken. Bei hohen Spannungen im übergelagerten Netz ist eine stärkere Abhängigkeit der einzelnen Generatorblindleistungen von den Betriebspunkten der restlichen Generatoren zu sehen, als bei einer Spannung $u_{\bar{u}} < 1$ p.u. am Übergabeknoten.

Aus der Abbildung 4.38 und 4.41 ist ersichtlich, dass die Generatoren großer Nennleistungen bei kleinen eingespeisten Wirkleistungen eher im untererregten Betriebszustand betrieben werden. Die Generatoren kleinerer Nennleistungen hingegen speisen Blindleistung ein. Als Grund, dass die Generatoren mit großen Nennleistungen eher dazu tendieren, Blindleistung zu beziehen, kann die größere Leerlauferregerleistung genannt werden. Da für die Generatoren mit großen Nennleistungen eine größere Erregerleistung für die Blindleistungsbereitstellung benötigt wird, als für Generatoren kleiner Nennleistung, fallen an diesen auch größere Erregerverluste an. Da der Forderung nach möglichst geringen Erregerverlusten nachgekommen werden soll, wird die Erregerleistung an den leistungsmäßig großen Generatoren reduziert, worauf hin sie weniger Blindleistung einspeisen oder sogar Blindleistung beziehen.

Im realen Netz finden sich auch Lösungen für verlustoptimale Lastflüsse, so dass bei sehr kleinen Spannungsniveaus Blindleistung in das übergeordnete Netz eingespeist wird. Nähert sich die Spannung in Richtung $u_{ii} = 1$ p.u., dann wird in den meisten Fällen keine Blindleistung ins übergelagerte Netz eingespeist. Bei einer Spannung von 1 p.u. am Übergabeknoten kommt es eher zu einer Einspeisung von Blindleistung und nur bei sehr wenigen simulierten Szenarien wird beim verlustoptimierten Lastfluss Blindleistung aus dem Netz bezogen. Ist die Spannung im übergelagerten Netz $u_{ii} > 1$ p.u., darf nur Blindleistung aus dem Netz bezogen werden. Wie in der Abbildung 4.42 zu erkennen ist, variiert die ins übergeordnete Netz eingespeiste Blindleistung sehr stark.

5 Gewonnene Erkenntnisse

Über die, aus den Simulationen an den unterschiedlichen Netzen, gewonnenen Erkenntnisse wird hier ein Überblick gegeben. Diese beziehen sich auf die Simulationen, bei denen der Lastfluss hinsichtlich möglichst kleiner Erreger- und Wirkverluste in den betrachteten Netzabschnitten optimiert wurde.

Spannung am Übergabepunkt $u_{\bar{i}} < 1$ p.u.

Im einfachen Strahlennetz ist klar zu erkennen, dass der Generator, der über die kürzeste Leitung (kleinster Zweigwiderstand) an das übergeordnete Netz angebunden ist, am meisten Blindleistung einspeist, wenn alle Generatoren eine gleich große Nennleistung aufweisen. Somit ist es hinsichtlich der Wirkverluste am günstigsten, mehr Blindleistung über den Zweig mit dem kleinsten Widerstand einzuspeisen. Diese Erkenntnis ist auch aus der analytischen Verlustminimierung (2.2) ersichtlich.

Schaut man sich die Generatorblindleistungen im vermaschten Netz in Abhängigkeit des resistiven Anteiles der Knotenimpedanz an, kann man dieselbe Tendenz, wie im Strahlennetz, erkennen. Jener Generator, der in den Knoten mit dem kleinsten Realteil der Knotenimpedanz einspeist, liefert stets mehr Blindleistung als die restlichen Erzeugungseinheiten. Dies gilt nur für den Fall, wenn die Nennleistungen aller Generatoren gleich groß sind. Erhöht man die Nennleistung eines Generators, so ist zu bemerken, dass diese Erzeugungseinheit verglichen zu vorher, eine kleinere auf die Generatornennleistung bezogene Blindleistung einspeist. Da die Leerläuferleistung eines Generators im Allgemeinen mit steigender Nennleistung größer wird, benötigt man für die Bereitstellung von Blindleistung durch einen Generator großer Nennleistung mehr Erregerleistung, als mit einem Generator mit kleiner Nennleistung. Diese höhere Erregerleistung verursacht wiederum zusätzliche Verluste, welche in den Lastflussberechnungen unter anderem optimiert werden. Durch die Optimierung der Erregerverluste tendieren die Generatoren dazu, möglichst wenig Blindleistung einzuspeisen.

