

Übungsunterlagen zur Vorlesung

Energieübertragung und Netzregelung

SS 2016

1. Aufgabe: Energieübertragung über eine 400-kV-Leitung

Ein Ingenieur plant den Bau einer 400-kV-Leitung mit einer Länge von 300 km, die bei 50 Hz betrieben wird und zwei Netze (N1 und N2) miteinander verbindet. Die Freileitung hat folgende Daten: $R' = 0,1 \, \Omega/\text{km}$ $L' = 1,3 \, \text{mH}/\text{km}$ $G' = 0$ $C' = 8,5 \, \text{nF}/\text{km}$.

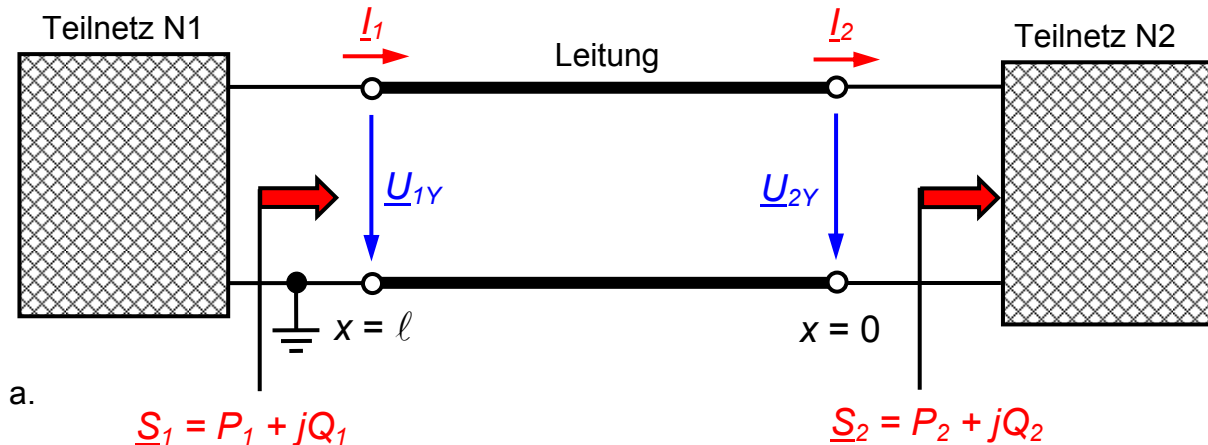


Bild 1.1: Energieübertragung über eine elektrisch lange Leitung

- a) Berechnen Sie die imaginäre Übertragungskonstante γ_0 , die Wellenlänge und den komplexen Wellenwiderstand $\underline{Z}_W = Z_0$ unter der Annahme, dass die Leitung verlustfrei ist. Dabei gelten die folgenden Zusammenhänge:

$$\gamma_0 = j\omega \cdot \sqrt{L' \cdot C'} = j\beta_0 \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta_0} \quad \underline{Z}_W = Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad .$$

- b) Welche Wirkleistung kann durch die Leitung übertragen werden, wenn man von einer Betriebsspannung von 400 kV und einem Leitungswinkel ϑ von 30° ausgeht. Welche Blindleistung muss in die Leitung eingespeist werden und welche Blindleistung kann durch die Leitung übertragen und in das Netz N2 eingespeist werden? Ist die in das Netz N2 eingespeiste Leistung kapazitiv oder induktiv?
- c) In das Netz N2 soll eine Blindleistung von +50 MVar eingespeist werden. Gleichzeitig soll ein Spannungsband von $\pm 5\%$ eingehalten werden, d. h. die Spannung im Netz N1 kann um maximal 5% gesteigert werden, die Spannung im Netz N2 kann um maximal 5% abgesenkt werden. Ist unter diesen Bedingungen die Einspeisung der Blindleistung +50 MVar bei einem Leitungswinkel ϑ von 30° möglich?
- d) Wie weit müsste die Spannung an der Einspeisestelle des Netzes N2 abgesenkt werden, damit die Einspeisung der Blindleistung +50 MVar bei einem Leitungswinkel ϑ von 30° in das Netz N2 möglich ist, und dabei die Spannung am Anfang der

Leitung (Anschlusspunkt an das Netz N1) höchstens um + 5% gesteigert werden kann?

- e) Auf welchen Wert muss der Leitungswinkel ϑ verändert werden, wenn unter Einhaltung des Spannungsbandes von $\pm 5\%$ in das Netz N2 eine Blindleistung von +100 MVar eingespeist werden soll? Wie groß ist die übertragene Wirkleistung?

2. Aufgabe: Dimensionierung einer Kraftwerkseinspeisung

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) soll über einen Transformator und eine Leitung in das öffentliche 110-kV-Energieversorgungsnetz einspeisen. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter bestimmen.

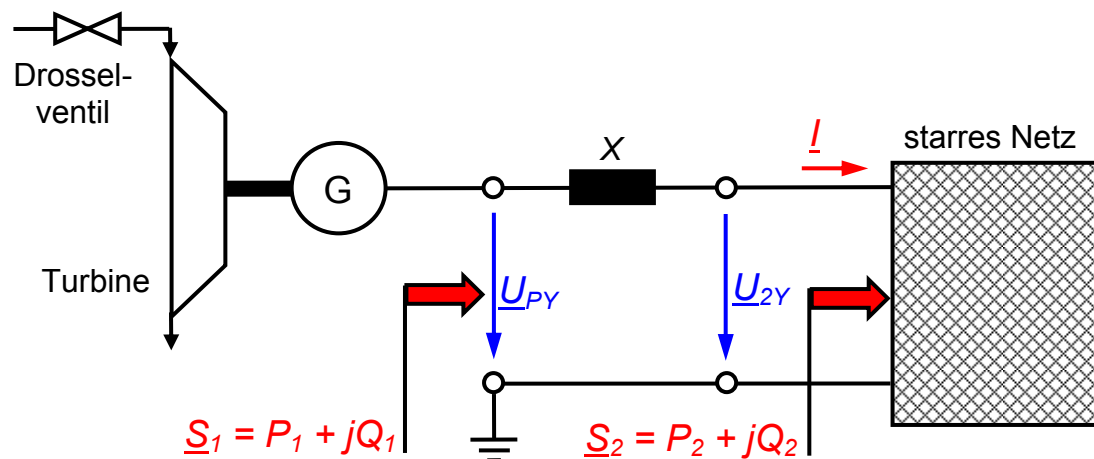


Bild 2.1: Leistungsübertragung über eine Leitung

a) Wie groß ist die Spannung $\underline{U}_{2Y}$?

b) Die Betriebsmittel haben folgende Daten:

Generator: $U_N = 11 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$, $x_d = 1,4$

Transformator: $u_k = 12\%$, Übersetzung: $11 \text{ kV} / 110 \text{ kV}$, $S_N = 40 \text{ MVA}$

110-kV-Leitung: Länge = 30 km , $X_L' = 0,39 \Omega/\text{km}$.

Bestimmen Sie die insgesamt wirksame Reaktanz X .

c) Welche maximale Wirkleistung P_{max} ist übertragbar? Wie groß ist dann der Leitungswinkel ϑ ? Der Generator kann um 10% übererregt werden.

d) Mit welchem Leitungswinkel ϑ arbeitet die Anlage, wenn der Generator die halbe maximale Wirkleistung $P_1 = P_{max}/2$ zur Verfügung stellt.

e) Das BHKW soll besser ausgenutzt werden. Die bisherige maximale Leistung P_{max} soll jetzt bei einem Leitungswinkel von $\vartheta = 45^\circ$ tatsächlich übertragen werden. Hierzu wird eine kapazitive Kompensation der Reaktanz X in den Längszweig der Leitung eingebaut. Bestimmen Sie die notwendige Kapazität C der kapazitiven Kompensationseinrichtung.

