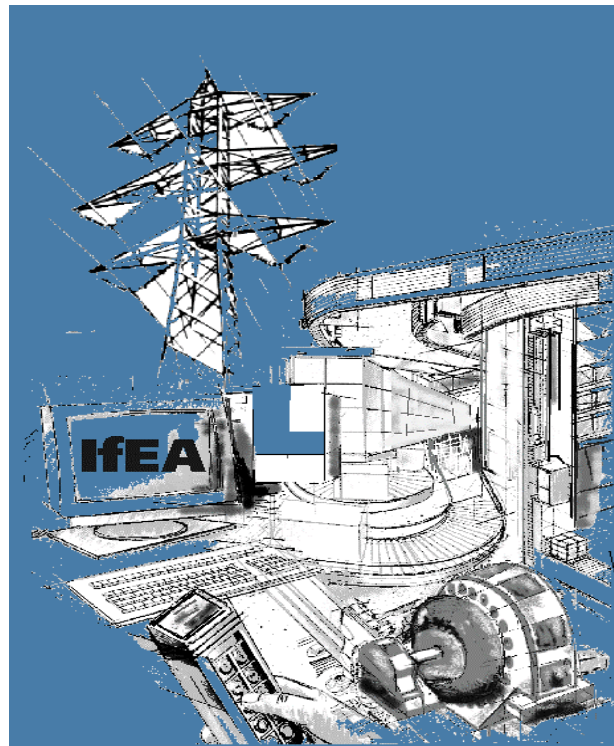


Laborleiter: Prof. Dr.-Ing. M. Könemund		
Versuchsbetreuung: Dipl.-Ing. Gerald Hiller		
Versuch-Nr. 1: Untersuchungen an einer elektrisch langen Leitung, Lastflusssteuerung über einen Quer-Regeltrafo (220-kV-Modellanlage, Raum L 015)	Testat:	Note:
Versuchsdatum:	Abgabedatum:	Laborgruppen-Nr:
Ausgearbeitet von:		
Mitarbeiter:		

Labor für Elektroenergiesysteme





1. Einführung

In diesem Versuch soll das Verhalten einer elektrisch langen Leitung hinsichtlich ihres zur Kompensation notwendigen Blindleistungsbedarfs untersucht werden. Dabei wird die elektrische Leitung durch ein speisendes Kraftwerk, welches in verschiedenen Betriebszuständen zunehmend Wirkleistung abgibt, belastet, wobei der Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ und die Spannung U_2 an der Abnahmestelle konstant gehalten werden. Mit zunehmender eingespeister Wirkleistung P_1 durch das Kraftwerk wird der Blindleistungsbedarf Q_1 geringer und der Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ geht von kapazitivem- zu induktivem Verhalten über. Dieses Übergangsverhalten, bei dem Q_1 ein Minimum annimmt, stellt für das Kraftwerk und die jeweilige elektrische Leitung an der Einspeisestelle ein Optimum dar.