Im realen Netz kann kein Zusammenhang zwischen dem Real- bzw. dem Imaginärteil der Knotenimpedanz und der Generatorblindleistung erkannt werden. Werden die Generatorblindleistungen auf die Generatornennleistungen bezogen, ist zu bemerken, dass Generatoren großer Nennleistungen eher eine geringere relative Blindleistung liefern, oder sich bei kleiner eingespeister Wirkleistung sogar im untererregten Betriebszustand befinden.

Zum Blindlastfluss ins übergeordnete Netz kann gesagt werden, dass es nach den Simulationsergebnissen an den einfachen Beispielnetzen bei optimierten Lastflüssen zu keiner Blindleistungseinspeisung in das übergeordnete Netz kommt. Betrachtet man das reale Netz, so wird bei sehr geringen Spannungen am Übergabeknoten und verlust-

optimierten Lastfluss, Blindleistung in das übergelagerte Netz eingespeist. Das heißt, bei kleinen Spannungen im übergeordneten Netz kann die Blindleistung optimal auf die Generatoren in diesem Netzabschnitt aufgeteilt werden, dass die gesamten Wirkverluste minimal sind. Bei einer Spannung in der Nähe von 1 p.u. kommt es im optimalen Lastfluss zu keiner Lieferung von Blindleistung in das übergeordnete Netz, wobei jedoch Blindleistung für eine Spannungsstützung benötigt werden würde.

Spannung am Übergabepunkt $u_{ij} > 1$ p.u.

Bei höheren Spannungsniveaus im übergeordneten Netz wird bei den einfachen Netzen bei optimalem Lastfluss möglichst viel Blindleistung, begrenzt durch die Wirkleistungsfaktorvorgabe am Übergabeknoten, aus dem übergeordneten Netz bezogen. Bei großer eingespeister Wirkleistung durch die Kraftwerke wird die Blindleistung der Last aus dem übergeordneten Netz bezogen. Der Blindleistungsbedarf im betrachteten Netzabschnitt wird von den Erzeugungseinheiten geliefert.

Aus den Simulationsergebnissen der einfachen, kleinen Netze ist zu erkennen, dass die jeweilige Generatorblindleistung sehr stark von den Betriebspunkten der restlichen Generatoren abhängt. Solange zu wenig Blindleistung aus dem übergeordneten Netz bezogen werden kann, liefert der Generator, der in den Zweig mit dem kleinsten Widerstand bzw. in den Knoten mit dem kleinsten Realteil der Knotenimpedanz einspeist, die größte Blindleistung. Wird bei großen Generatorwirkleistungen die gesamte Blindleistung der Last aus dem übergeordneten Netz bezogen, so decken die Kraftwerke nur mehr den Blindleistungsbedarf des Netzabschnittes. Dann wird die gelieferte Blindleistung jenes Generators, der über den Zweig mit dem kleinsten Widerstand angebunden ist, beträchtlich kleiner. Sieht man sich die Ergebnisse der Berechnungen am realen Netz an, kann man keinen Zusammenhang zwischen dem Realteil der Knotenimpedanz und der eingespeisten Blindleistung erkennen, da nicht nur die Wirkverluste im Netzabschnitt sondern auch die Erregerverluste an den Maschinen für die Optimierung eine Rolle spielen. Wie schon erwähnt, hängen die Verluste der Erregereinheiten mit der Generatornennleistung zusammen. Es konnte festgestellt werden, dass die Nennleistung der Erzeugungseinheiten einen Einfluss auf die Generatorblindleistung beim optimierten Lastfluss hat.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Renner, *Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme*. Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2013.
- [2] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, *Matpower 4.1*, 2011.
- [3] R. Fischer, *Elektrische Maschinen*. Hanser, 2011.
- [4] H. Renner, M. Sakulin, *Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit*. Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2008.