3. Aufgabe: Ankopplung eines Windparks an das 110-kV-Netz

Ein Windpark, bestehend aus 20 3-MW-Einheiten soll an das Energieversorgungsnetz angeschlossen werden. Dazu wird auf einer Plattform auf See ein 110-kV-Transformator installiert. Die Verbindung an Land erfolgt durch ein 50 km langes Kabel. Sie sollen die wesentlichen Anlagenparameter und Übertragungseigenschaften bestimmen.

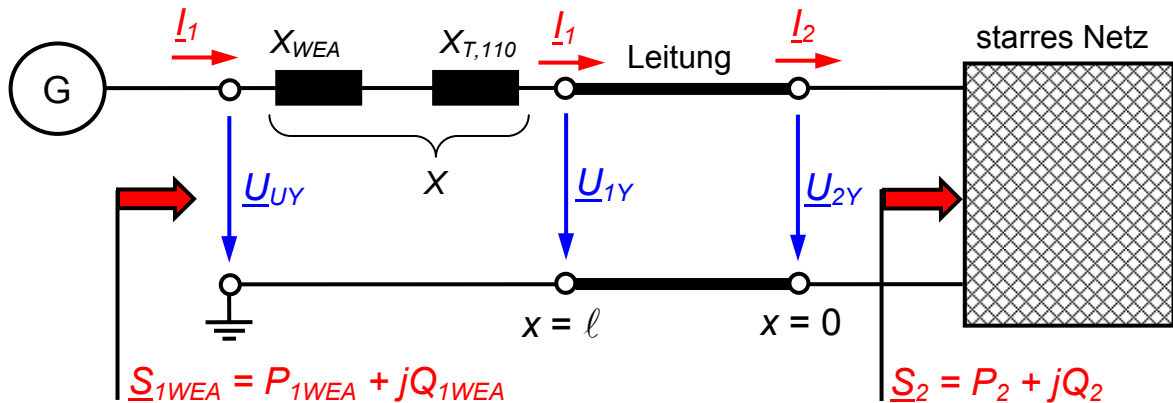


Bild 3.1: Leistungsübertragung über eine 110-kV-Leitung

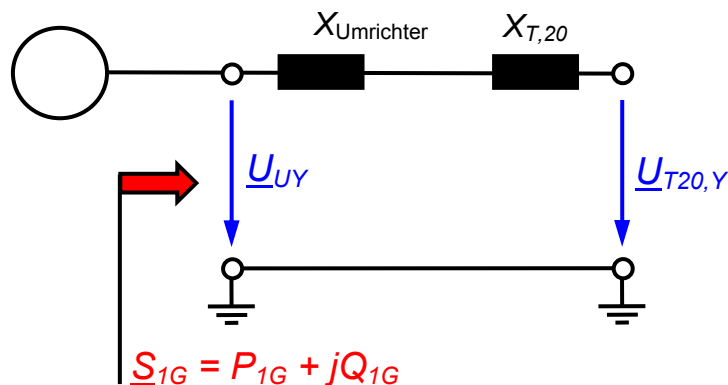


Bild 3.2: Aufbau einer WEA mit Asynchrongenerator und 20-kV-Transformator

- a) Die Synchrongeneratoren der Windenergieanlagen (WEA) sind über einen Vollumrichter angebunden. Jede Anlage verfügt über einen 20-kV-Transformator. Der Vollumrichter kann ähnlich wie eine Synchronmaschine als Spannungsquelle mit Serieninduktivität betrachtet werden. Diese Induktivität findet sich im netzseitigen Filter des Umrichters. Der Generator ist durch den Umrichter entkoppelt und tritt in der Übertragungsstrecke nicht mehr auf. Folgende Daten sind bekannt:

Umrichter $U_N = 690 \text{ V}$, $S_{N,U} = 3,5 \text{ MVA}$, $L_f = 100 \text{ } \mu\text{H}$

20-kV-Transformator: $u_k = 7\%$, Übersetzung: $0,69 \text{ kV} / 20 \text{ kV}$, $S_N = 3,5 \text{ MVA}$

Bestimmen Sie zunächst die Ersatzimpedanz der Serienschaltung aus Umrichter und Transformator gemäß **Bild 3.2**.

- b) Die 20 WEA sind auf der 20-kV-Seite der WEA-Transformatoren mit der Plattform verbunden, auf der sich der 110-kV-Transformator befindet. Die Verbindung zur Plattform kann vernachlässigt werden. Der 110-kV-Transformator hat die folgenden Daten:

110-kV-Transformator: $u_k = 12\%$, Übersetzung: 20 kV / 110 kV, $S_N = 80$ MVA

Bestimmen Sie die Ersatzimpedanz X_{WEA} der Gesamtanlage und $X_{T,110}$ des 110-kV-Transformators sowie die Gesamtimpedanz X der Gesamtanlage.

- c) Das 110-kV-Kabel hat die folgenden Daten. Bestimmen Sie den Wellenwiderstand des Kabels sowie die Wellenlänge λ .

110-kV-Kabel: Länge = 50 km, $L' = 0,46$ mH/km, $C' = 133$ nF/km

- d) Berechnen Sie den Übertragungswinkel ϑ , wenn die Umrichter der WEAs bei Nennspannung insgesamt 60 MW Wirkleistung einspeisen. Welche Blindleistung muss dann von den Umrichtern zusätzlich eingespeist werden? Welche Blindleistung wird am Netzanschlusspunkt bezogen bzw. eingespeist? Ist die Blindleistung, die der Umrichter in die Leitung einspeist induktiv oder kapazitiv? Wie stellt sich dies bei der Einspeisung der Leitung ins Netz dar?
- e) Wie würden sich die Ergebnisse in Aufgabenteil d) darstellen, wenn das Kabel eine Länge von 300 km hätte? Bezieht das Kabel vom Netz induktive oder kapazitive Blindleistung? Wie bewerten Sie diesen Betriebszustand?
- f) Die Kabellänge betrage nun wieder 50 km. Die Umrichter sollen so geregelt werden, dass am Netzanschlusspunkt keine Blindleistung mehr benötigt wird. Welcher Parameter kann am Umrichter dahingehend variiert werden?

Erstellen Sie das Gleichungssystem, mit dem Sie diesen Parameter bestimmen können. Das resultierende Gleichungssystem ist analytisch nicht lösbar.

In Bild 3.3 sind Übertragungswinkel und die beiden Blindleistungen in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung des Umrichters gezeigt. Bestimmen Sie die benötigte Umrichterspannung und den resultierenden Übertragungswinkel ϑ . Welche Blindleistung müssen die Umrichter jetzt bereitstellen?