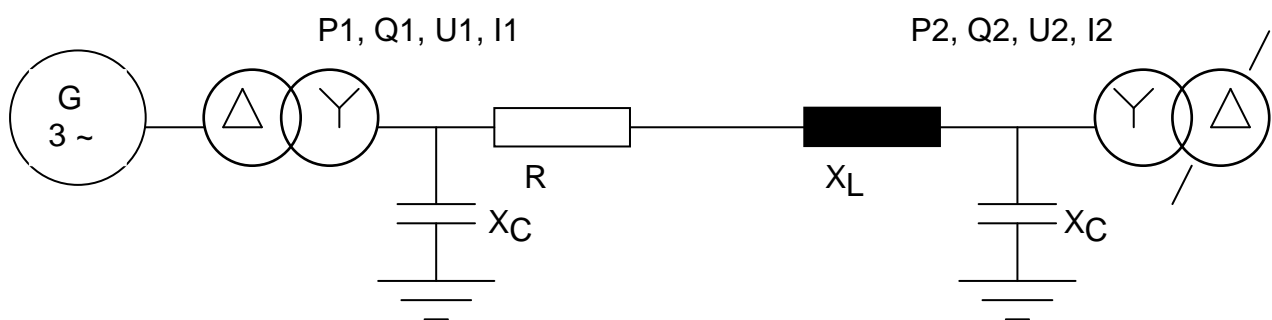


Bild 1: Prinzip der elektrischen Energieübertragung

2. Modellanlage

Mit der Modellanlage für Netz- und Kraftwerkstechnik können elektrische Netze mit der Nennspannung 220 kV nachgebildet werden. Die Anlage besteht im Wesentlichen aus zwei Kraftwerksblöcken, zwei Sammelschienenfeldern, zwölf Leitungsnachbildungen, einem Übergabefeld und einem Belastungsfeld. Die Kraftwerksblöcke sind mit Generator-schutzeinrichtungen ausgestattet. In den Sammelschienenfeldern werden die Abgänge zu den Leitungsnachbildungen durch Überstromzeit- bzw. Distanzschutzrelais überwacht.

2.1 Modellfaktoren

Spannung
$$\mu_U = \frac{U_{Natur}}{U_{Modell}} = \frac{220kV}{220V} = 10^3$$

Strom
$$\mu_I = \frac{I_{Natur}}{I_{Modell}} = \frac{422A}{4,22A} = 10^2$$



Impedanz $\mu_z = \frac{Z_{Natur}}{Z_{Modell}} = \frac{\mu_U}{\mu_I} = 10$

Leistung $\mu_p = \frac{S_{Natur}}{S_{Modell}} = \mu_U * \mu_I = 10^5$

2.2 Kraftwerksblöcke

Die Kraftwerksblöcke bestehen aus Gleichstrommotor (Nachbildung der Turbine), Erregermaschine, Synchrongenerator und Transformator (Bild 2).

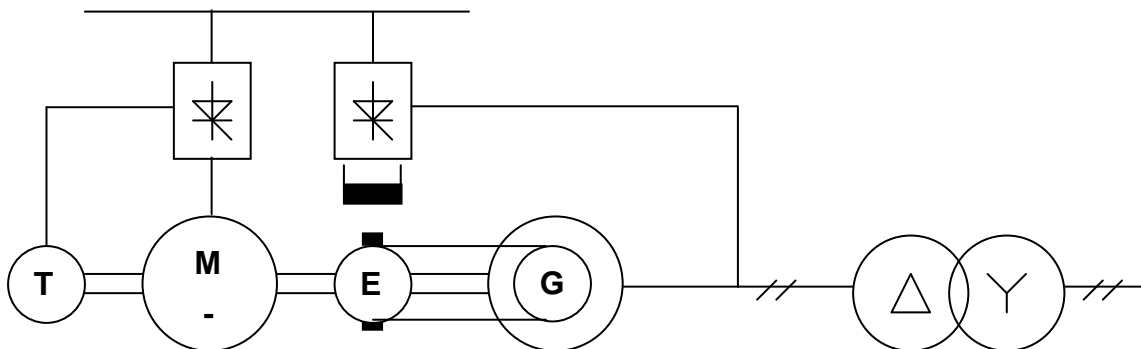


Bild 2: Blockschaltbild des Kraftwerkes

Die Drehzahl der Gleichstrommaschine wird mit Hilfe eines Motorregelgerätes verändert. Die Drehzahländerung ist grob („Sollwert Antriebsmaschine“) und fein („Statischer Betrieb“) einstellbar. Beim Betrieb eines Blockes am Netz oder bei Parallelbetrieb beider Blöcke sollte grundsätzlich nur die Feinverstellung benutzt werden. Die Erregerspannung für den Synchrongenerator kann geregelt oder ungeregt eingestellt werden. Die Synchronmaschine bildet einen Turbogenerator mit folgenden Daten nach:

	<u>Modellwerte</u>	<u>natürliche Werte</u>
Nennspannung	$U_N = 220 \text{ V}$	$U_N = 220 \text{ kV}$
Nennstrom	$I_N = 4,22 \text{ A}$	$I_N = 422 \text{ A}$
Nennleistung	$S_N = 1,61 \text{ kVA}$	$S_N = 161 \text{ MVA}$



Dem Generator ist ein Blocktransformator mit folgenden Daten nachgeschaltet:

	<u>Modellwerte</u>	<u>natürliche Werte</u>
Nennleistung	$S_N = 1,61 \text{ kVA}$	$S_N = 161 \text{ MVA}$
Nennströme primär	$I_{1N} = 4,65 \text{ A}$	$I_{1N} = 465 \text{ A}$
Nennströme sekundär	$I_{2N} = 4,22 \text{ A}$	$I_{2N} = 422 \text{ A}$
Schaltgruppe	Dy5	

Über Maschinenschalter (Trenner, Leistungsschalter) können die Kraftwerksblöcke auf ein Doppelsammelschienensystem geschaltet werden und mit den Freileitungsnachbildungen verbunden werden.

2.3 Leitungsnachbildungen

Mit den Leitungsnachbildungen werden 2-fach-Bündelleitungen St/Al 2x 240/40 der Längen $l = 50 \text{ km}$ und $l = 100 \text{ km}$ nachgebildet. Sie bestehen aus dreiphasigen π -Gliedern (Bild 3), die aus Ohmschen Widerstand R , Induktivität X den gegenseitigen Kapazitäten C_L und den Erdkapazitäten C_E sowie dem ohmschen Anteil R_E und dem induktiven Anteil X_E der Erdrückleitung aufgebaut sind.

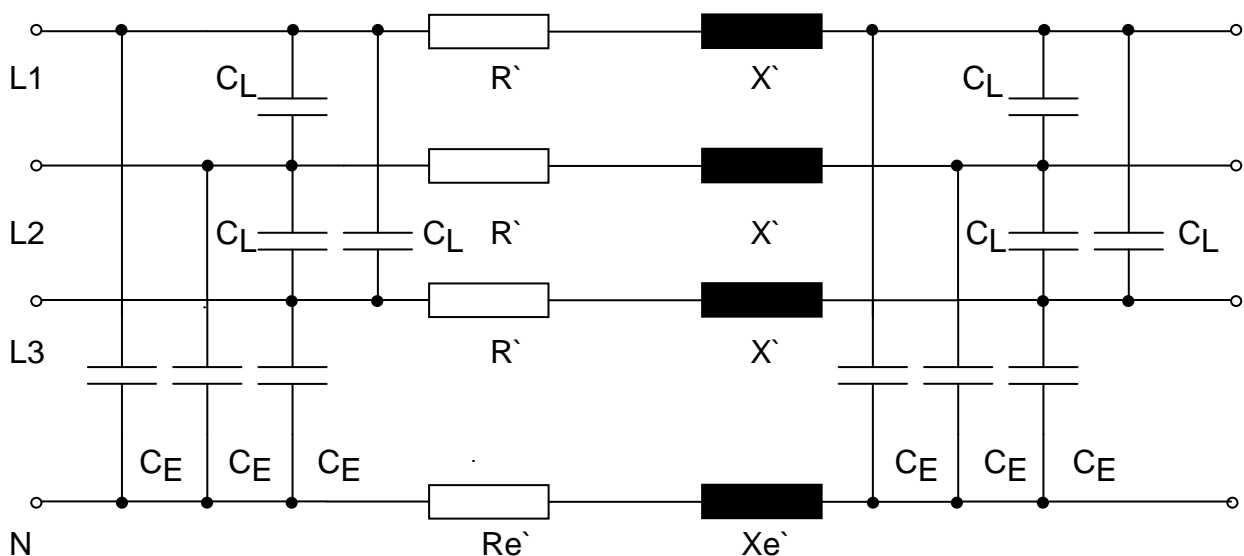


Bild 3: Leitungsnachbildung aus dreiphasigen π -Gliedern



Für Übersichtsrechnungen kann von folgenden Daten (natürliche Werte) ausgegangen werden:

Länge km	R` Ohm/km	X` Ohm/km	Cb` nF/km	Xe` Ohm/km	Re` Ohm/km
50	0,108	0,336	11,94	0,251	0,088
100	0,089	0,313	12,14	0,261	0,072

2.4 Leitungsdaten

In folgender Tabelle sind alle Leitungsdaten der Modellanlage bezogen auf ein 2-fach-Bündelleitung St/Al 2x 240/40 für 220 kV dargestellt:

Leitungs-Nr.:	Länge km	R` Ohm/km	X` Ohm/km	Cb` nF/km	Xe` Ohm/km	Re` Ohm/km
1	100	0,088	0,313	12,172	0,261	0,071
2	50	0,112	0,336	11,928	0,252	0,092
3	50	0,104	0,336	11,916	0,252	0,084
4	100	0,090	0,313	12,110	0,260	0,075
5	100	0,088	0,312	12,127	0,261	0,071
6	50	0,110	0,334	11,948	0,250	0,093
7	50	0,105	0,336	11,936	0,251	0,086
8	100	0,088	0,313	12,157	0,261	0,071
9	100	0,089	0,313	12,100	0,261	0,073
10	50	0,114	0,336	11,936	0,251	0,087
11	50	0,105	0,336	11,958	0,252	0,086
12	100	0,090	0,312	12,170	0,261	0,073

2.5 Netztransformator

Der Netztransformator verbindet die Anlage mit dem FH-Niederspannungsnetz. Über einen Schalter kann die Oberspannung in 24 Stufen von -10 % bis +10 % der Nennspannung eingestellt werden. Als Betriebsarten für den Sternpunkt sind möglich: starr geerdet, offen oder gelöscht. Die Induktivität der Erdschlussspule ist mit einem Handrad veränderbar.

Daten des Netztransformators

	Modellwerte	natürliche Werte
Übersetzungsverhältnis	$\ddot{u} = 220/380 \text{ V}$	$\ddot{u} = 200/380 \text{ kV}$



Nennleistung	$S_N = 2,0 \text{ kVA}$	$S_N = 200 \text{ MVA}$
Nennströme primär	$I_{1N} = 5,2 \text{ A}$	$I_{1N} = 520 \text{ A}$
Nennströme sekundär	$I_{2N} = 3,04 \text{ A}$	$I_{2N} = 304 \text{ A}$
Schaltgruppe	Dy5	

3. Versuchsaufbau

Vervollständigen Sie anhand der am Versuchstag vorgegebenen Leitungsdaten den Versuchsaufbau, bestehend aus Einspeisung, Übertragungsstrecke und Last. Benutzen Sie den Kraftwerksblock 1 als Einspeisung und verbinden Sie lastseitig die elektrisch lange Leitung mit dem Stelltransformator zur Einspeisung in das FH-Netz.