A Lastflussberechnungen in Matlab

A.1 Berechnung optimierender Lastflüsse mit MATPOWER

```
1 %% cos(phi) am Slack von 0.9 - 1
2 % für U_Slack > 1 p.u.
3
4 %%
5 clear all
6 clc
7 %%
8
9 % Generatoren
10 % Nennscheinleistung
11 S_gen = [15];
12 % maximale Wirkleistung
13 P_gen = [12];
14
15 P_f = [S_gen * 0.0015]; % in MW
16
17 % Slack
18 %u = [0.9 0.95 1 1.05 1.1];
19 u = [1.01:0.01:1.05 1.1];
20
21 % Shunt vor Slack
22 x_sh = 0.023; % x_Trafo = 0.0458 p.u.
23
24 % Lastflussoptimierung
25 % 1 - P Erzeugungskosten Slack & Q Erzeugungskosten Generator
26 % 2 - P Erzeugungskosten Slack
27 % 3 - Q Erzeugungskosten Generator
28 % 4 - keine Erzeugungskosten
29 lf_opt = 1;
30
31 %% Last
32 % Wirkleistung
33 P_Last = 5; % MVA
34 % Blindleistung
35 Q_Last = 5; % MVar
36
37 %%
38 filename1 = 'C:\Users\pc-user\Documents\Hygricon\R_Gen_alle_Berechnungen\...
39 04_Strahlennetz\mit_Blindleistungserzeugungskosten';
40
41 %% Generatorwirkleistungen
42 p_intervall = [0.1:0.1:1]';
43 P1 = p_intervall * P_gen;
44
45 %%
46 r = 1;
47
48 c_phi = 0.9;
49
50 for l1 = 1:length(u) % Spannung am Slack
51     u_slack = u(l1);
52
53     for l3 = 1:length(p_intervall) % P Gen_1
54         S_g_1 = S_gen;
55         Pf_1 = P_f;
56         P_g_1 = P1(l3);
57
58     for l4 = 1:length(p_intervall) % P Gen_2
59         P_g_2 = P1(l4);
60
61     for l5 = 1:length(p_intervall) % P Gen_3
62         P_g_3 = P1(l5);
63
64     for l6 = 1:length(p_intervall) % P Gen_4
65         P_g_4 = P1(l6);
66
67     P_slack = P_g_1 + P_g_2 + P_g_3 + P_g_4 - P_Last;
```

```

74
75         if P_slack < 0
76
77             q_slack = P_slack * tan(acos(c_phi));
78
79         else
80
81             q_slack = P_slack * -tan(acos(c_phi));
82
83         end
84
85         delta_u = q_slack / -4750;
86
87         % Spannungsgrenzen für Knoten 2 (Shunt vor Trafo 1)
88         u_shunt_max = u_slack; % + delta_u;
89         u_shunt_min = u_slack - delta_u;
90
91
92         mpc = testnetz_2_shunt_Trafo_LL_Verluste;
93         opt = mpooption;
94         opt(1) = 1; % AC power flow alforithm: 1 - Newton, ...
95         opt(10) = 0; % 0 - AC power flow; 1 - DC power flow
96
97         % optimierende Lastflussberechnung
98         results(1,16) = opf(mpc,opt);
99
100        end
101
102        for l7 = 1:length(results(1,:))
103            % Wirkleistungsfaktor an der Übergabestelle
104            cos_phi = abs(cos(atan(results(1,17).branch(1,15) / results(1,17).branch(1,14))));
105
106            if results(1,17).success == 1 & cos_phi >= 0.9
107
108                %
109                % P
110                % Q
111                P_Q_Gen.Gen1(r,:) = [results(1,17).branch(11,14) results(1,17).branch(11,15)];
112                P_Q_Gen.Gen2(r,:) = [results(1,17).branch(12,14) results(1,17).branch(12,15)];
113                P_Q_Gen.Gen3(r,:) = [results(1,17).branch(13,14) results(1,17).branch(13,15)];
114                P_Q_Gen.Gen4(r,:) = [results(1,17).branch(14,14) results(1,17).branch(14,15)];
115
116                P_Q_Gen.Q_slack(r,:) = results(1,17).branch(1,15);
117
118                P_Q_Gen.cos_phi_slack(r,:) = cos(atan(results(1,17).branch(1,15) / ...
119                results(1,17).branch(1,14)));
120
121                [n,m] = size(P_Q_Gen.Gen1);
122                r = n + 1;
123
124            end
125
126            cos_phi_dir = [filename1,'u_',num2str(u(11))];
127
128            folder_exist = exist(cos_phi_dir);
129
130            if folder_exist ~= 7
131
132                mkdir(cos_phi_dir);
133
134            end
135            % Speichern der Simulationsdaten
136            filename2 = [filename1,'u_',num2str(u(11)),'\',...
137            num2str(P_g_1),'_',num2str(P_g_2),'_',num2str(P_g_3),'.mat'];
138            save(filename2,'results');
139
140        end
141
142        clear results;
143
144    end
145
146    end
147
148    ex = exist('P_Q_Gen','var');
149
150    if ex == 1
151
152        filename3 = [filename1,'U_Slack_',num2str(u(11)),'.mat'];
153        save(filename3,'P_Q_Gen');
154
155    end
156
157    if exist('P_Q_Gen')
158
159        P_Q_Gen.cos_phi_slack;
160
161    end
162
163    clear P_Q_Gen;
164    r = 1;
165
166 end