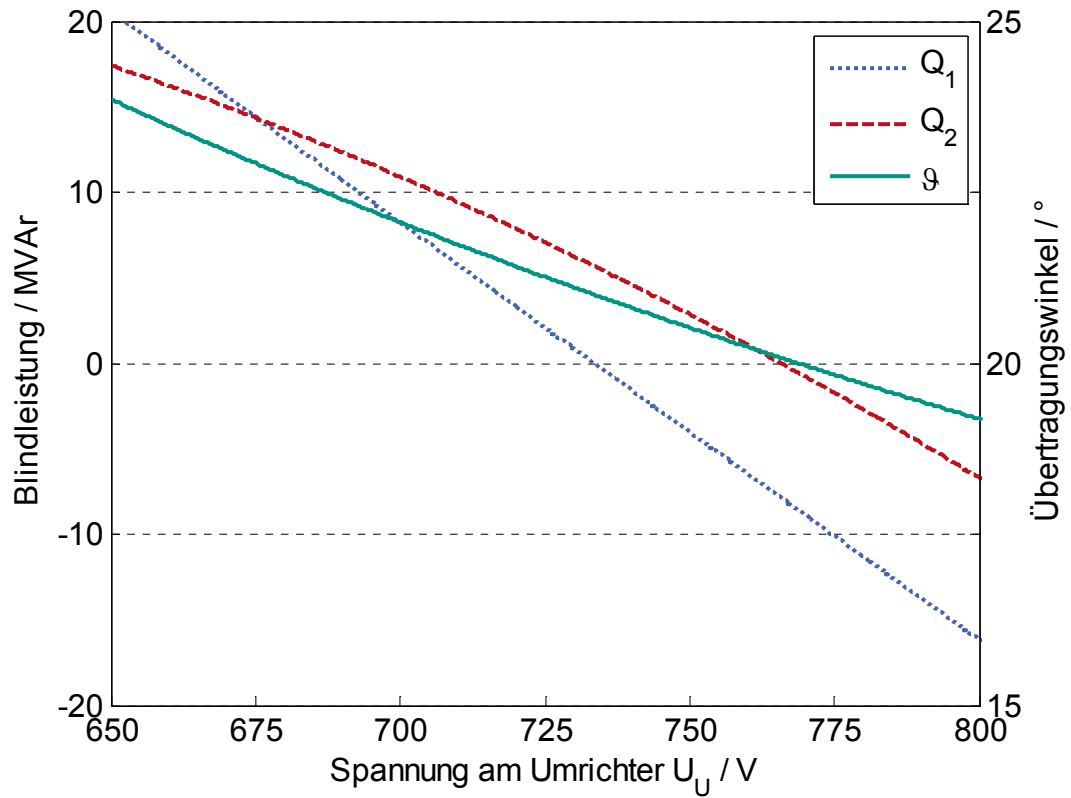


Bild 3.3 Übertragungswinkel in Abhängigkeit vom Übertragungswinkel

4. Aufgabe: Ausgleichsschwingung des Leitungswinkels bei der Leistungsänderung der Kraftwerksturbine

Ein Kohlekraftwerk speist über einen 600-MVA-Transformator (400/27 kV) und eine 400-kV-Freileitung (Stichleitung) in das als starr anzunehmende 400-kV-Netz. Plötzlich tritt eine Leistungsänderung von 50 MW auf. Berechnen Sie die Ausgleichsschwingung.

Daten:

Generator und Turbine: $J = 28000 \text{ kgm}^2$ (Massenträgheitsmoment)

$D = 88 \text{ MWs}$ (Dämpfungskonstante)

Generator: $S_{N,G} = 555 \text{ MVA}$ $U_{N,G} = 27 \text{ kV}$ $\cos(\varphi) = 0,9$ $f = 60 \text{ Hz}$ $p=1$ $L_d = 1,99 \text{ mH}$

Transformator: $S_{N,T} = 600 \text{ MVA}$ Übersetzung: 400/27 kV $u_k = 16\%$

Leitung: $X_L' = 0,26 \Omega/\text{km}$ Leitungslänge: 5 km

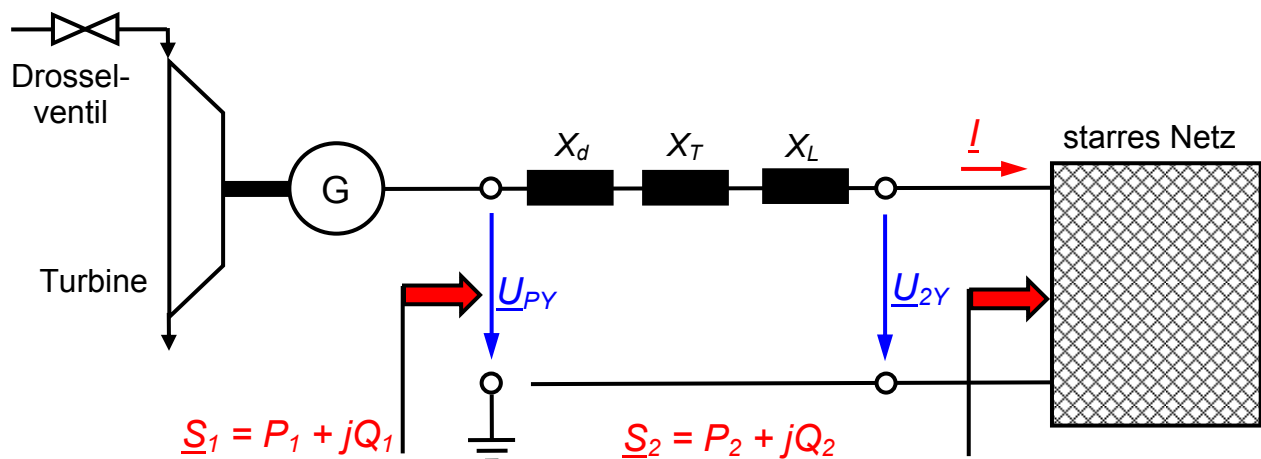


Bild 4.1: Leistungsübertragung über eine Leitung

- Bestimmen Sie die Impedanzen X_d , X_T und X_L des Generators, des Transformators und der Leitung sowie die wirksame Gesamtimpedanz X ?
Beachten Sie, dass sämtliche Impedanzen für dieselbe Spannungsebene, z. B. 27 kV, benötigt werden.
- Berechnen Sie die vom Generator abgegebene Wirkleistung P_1 und die Blindleistung Q_1 .
- Mit welchem Leitungswinkel ϑ zwischen Polradspannung U_P des Generators und der Spannung U_2 des 400-kV-Netzes wird das System betrieben, wenn der Generator mit seiner Maximalleistung von 555 MVA bei $\cos \varphi = 0,9$ arbeitet? Die Polradspannung soll 27 kV betragen, die Netzspannung beträgt 400 kV.

- d) In einem Stahlwerk, das durch das 400-kV-Netzwerk gespeist wird, fällt ein Hochofen aus. Dadurch verringert sich die Einspeiseleistung durch das Kraftwerk an der Einspeisestelle um 50 MW.

Berechnen Sie:

- den Endwert, auf den sich der Leitungswinkel ϑ einstellt.
- die Zeitkonstante τ , mit welcher die Oszillation des Leitungswinkels ϑ abklingt
- die Kreisfrequenz ω_1 und die Frequenz f_1 , mit welcher der Leitungswinkel ϑ oszilliert.

5. Aufgabe: Stabilität einer Kraftwerkseinspeisung bei einer Kurzunterbrechung

Es soll ein Kraftwerk betrachtet werden, dessen Generator über einen 600-MVA-Transformator (400/27 kV) und eine 400-kV-Freileitung (Stichleitung) in das als starr anzunehmende 400-kV-Netz speist. Aufgrund eines zu hoch gewachsenen Baumes kommt es zu einem Überschlag von einem der Leiterseile gegen Erde. Um den Lichtbogen zu löschen wird der Leistungsschalter zwischen Transformator und 400-kV-Leitung kurzzeitig geöffnet (Kurzunterbrechung, KU). Bestimmen Sie die maximale Dauer der Kurzunterbrechung.