3.1 Versuchsdurchführung Teil 1

Nachdem der Versuchsaufbau gesteckt und durch den Betreuer abgenommen wurde, schalten Sie die Versuchsanlage mit dem Hauptschalter ein. Achten Sie vor der Inbetriebnahme des Kraftwerksblocks darauf, dass alle Trenner und Leistungsschalter auf der von Ihnen gewählten Übertragungsstrecke ausgeschaltet sind. Die Inbetriebnahme des Kraftwerksblocks geschieht durch Zuschalten der Antriebsmaschine, der Erregung und des Feldes. Mit dem Regler "Sollwert Antriebsmaschine" wird die Drehzahl der Gleichstrommaschine auf 1500 min^{-1} gebracht. Anschließend wird mit dem Regler „Sollwert Erregermaschine“ ein Erregerstrom von ca. 1,5 bis 2 Ampere eingestellt. Nun kann die leerlaufende Leitung durch Betätigung der Trenner und der Leistungsschalter zugeschaltet werden. Im nächsten Schritt wird die Spannungsamplitude, die Frequenz und die Phasenlage der vom Kraftwerk gespeisten elektrisch langen Leitung mit dem FH-Niederspannungsnetz synchronisiert. Nach erfolgter Synchronisation läuft die Anlage am starren Netz. Nun sind definierte Betriebszustände am Kraftwerksblock einzustellen. Mit Hilfe des Reglers „Statischer Betrieb“ soll konstante Wirkleistungsabgabe beginnend von 50 MW bis 225 MW in Schritten von 25 MW eingestellt werden. Dabei ist auf konstante Spannung $U_2 = 220 \text{ kV}$ zu achten und ggf. am Stelltransformator nach zu regeln. Der Leistungsfaktor $\cos\varphi_2$ ist ebenfalls konstant zu halten. Mit Hilfe des Reglers „Erregung Hand“ kann der Blindleistungsbedarf der Leitung und somit der Leistungsfaktor $\cos\varphi_2$ für das Ende der elektrisch langen Leitung angepasst werden. Der Versuch ist nacheinander für $\cos\varphi_2 = 0,94$ induktiv und $\cos\varphi_2 = 1$ durchzuführen. Mit zunehmender Wirkleistungseinspeisung wird die elektrisch lange Leitung zunehmend belastet, so dass der $\cos\varphi_1$ an der Einspeisestelle von kapazitivem- zu induktivem Verhalten wechselt.

Überlegen Sie, welche elektrischen Werte und Parameter für die Beurteilung des Verhaltens einer belasteten, elektrisch langen Leitung relevant sind. Nehmen Sie diese mit



Hilfe der digitalen multifunktionalen Leistungsmessgeräten A2000 auf und werten Sie die Ergebnisse für die unterschiedlichen Belastungsfälle in geeigneter Form tabellarisch und grafisch aus. In welchen Arbeitspunkten wird der natürliche Betrieb der elektrischen Leitung erreicht? Was versteht man darunter?

Die Messergebnisse sind mit einer Modellrechnung in Matlab oder einer Simulation in Neplan zu überprüfen.

3.2 Versuchsdurchführung Teil 2

Ausgehend vom Versuchsteil 1 ist die elektrisch lange Leitung zu ersetzen durch eine Parallelschaltung von zwei ungleich langen Leitungen, deren genaue Längenvorgabe am Versuchstag erfolgt. Die Übertragungsstrecke ist mit einer ohmschen Last von 91 MW abzuschließen. Der zu erwartende Lastfluss in dieser Schaltungsvariante würde zu einem großen Teil von der kurzen Leitung getragen werden. Aus diesem Grund soll zusätzlich ein Quer-Regeltrafo in die kurze Leitung integriert werden, um stufenweise (Stufe 0-7) eine Lastflussverschiebung auf die lange Leitung zu erreichen.

Der Arbeitspunkt des speisenden Kraftwerkes ist so einzustellen, dass die Spannung lastseitig für jeden Belastungsfall konstant 220 kV beträgt. Durch Einbinden der multifunktionalen Leistungsmessgeräte A2000 sowohl kraftwerks- als auch lastseitig sind alle relevanten Lastflusskennwerte aufzunehmen und die Lastflussverschiebung in geeigneter Form grafisch zu dokumentieren. Zusätzlich soll bei jeder Schalterstellung der Spannungsverdrehwinkel ϑ zwischen den Knotenpunkten A und B gemessen werden. Erläutern Sie die messtechnisch ermittelten Sachverhalte!