```

A.2 Daten der Betriebsmittel

```

1 %% Last
2 % Wirkleistung
3 P_L = evalin('base','P_Last');
4 % Blindleistung
5 Q_L = evalin('base','Q_Last');
6
7
8 %% Slack
9 % Spannung
10 vmin_slack = evalin('base','u_slack');
11 vmax_slack = vmin_slack;
12
13 % Leistungen
14 P_min_s = -2000; % MVA
15 P_max_s = 2000; % MVA
16 Q_min_s = -2000; % MVA
17 Q_max_s = 2000; % MVA
18
19 % Shungt vor Trafo 1
20 x_shunt = evalin('base','x_sh');
21 vmax_shunt = evalin('base','u_shunt_max');
22 vmin_shunt = evalin('base','u_shunt_min');
23
24 %% Optimierungsoption
25 optimierung = evalin('base','lf_opt');
26
27 %% Generatoren
28 % Generator 1
29 S_N_g1 = evalin('base','S_g_1'); % MVA
30 P_1 = evalin('base','P_g_1'); % MW Wirkleistungsvorgabe
31 P_min_g1 = P_1; % MVA
32 P_max_g1 = P_1; % MVA
33 [Q_min_g1,Q_max_g1] = q_grenzen(P_1/S_N_g1); % p.u.
34 Q_min_g1 = Q_min_g1 * S_N_g1;
35 Q_max_g1 = Q_max_g1 * S_N_g1; % MVAR
36 % Ständerwiderstand
37 r_g1 = 0.0025 * 100 / S_N_g1; % p.u.
38 x_d_g1 = 1.8; % gesättigt p.u.
39 % Transiente Leerlaufzeitkonstante
40 % T_d0_g1_ = ;
41 % Erregerleistung
42 %U_f0_g1 = 75; % V
43 %I_f0_g1 = 1500; % A
44
45 % Generator 2
46 S_N_g2 = S_N_g1; % MVA
47 P_2 = evalin('base','P_g_2'); % MW Wirkleistungsvorgabe
48 P_min_g2 = P_2; % MVA
49 P_max_g2 = P_2; % MVA
50 [Q_min_g2,Q_max_g2] = q_grenzen(P_2/S_N_g2); % p.u.
51 Q_min_g2 = Q_min_g2 * S_N_g2;
52 Q_max_g2 = Q_max_g2 * S_N_g2; % MVAR
53 % Ständerwiderstand
54 r_g2 = r_g1; % p.u.
55 x_d_g2 = x_d_g1; % p.u.
56 % Transiente Leerlaufzeitkonstante
57 % T_d0_g2_ = ;
58 % Erregerleistung
59 %U_f0_g2 = U_f0_g1; % V
60 %I_f0_g2 = I_f0_g1; % A
61
62 % Generator 3
63 S_N_g3 = S_N_g1; % MVA
64 P_3 = evalin('base','P_g_3'); % MW Wirkleistungsvorgabe
65 P_min_g3 = P_3; % MVA
66 P_max_g3 = P_3; % MVA
67 [Q_min_g3,Q_max_g3] = q_grenzen(P_3/S_N_g3); % p.u.
68 Q_min_g3 = Q_min_g3 * S_N_g3;
69 Q_max_g3 = Q_max_g3 * S_N_g3; % MVAR
70 % Ständerwiderstand
71 r_g3 = r_g1; % p.u.
72 x_d_g3 = x_d_g1; % p.u.
73 % Transiente Leerlaufzeitkonstante
74 % T_d0_g3_ = ;
75 % Erregerleistung
76 %U_f0_g3 = U_f0_g1; % V
77 %I_f0_g3 = I_f0_g1; % A
78
79 % Generator 4
80 S_N_g4 = S_N_g1; % MVA
81 P_4 = evalin('base','P_g_4'); % MW Wirkleistungsvorgabe
82 P_min_g4 = P_4; % MVA
83 P_max_g4 = P_4; % MVA
84 [Q_min_g4,Q_max_g4] = q_grenzen(P_4/S_N_g4); % p.u.
85 Q_min_g4 = Q_min_g4 * S_N_g4;
86 Q_max_g4 = Q_max_g4 * S_N_g4; % MVAR
87 r_g4 = r_g1; % p.u.
88 x_d_g4 = x_d_g1; % p.u.
89 % Transiente Leerlaufzeitkonstante
90 % T_d0_g4_ = ;
91 % Erregerleistung
92 %U_f0_g4 = U_f0_g1; % V