Daten:

Generator und Turbine: $J = 30000 \text{ kgm}^2$ (Massenträgheitsmoment)

Generator: $S_{N,G} = 580 \text{ MVA}$ $U_{N,G} = 27 \text{ kV}$ $\cos(\varphi) = 0,88$ $f = 50 \text{ Hz}$ $p = 1$

Transformator: $S_{N,T} = 600 \text{ MVA}$ Übersetzung: 400/27 kV $u_k = 16\%$

Gesamtimpedanz von Generator, Transformator und Leitung (bezogen auf die 400-kV-Seite): $X = 219,48 \Omega$

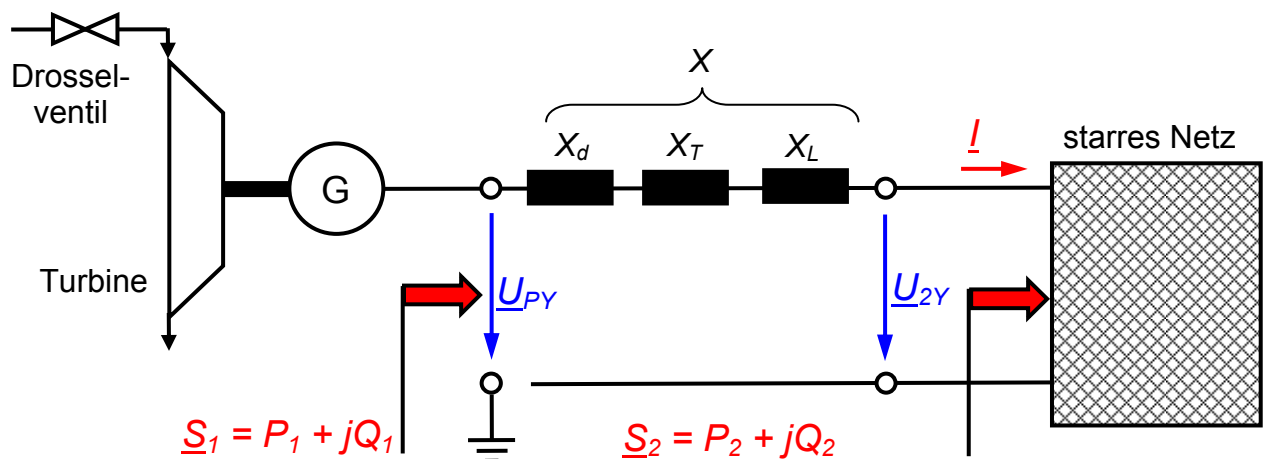


Bild 5.1: Leistungsübertragung über eine Leitung

- Bestimmen Sie die Wirkleistung P_1 , die der Generator in seinem Nennbetriebszustand abgibt.
- Mit welchem Leitungswinkel ϑ zwischen Polradspannung U_P des Generators und der Spannung U_2 des 400-kV-Netzes wird das System betrieben, wenn der Generator mit seiner Maximalleistung von 580 MVA bei $\cos \varphi = 0,88$ arbeitet? Die Polradspannung soll 27 kV betragen, die Netzspannung beträgt 400 kV. Die Verluste des Generators können vernachlässigt werden.
- Bestimmen Sie den zeitlichen Verlauf des Polradwinkels nach dem Öffnen des Leistungsschalters auf der 400-kV-Seite.

- d) Bestimmen Sie gemäß dem Flächensatz den Polradwinkel $\vartheta_{1,krit}$ und die Zeit t_{krit} , welche die KU höchstens andauern darf, wenn der Polradwinkel des Generators nach der KU wieder in seinen Ausgangszustand zurückkehren soll.
- e) Um sicherzustellen, dass der Lichtbogen tatsächlich gelöscht ist, soll die Dauer der KU auf 0,2 s ausgedehnt werden können. Um dies zu erreichen, muss der Leitungswinkel ϑ_0 des Ausgangszustandes vor der KU verringert werden.

Berechnen Sie die erforderliche Differenz zwischen den Polradwinkeln $\vartheta_{1,krit}$ und ϑ_0 , d. h. $\vartheta_{1,krit} - \vartheta_0$ und bestimmen Sie aus **Bild 5.2** zu dieser Winkeldifferenz $\vartheta_{1,krit} - \vartheta_0$ den zugehörigen Wert für ϑ_0 .

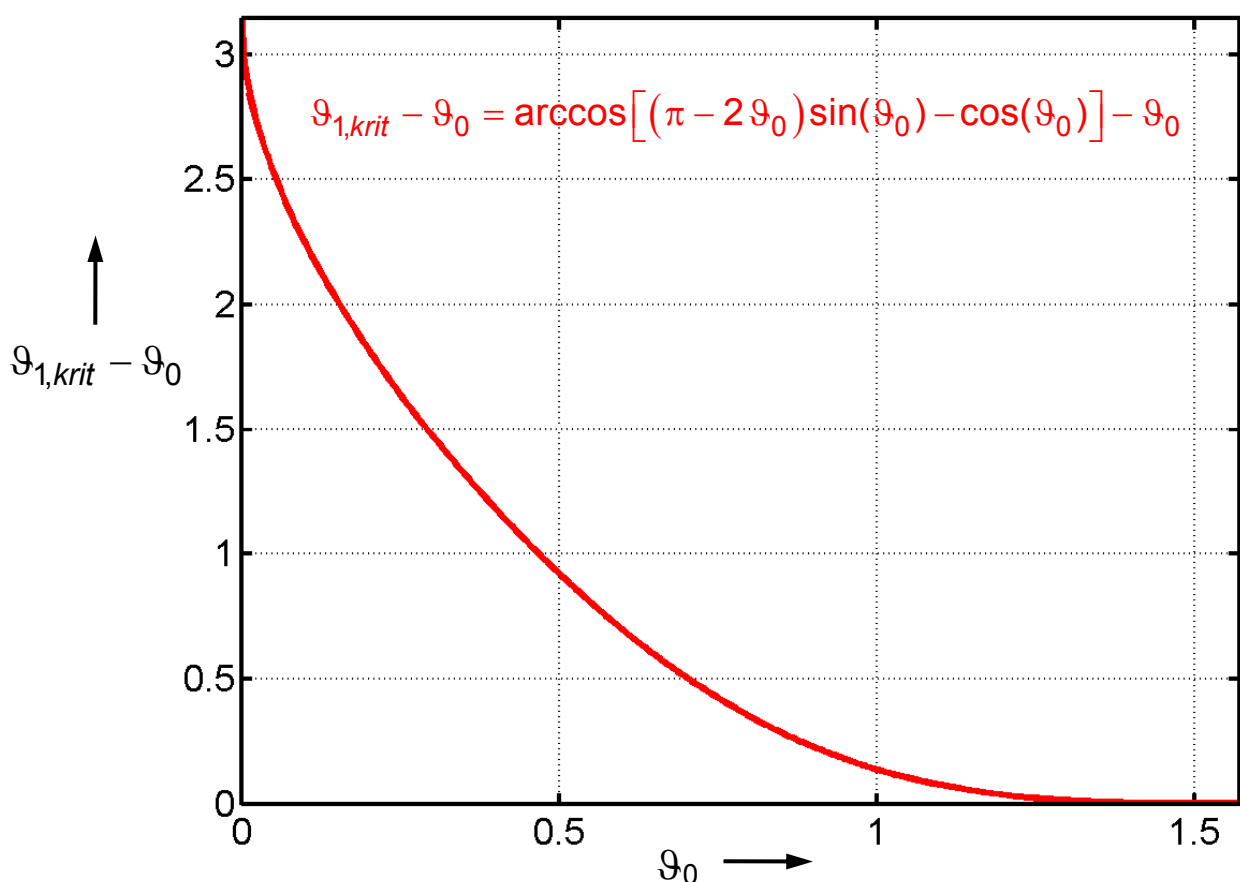


Bild 5.2: Differenz zwischen dem kritischen Polradwinkel $\vartheta_{1,krit}$ und dem Ausgangswert ϑ_0 in Abhängigkeit von ϑ_0 bei einer Kurzunterbrechung (KU) des speisenden Generators