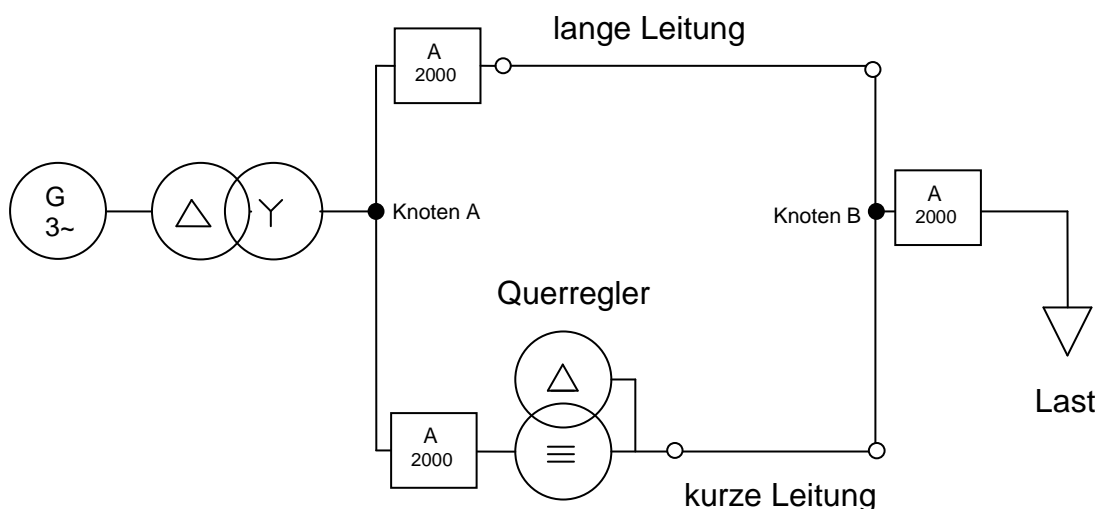


Bild 4: Einbindung des Querregel -Trafos (Prinzipschaltung)



4. Versuchsvor- bzw. nachbereitung (in schriftlicher Form)

Welche Maßnahmen sind vorzusehen, wenn Verbraucher am Ende einer elektrisch langen Leitung Blindleistung benötigen und die Leitung verlustarm betrieben werden soll?

Was verstehen Sie unter ausgeglichener Blindleistungsbilanz einer Leitung?

Wie ist der Wellenwiderstand einer elektrischen Leitung definiert?

Berechnen Sie am Versuchstag den Wellenwiderstand der elektrischen Leitung anhand der Leitungsvorgabe aus dem Versuchsaufbau!

Wann spricht man von einer angepassten Leitung? Treffen Sie eine Aussage zum Spannungsprofil!

Was verstehen Sie, bezogen auf eine leerlaufende Leitung, unter dem sogenannten Ferranti - Effekt?

Wann kann ein „umgekehrter“ Ferranti-Effekt auftreten?

Worin unterscheiden sich die π -Modelle einer elektrisch kurzen und einer elektrisch langen Leitung?

Welche Eingangsgröße beeinflusst bei einer belasteten Leitung am Ausgang hauptsächlich den Spannungsverdrehwinkel ϑ und welche den Spannungsfall ΔU ?

Machen Sie sich, falls erforderlich durch Selbststudium, mit den Aufgaben der verschiedenen Schaltertypen (Trennschalter, Leistungsschalter, Lastschalter, Sicherung) vertraut.

Wie wirken Quer-, Längs- und Schrägregel-Trafos? Auf welche Größen haben sie Einfluss?

Was verstehen Sie unter sogenannten „Flexible AC Transmission Systems - FACTS“?

Wie sehen die Zeigerbilder für Strom und Spannung für die o.g. Transformatoren aus?

Literaturhinweis:

[1] Schlabbach/Metz. Netzsystemtechnik. VDE Verlag, 2005.

[2] Eckhard Spring. Elektrische Energienetze. VDE Verlag, 2003.

[3] V. Crastan. Elektrische Energieversorgung 2. Springer Verlag, 2000.