```

```

93 %I_f0_g4 = I_f0_g1; % A
94
95
96 %% zusätzliche Kosten für Blindleistungsbereitstellung
97 % Kosten Verlustleistung
98 ap_1 = 50; % MWh für Blindleistung
99 ap_2 = 50; % MWh für Wirkleistung
100
101 % Generator 1
102 % P_f0 aus U und I
103 P_f0_g1 = evalin('base','Pf_1');%U_f0_g1 * I_f0_g1 / 10^6;
104 % P_f0 aus T_d0' und x_d, gesättigt
105 % P_f0_g1 = S_N_g1 / (0.81 * x_d_satt_g1 * 100 * pi * T_d0_g1_);
106
107 aq_0_g1 = P_f0_g1 * ap_1;
108 aq_1_g1 = P_f0_g1 * ap_1 * 2 * x_d_g1 / S_N_g1;
109 aq_2_g1 = P_f0_g1 * ap_1 * x_d_g1^2 / S_N_g1^2;
110
111 % Generator 2
112 % P_f0 aus U und I
113 P_f0_g2 = P_f0_g1;%U_f0_g2 * I_f0_g2 / 10^6;
114 % P_f0 aus T_d0' und x_d, gesättigt
115 % P_f0_g2 = S_N_g2 / (0.81 * x_d_satt_g2 * 100 * pi * T_d0_g2_ * 10^6);
116
117 aq_0_g2 = P_f0_g2 * ap_1;
118 aq_1_g2 = P_f0_g2 * ap_1 * 2 * x_d_g2 / S_N_g2;
119 aq_2_g2 = P_f0_g2 * ap_1 * x_d_g2^2 / S_N_g2^2;
120
121 % Generator 3
122 % P_f0 aus U und I
123 P_f0_g3 = P_f0_g1;%U_f0_g3 * I_f0_g3 / 10^6;
124 % P_f0 aus T_d0' und x_d, gesättigt
125 % P_f0_g3 = S_N_g3 / (0.81 * x_d_satt_g3 * 100 * pi * T_d0_g3_ * 10^6);
126
127 aq_0_g3 = P_f0_g3 * ap_1;
128 aq_1_g3 = P_f0_g3 * ap_1 * 2 * x_d_g3 / S_N_g3;
129 aq_2_g3 = P_f0_g3 * ap_1 * x_d_g3^2 / S_N_g3^2;
130
131 % Generator 4
132 % P_f0 aus U und I
133 P_f0_g4 = P_f0_g1;%U_f0_g4 * I_f0_g4 / 10^6;
134 % P_f0 aus T_d0' und x_d, gesättigt
135 % P_f0_g4 = S_N_g4 / (0.81 * x_d_satt_g4 * 100 * pi * T_d0_g4_ * 10^6);
136
137 aq_0_g4 = P_f0_g4 * ap_1;
138 aq_1_g4 = P_f0_g4 * ap_1 * 2 * x_d_g4 / S_N_g4;
139 aq_2_g4 = P_f0_g4 * ap_1 * x_d_g4^2 / S_N_g4^2;