- f) Berechnen Sie die Impedanz X , bezogen auf die 400-kV-Seite, die erforderlich wäre, um einen stationären Wert für ϑ_0 von $22,9^\circ$ zu erreichen. Dabei liefert die Turbine eine Wirkleistung von 510,4 MW.

- g) Durch welche Maßnahme auf der 400-kV-Seite könnte die notwendige Reduktion der Impedanz X erreicht werden?

Berechnen Sie den Wert der notwendigen zusätzlichen Komponente.

Berechnen Sie ferner die Spannung, mit der diese Komponente bei Nennbetrieb mit einer Wirkleistung von 510,4 MW und $\cos(\varphi) = 0,88$ beansprucht wird.

6. Aufgabe: Monopolare HGÜ-Anlage

Die in **Bild 6.1** dargestellte HGÜ-Anlage soll projiziert werden. Sie besteht in beiden Stationen aus 2 in Reihe geschalteten 6-pulsigen Drehstrombrückenschaltungen, so dass sich insgesamt ein 12-pulsiger Stromrichter ergibt. Der Gleichstrom I_d wird als ideal geglättet angenommen.

Die folgenden Daten der Anlage sind gegeben:

Länge der Gleichstromleitung:	$l_{ges} = 890 \text{ km}$
Widerstandsbelag der Gleichstromleitung:	$R' = 0,00995 \text{ } \Omega/\text{km}$
Bemessungsgleichstrom:	$I_{rd} = 3000 \text{ A}$
Ausgangsspannung am GR:	$U_{d\alpha, GR} = 500 \text{ kV}$
Scheinleistung der Transformatoren:	$S_{rT} = 900 \text{ MVA}$
Rel. Kurzschlussspannung der Transformatoren:	$u_{kYY} = u_{kY\Delta} = 15 \text{ } \%$
Ventilseitige Leiterspannung der Transformatoren:	$U_{L,V} = 220 \text{ kV}$
Netzseitige Leiterspannung der Transformatoren:	$U_{L,N} = 400 \text{ kV}$

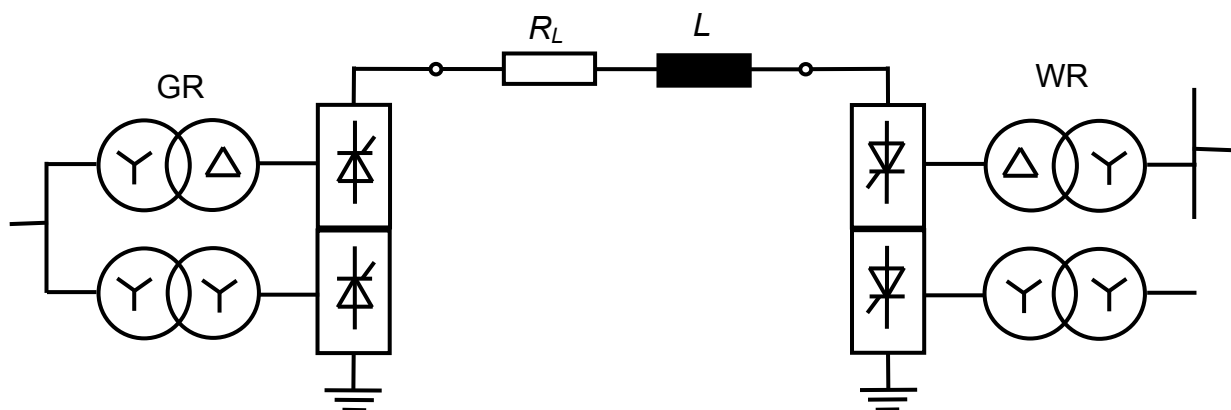


Bild 6.1: Schematischer Aufbau der zu projektierenden HGÜ-Anlage

- Wie muss der Zündwinkel des Wechselrichters (α_{WR}) eingestellt werden, wenn die verkettete Netzspannung auf der WR-Seite 220 kV betragen soll.
- Ist dies bei einer Freiwerdezeit von $t_q = 900 \text{ } \mu\text{s}$ und einer Schonzeit von $t_c = 2 \cdot t_q$ noch ohne Gefahr des Wechselrichterkippens möglich? Welche Freiwerdezeit ist mindestens nötig, um mit dem in a) berechneten Zündwinkel α_{WR} arbeiten zu können?
- Wie ist Zündwinkel des Gleichrichters (α_{GR}) für den unter a) berechneten Betrieb mit dem Zündwinkel α_{WR} einzustellen, wenn auf der Ventilseite Gleichrichters eine verkettete Spannung von 220 kV vorliegt?

- d) Berechnen Sie die Effektivwerte der Grundschiwingung, sowie der ersten 4 Oberschwingungen des Stromes auf der Netzseite der Stromrichtertransformatoren. Die Stromrichtertransformatoren werden auf der Gleich- und der Wechselrichterseite am 400-kV-Netz betrieben.
- e) Bestimmen Sie die Grundschiwingungsscheinleistung und die gesamte Scheinleistung, die Wirkleistung sowie die gesamte Blindleistung, die Grundschiwingungsblindleistung und die Verzerrungsblindleistung auf der Wechselrichterseite.
- f) Für welche Scheinleistung müssen die Stromrichtertransformatoren ausgelegt werden? Ist die projektierte Scheinleistung von 900 MVA ausreichend?

7. Aufgabe: Energiefernübertragung mit einer HGÜ-Anlage

Es soll eine HGÜ-Anlage zur Energieübertragung über eine Entfernung von 1300 km projektiert werden. Die Anlage ist beidseitig als 12-pulsiger Stromrichter aufgebaut. **Bild 7.1** zeigt die Ersatzschaltung der Übertragungsstrecke. Der Stromrichter 2 soll eine Leistung von $P_2 = 1500$ MW in das Drehstromnetz übertragen.

Die folgenden Daten der Anlage sind bekannt:

$Z_X = 7 \, \Omega$	$L_d = 300 \text{ mH}$	$R_L = 20 \, \Omega$
$R_d = 50 \text{ m}\Omega$	$R_k = 0,3 \, \Omega$	$L_L = 1 \text{ mH/km}$

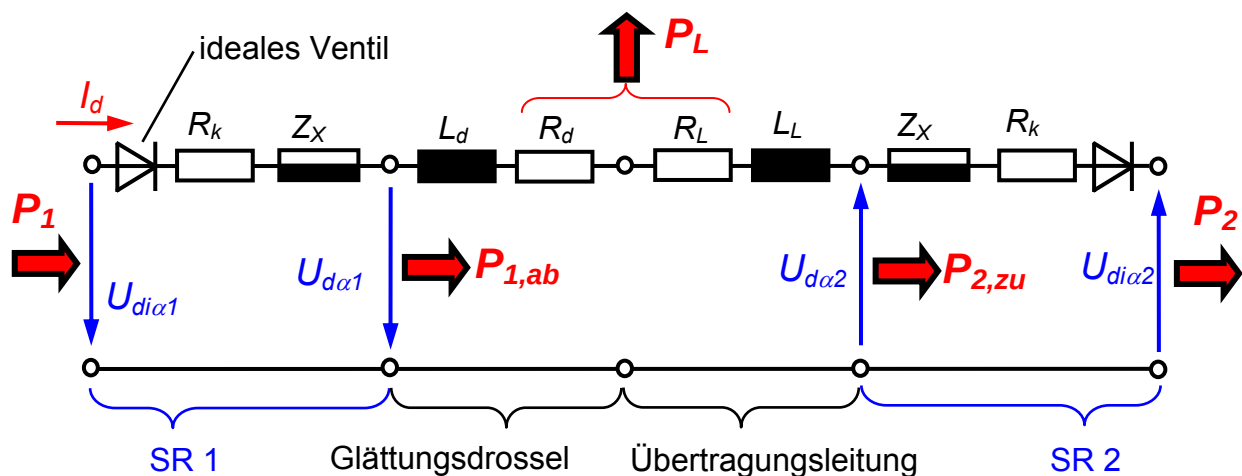


Bild 7.1: Ersatzschaltung der HGÜ

- Berechnen Sie den erforderlichen Gleichstrom I_d wenn der Wechselrichter (SR2) mit einem Steuerwinkel von $\alpha_2 = 143^\circ$ arbeitet und die Leiterspannung auf der Drehstromseite $U_L = 208,6$ kV beträgt.
Beachten Sie, dass der 12-pulsige Stromrichter aus 2 in Reihe geschalteten 6-pulsigen Stromrichtern in Drehstrombrückenschaltung besteht. Überlegen Sie, an welcher Stelle die Leiterspannung des Drehstromnetzes auftritt.
- Berechnen Sie die Spannung $U_{d\alpha 2}$ an den Gleichstromklemmen des Stromrichters SR2.
- Wie groß ist die notwendige Ausgangsspannung $U_{d\alpha 1}$ des Gleichrichters?
- Welche Ausgangsleistung $P_{1,ab}$ muss der Gleichrichter liefern, damit 1500 MW in das Drehstromnetz der Station 2 eingespeist werden können?
- Welche Netzspannung müssen die Stromrichtertransformatoren auf der Gleichrichterseite liefern, wenn der Gleichrichter mit einem Steuerwinkel von $\alpha_1 = 10^\circ$ betrieben wird?
- Wie groß ist die Verlustleistung, die bei diesem Betrieb insgesamt entsteht?

8. Aufgabe: Energieversorgung einer Insel über eine HGÜ-Verbindung

Eine monopolare HGÜ-Anlage mit 12-pulsigen Stromrichtern in beiden Stationen soll über ein Seekabel eine Leistung von 380 MW in das Energienetz einer Insel einspeisen. Das Seekabel hat eine Länge von 120 km. **Bild 8.1** zeigt die Ersatzschaltung der Übertragungsstrecke. Die Stromrichterverluste können vernachlässigt werden. Folgende Daten der Anlage sind bekannt:

$$f = 50 \text{ Hz} \quad R_d = 90 \text{ m}\Omega \quad L_d = 300 \text{ mH} \quad R_L = 11 \text{ }\Omega \quad L_L = 1 \text{ mH/km}$$

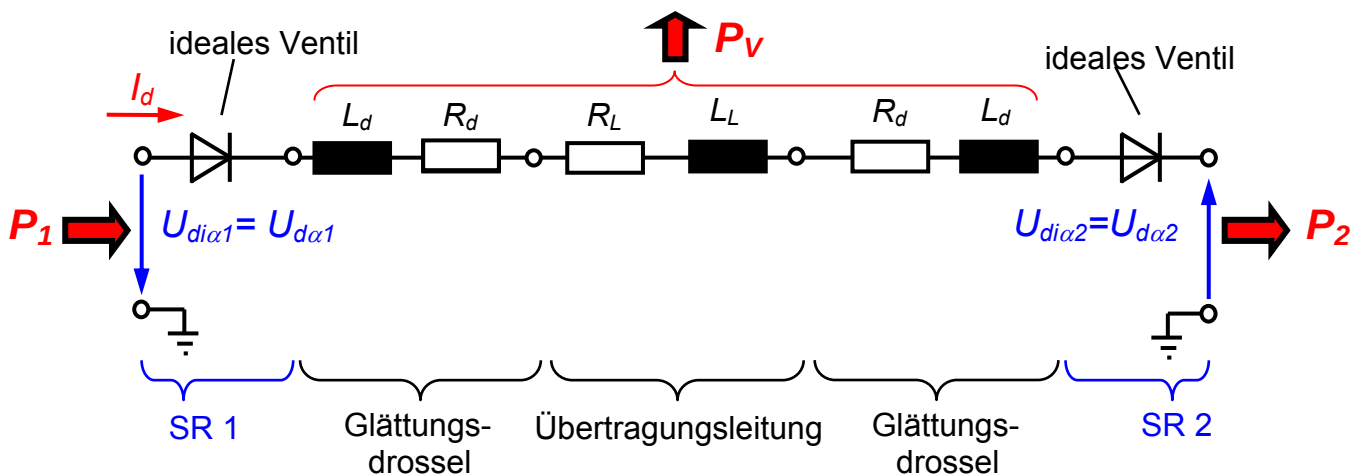


Bild 8.1: Ersatzschaltung der monopolen HGÜ

- Berechnen Sie den Gleichstrom I_d wenn die Spannung $U_{d\alpha 1}$ am Ausgang des Gleichrichters (SR1) 250 kV nicht übersteigen darf und $P_2 = 380 \text{ MW}$ in das Netz auf der Insel eingespeist werden sollen.
- Wie groß ist die erforderliche Netzspannung auf der Gleichrichterseite bei einem Steuerwinkel von $\alpha_1 = 12^\circ$?
- Wie groß darf der Steuerwinkel α_2 werden, wenn der Löschwinkel $\gamma = 15^\circ$ und die Überlappungszeit 0,94 ms beträgt. Runden Sie den Überlappungswinkel u zunächst auf eine ganze Zahl in Grad auf. Wie groß ist die Freiwerdezeit t_q der Thyristoren, wenn die Schonzeit t_c doppelt so groß ist, wie die Freiwerdezeit t_q .
- Kann bei dieser Konfiguration die geforderte Leistung übertragen werden, wenn die Netzspannung auf der Insel im Extremfall auf $U_{\text{Netz2}} = 100 \text{ kV}$ absinken kann? Wie weit darf die Netzspannung höchstens absinken?
- Wie groß sind die Gesamtverluste P_V dieser HGÜ-Verbindung?