```

A.3 Netzabschnitt in MATPOWER

```

1 function mpc = testnetz_2_shunt_Trafo_LL_Verluste
2 %%
3
4 run('Daten_testnetz_2');
5
6 %% MATPOWER Case Format : Version 2
7 mpc.version = '2';
8
9 %%----- Power Flow Data -----%%
10 %% system MVA base
11 mpc.baseMVA = 100;
12
13 %% bus data
14 % bus type: 1 - Load (PQ); 2 - Generator (PV); 3 - Swinging bus (Slack); 4 - Isolated bus
15 % Pd - load active power (MW); Qd - Load reactive power (MVar);
16 % Gs - Shunt conductance (MW at 1.0 per unit voltage);
17 % Bs - Shunt susceptance, MVAR at 1.0 per unit voltage. (- = reactor)
18 % Vm - voltage magnitude (p.u.); Va - voltage angle (degree);
19 % baseKV - base voltage (KV);
20 % Vmax - max. voltage (p.u.); Vmin - min voltage (p.u.)
21 %
22 % Leerlaufverluste - Trafos
23 % 200 MVA: 0.2% = 400 kVA
24 % 15 MVA: 0.05% = 7.5 KVA % bei U = 1 p.u.
25 %
26 % SLACKKNOTEN
27 mpc.bus = [
28 % bus_number type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
29 1 3 0 0 0 1 1 0 50 1 vmax_slack vmin_slack;
30 % Lastknoten
31 % Shunt vor Trafo 1
32 2 1 0 0 0 0 1 1 0 50 1 vmax_shunt vmin_shunt;
33 3 1 P_L Q_L 0.4 0 1 1 0 50 2 1.1 0.9; % SS2
34 4 1 0 0 7.5e-3 0 1 1 0 50 2 1.1 0.9; % TR_GEN1
35 5 1 0 0 7.5e-3 0 1 1 0 50 2 1.1 0.9; % TR_GEN2
36 6 1 0 0 7.5e-3 0 1 1 0 50 2 1.1 0.9; % TR_GEN3
37 7 1 0 0 7.5e-3 0 1 1 0 50 2 1.1 0.9; % TR_GEN4
38 % Generatorknoten
39 8 1 0 0 0 0 1 1 0 15 2 1.1 0.9; % Verluste Generator 1

```

```

40     9         1         0 0 0 0 1         1 0 15         2         1.1 0.9; % Verluste Generator 2
41     10        1         0 0 0 0 1         1 0 15         2         1.1 0.9; % Verluste Generator 3
42     11        1         0 0 0 0 1         1 0 15         2         1.1 0.9; % Verluste Generator 4
43 % Verluste Generatoren
44     12        1         0 0 0 0 0 1         1 0 15         2         1.1 0.9; % Generator 1
45     13        1         0 0 0 0 0 1         1 0 15         2         1.1 0.9; % Generator 2
46     14        1         0 0 0 0 0 1         1 0 15         2         1.1 0.9; % Generator 3
47     15        1         0 0 0 0 0 1         1 0 15         2         1.1 0.9; % Generator 4
48 ];
49
50
51 %% generator data
52 % Pg - active power output (MW); Qg - reactive power output (MVar);
53 % Qmax - max reactive power (MVar); Qmin - min reactive power (MVar);
54 % Vg - voltage magnitude setpoint (p.u.);
55 % mBase - MVA base of machine;
56 % status - machine status: 1 - in service, 0 - out of service;
57 % Pmax - max active power (MW); Pmin - min active power (MW);
58 % Pc1 - lower real power output of PQ capability curve (MW);
59 % Pc2 - upper real power output of PQ capability curve (MW);
60 % Qcmin - minimum reactive power output at Pcx (MVar);
61 % Qcmax - maximum reactive power output at Pcx (MVar);
62 % ramp_agc - ramp rate for load following/AGC (MW/min);
63 % ramp_10 - ramp rate for 10 minute reserves (MW);
64 % ramp_q - ramp rate for reactive power (2 sec timescale) (MVar/min);
65 % apf - area participation (Beteiligung) factor;
66 mpc.gen = [
67 % SLACKKNOTEN
68 % bus number Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qcmin
69 % Qcimax Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
70 1 0 0 Q_max_s Q_min_s 1 100 1 P_max_s P_min_s 0 0 0
71 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
72 % Generatoren 1-4
73 12 0 0 Q_max_g1 Q_min_g1 1 100 1 P_max_g1 P_min_g1 0 0 0
74 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; % Generator 1
75 13 0 0 Q_max_g2 Q_min_g2 1 100 1 P_max_g2 P_min_g2 0 0 0
76 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; % Generator 2
77 14 0 0 Q_max_g3 Q_min_g3 1 100 1 P_max_g3 P_min_g3 0 0 0
78 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; % Generator 3
79 15 0 0 Q_max_g4 Q_min_g4 1 100 1 P_max_g4 P_min_g4 0 0 0
80 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; % Generator 4
81 ];
82
83
84
85
86 %% branch data
87 % fbus - from bus, tbus - to bus;
88 % r - Resistance (p.u.); x - Reactance (p.u.);
89 % b - total line charging susceptance (p.u.);
90 % rateA - MVA rating A (long term rating);
91 % rateB - MVA rating B (short term rating);
92 % rateC - MVA rating C (emergency rating);
93 % ratio - Transformer off nominal turns ratio;
94 % angle - Transformer phase shift angle;
95 % status - branch status: 1 - in service, 2 - out of service;
96 % angmin / angmax - min / max angle difference;
97 mpc.branch = [
98 % fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status angmin angmax
99 % Shunt vor Trafo 1
100 2 1 0 x_shunt 0 2000 2000 2000 0 0 1 -360 360;
101 % Trafo 1
102 3 2 0.02 0.0458 0 2000 2000 2000 0 0 1 -360 360;
103 % Leitung 1
104 4 3 0.16 0.64 3.14e-3 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
105 % Leitung 2
106 5 3 0.04 0.16 7.85e-4 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
107 % Leitung 3
108 6 3 0.24 0.96 4.71e-3 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
109 % Leitung 4
110 7 3 0.32 1.28 6.28e-3 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
111 % TR_GEN1
112 8 4 0.05 0.513 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
113 % TR_GEN2
114 9 5 0.05 0.513 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
115 % TR_GEN3
116 10 6 0.05 0.513 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
117 % TR_GEN4
118 11 7 0.05 0.513 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
119 % % Verluste Generatoren
120 12 8 r_g1 0 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
121 13 9 r_g2 0 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
122 14 10 r_g3 0 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
123 15 11 r_g4 0 0 1500 1500 1500 0 0 1 -360 360;
124 ];
125
126
127
128 %% generator cost data
129 % 1 startup shutdown n x1 y1 ... xn yn
130 % 2 startup shutdown n c(n-1) ... c0
131 % Erzeugungskosten für Blind- / Wirkleistung
132
133 mpc.gencost = [
134 % Costs of P
135 2 0 0 3 0 ap_2 0 ;

```

```

136 2 0 0 3 0 0 0 ;
137 2 0 0 3 0 0 0 ;
138 2 0 0 3 0 0 0 ;
139 2 0 0 3 0 0 0 ;
140 % Costs of Q
141 2 0 0 3 0 0 0 ;
142 2 0 0 3 aq_2_g1 aq_1_g1 aq_0_g1;
143 2 0 0 3 aq_2_g2 aq_1_g2 aq_0_g2;
144 2 0 0 3 aq_2_g3 aq_1_g3 aq_0_g3;
145 2 0 0 3 aq_2_g4 aq_1_g4 aq_0_g4;
146 ];

```

A.4 Blindleistungsgrenzen der Generatoren

```

1 %%
2 %
3 %
4 %%
5 % Ermitteln der oberen und unteren Grenze der Blindleistungserzeugung
6 %
7 % [q_min,q_max] = q_grenzen(p)
8 %
9 % p.....gegebene Wirkleistung in p.u. (p <= 0.9 !!!)
10 % q_min...untere Blindleistungsgrenze zu p in p.u.
11 % q_max...obere Blindleistungsgrenze zu p in p.u.
12
13 %%
14 function [q_min,q_max] = q_grenzen(p)
15
16 % P-Q-Kennlinie der Synchronmaschine (Skript Regelung und Stabilität Kap. 2.3)
17 P = [0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0];
18 % Q_min = [-0.433 -0.46 -0.483 -0.51 -0.54 -0.592 -0.642 -0.7 -0.667 -0.65]; % u = 0.92 p.u.
19 Q_min = [-0.433 -0.6 -0.63 -0.667 -0.7 -0.75 -0.79 -0.867 -0.8 -0.792];
20 Q_max = [0.43 0.492 0.542 0.583 0.617 0.642 0.667 0.683 0.692 0.696];
21
22 xq = 0:0.001:0.9;
23
24 Q_min_interp = interp1(P,Q_min,xq,'pchip');
25 Q_max_interp = interp1(P,Q_max,xq,'pchip');
26
27 if p <= 0.9
28     [n] = min(abs(xq - p));
29
30     q_min = Q_min_interp(n);
31     q_max = Q_max_interp(n);
32 else
33     error('P des Generators max 0.9 p.u. (0 <= p <= 0.9)')
34 end

```