9. Aufgabe: Energiefernübertragung mit einer HGÜ-Anlage (Simulink)

Die folgende Aufgabe soll mit dem entsprechenden Simulink-Modell bearbeitet werden. Das betrachtete HGÜ-System entspricht dem in Aufgabe 7. Es wird eine 1300 km lange Verbindung mit zwei 12-pulsigen Stromrichtern betrachtet.

$$Z_X = 7 \, \Omega$$

$$L_d = 300 \, \text{mH}$$

$$R_L = 20 \, \Omega$$

$$R_d = 50 \, \text{m}\Omega$$

$$R_k = 0,3 \, \Omega$$

$$L_L = 1 \, \text{mH/km}$$

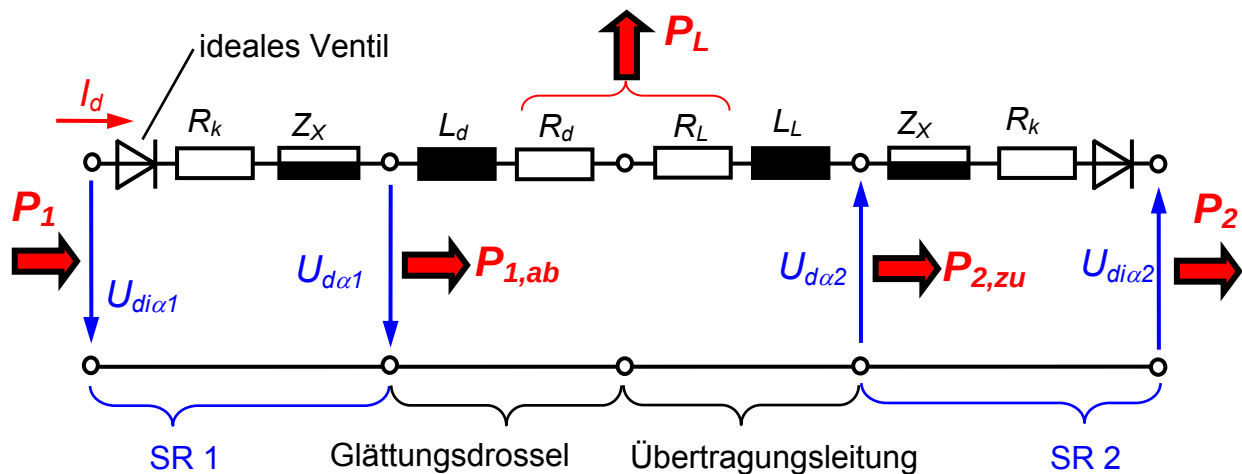


Bild 9.1: Ersatzschaltung der HGÜ

- a) Es soll zuerst die Wirkleistungsübertragung verändert werden. Wie im Skript beschrieben ist für die Einhaltung des Sollwerts der Gleichrichter verantwortlich. Im Model gibt es die Möglichkeit entweder einen festen Zündwinkel vorzugeben oder diesen aus dem Leistungssollwert mittels eines PI-Reglers berechnen zu lassen. Der Wechselrichter soll im Folgenden mit einem fixen Zündwinkel von 143° betrieben werden. Die AC-Filter sind nicht am Netz. Eine Simulationszeit von 0,5 s ist ausreichend um einen stabilen Betriebspunkt zu erreichen.
 - i) Simulieren Sie die fixen Zündwinkel 10° , 20° und 30° und beobachten Sie, wie sich die übertragene Leistung ändert. Der Zündwinkel kann im Block „Leistungsregelung“ verändert werden.
 - ii) Aktivieren Sie durch einen Klick auf den Umschalter im selben Block die Leistungsregelung. Simulieren Sie die Übertragung von 500, 1000 und 1500 MW. Achten Sie darauf, dass die Sprungfunktion, die einen Sprung des Sollwerts verursacht entweder vom Regler getrennt ist (Verbindung anklicken und löschen) oder dass der Sprung erst nach der simulierten Zeit erfolgen würde.
- b) Nun soll der Zündwinkel des Gleichrichters konstant gehalten werden, und die DC-Spannung mit Hilfe des Zündwinkels des Wechselrichters beeinflusst werden. Auch hier kann zwischen einem festen Sollwert und einer Regelung gewählt werden.

- i) Simulieren Sie die fixen Zündwinkel 120° , 135° und 145° . Der Zündwinkel kann im Block „Spannungsregelung“ verändert werden. Achten Sie darauf, dass der Zündwinkel des Gleichrichters konstant bei 10° liegt.
 - ii) Nun soll die DC-Spannung geregelt werden. Aktivieren Sie den Regler durch Umschalten des Schalters und geben Sie dem Regler die Sollwerte -440 kV und -460 kV vor. Achten Sie darauf, dass der Gleichrichter weiterhin mit einem Zündwinkel von 10° arbeitet.
- c) Als letztes soll nun der reale Fall betrachtet werden, bei dem beide Größen, Leistung und DC-Spannung gleichzeitig geregelt werden. Aktivieren Sie dazu in beiden Reglerblöcken den PI-Regler. Sollwert für die Leistungsübertragung ist 1000 MW, Sollwert für die Spannung -470 kV. Stellen Sie außerdem mit den beiden Sprungfunktionen eine Änderung des Sollwerts der Leistung um +200 MW nach 1 Sekunde, sowie eine Änderung des Spannungssollwerts um -20 kV nach 1,5 Sekunden ein. Erhöhen Sie den Simulationszeitraum auf 2 Sekunden.
- d) Der hohe Blindleistungsbedarf der Anlage soll nun mit Hilfe einer Kondensatorbank reduziert werden. Betrachten Sie den Betriebspunkt 1000 MW/-470 kV. Gleichzeitig sollen auch die in die Drehstromnetze eingepeisten Oberschwingungen reduziert werden.
- i) Machen Sie zuerst einmal eine Bestandsaufnahme. Wie hoch ist der Blindleistungsbedarf auf Gleich- und Wechselrichterseite? Welche Verzerrungen (THD) weisen Strom und Spannung auf beiden Seiten auf. Nutzen Sie für die Berechnung des THD die in der Dokumentation des Modells zur Verfügung gestellte Anleitung.
 - ii) Dimensionieren Sie zwei Kondensatorbänke zur Bereitstellung der Blindleistung.
 - iii) Sie haben auf beiden Seiten jeweils ein double-tuned-Filter zur Verfügung. Auf welche Frequenzen müssen diese abgestimmt werden?
 - iv) Implementieren Sie Ihre berechneten Werte in das Modell, aktivieren Sie die Schalter die die Filter mit dem Netz verbinden und simulieren Sie anschließend wieder den Betriebspunkt 1000 MW/-470 kV. Welche Blindleistung wird jetzt noch benötigt und welche Verzerrungen sind in Strom und Spannung noch zu finden?

10. Aufgabe: Selbstgeführte Umrichter

Ein dreiphasiger Mittelspannungsumrichter mit variabler AC-Ausgangsspannung soll erstmalig in Betrieb genommen werden. Der Umrichter hat eine Taktfrequenz von 4 kHz und eine DC-Spannung von 40 kV. Der Umrichter wird nach dem Verfahren der Raumzeigermodulation gesteuert. Es wird daher ein Wert von $\hat{U}_{AC,Y} = 15\text{ kV}$ eingestellt und die Modulation der Brückenschaltung beobachtet.

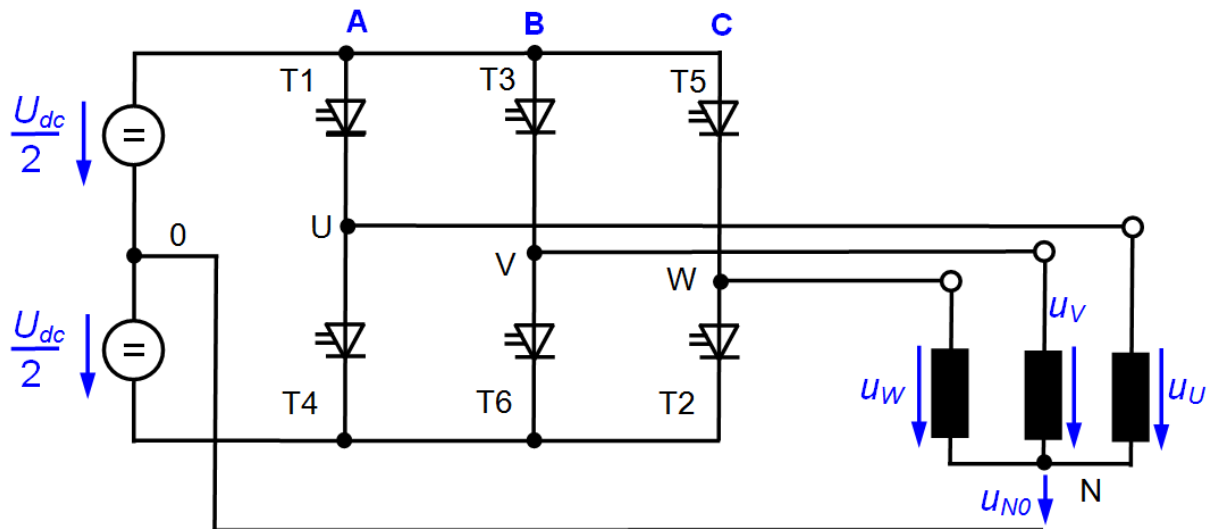


Bild 10.1: Darstellung der selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung

- Ein Analysegerät zeichnet die Ansteuersignale der IGBTs in der für Phase U positiven Spannungshalbwelle exakt 4 ms nach dem Nulldurchgang auf. Welche Schaltzustände werden erwartet und wie ist deren zeitliche Abfolge? Wie lange sind die einzelnen Zustände am Ausgang aktiv?
- Kann der Umrichter bei entsprechender Regelung an ein 20 kV Mittelspannungsnetz angeschlossen werden?

Nun soll ein MMC als symmetrischer Monopol mit $\pm 300\text{ kV}$ ausgelegt werden. Der Aussteuergrad betrage 0,95 bei einer Submodulanzahl von 200 pro Arm. Für ϵ seien 3% anzunehmen.

- Welche Stufenspannung ergibt sich daraus?
- Wie viele Submodule des oberen und unteren Arms sind jeweils eingeschaltet, wenn eine Ausgangsspannung von -100 kV eingestellt werden soll?
- Wie groß ist die Submodulkapazität bei einer Umrichterleistung von 500 MVA zu wählen?

11. Aufgabe: FC-TCR (Thyristor Controlled Reactor)

Ein FC-TCR wird parallel zum 20-kV-Netz (50 Hz) geschaltet. Der FC-TCR ist als Sternschaltung ausgeführt. **Bild 11.1a** zeigt das einphasige Schaltbild. Die Kapazität C des FC-TCR dient gleichzeitig als Filter zur Reduktion der Oberschwingungen in den Netzströmen. Dazu wird die Kapazität C durch das in **Bild 11.1b** dargestellte Filternetzwerk realisiert.

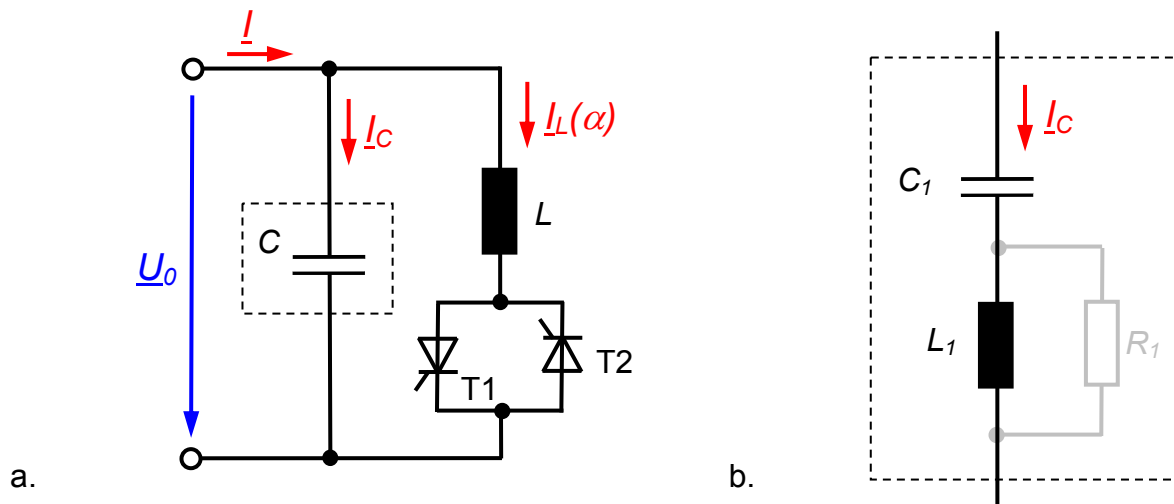


Bild 11.1: a. Schaltung des FC-TCR
b. Schaltung (Realisierung) der Kapazität C

- Wie groß ist die Spannung U_0 in dem einphasigen Schaltbild gemäß **Bild 11.1a**?
- Bestimmen Sie die Kapazität C so, dass bei sperrenden Ventilen T_1 und T_2 eine induktive Blindleistung von $-0,377$ MVar durch den 3-phasigen FC-TCR kompensiert werden kann.
- Das Filter in **Bild 11.1b** soll zur Unterdrückung der 5. Harmonischen im Strom I dimensioniert werden. Der ohmsche Widerstand R_1 kann für die Berechnung vernachlässigt werden. Der Betrag der Impedanz des Filters soll für die 5. Harmonische ein Minimum aufweisen. Ferner soll die Filterimpedanz bei der Grundfrequenz ω_0 den Wert $1/(\omega_0 \cdot C)$ annehmen. Berechnen Sie die Werte für C_1 und L_1 .
- Für den Fall, dass der FC-TCR mit einem Steuerwinkel von $\alpha = 0^\circ$ betrieben wird, soll die erreichbare induktive Kompensationsleistung ebenfalls $0,377$ MVar betragen. Bestimmen Sie die erforderliche Induktivität der Drossel L .
- Für welchen Strom müssen die Ventile T_1 und T_2 mindestens ausgelegt sein? Derzeit sind Thyristoren mit einer maximalen Sperrspannung von 8 kV verfügbar. Wie viele Thyristoren müssen daher mindestens in Reihe geschaltet werden, um die Ventile T_1 und T_2 realisieren zu können?

12. Aufgabe: Erhöhung der Stabilität einer Leitung mit einem TCSC

Eine 100 km lange 110-kV-Freileitung soll einen Verbraucher versorgen, dessen Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ zwischen 0,7 und 0,95 variieren kann. Um die Stabilität der Leitung zu erhöhen, soll die Blindleistung der Leitung mit einem TCSC kompensiert werden.

Folgende Daten der Anlage sind bekannt:

Netz: $f = 50 \text{ Hz}$ $U_r = 110 \text{ kV}$

Leitung: $R' = 0,25 \text{ } \Omega/\text{km}$ $L' = 1,1 \text{ mH/km}$

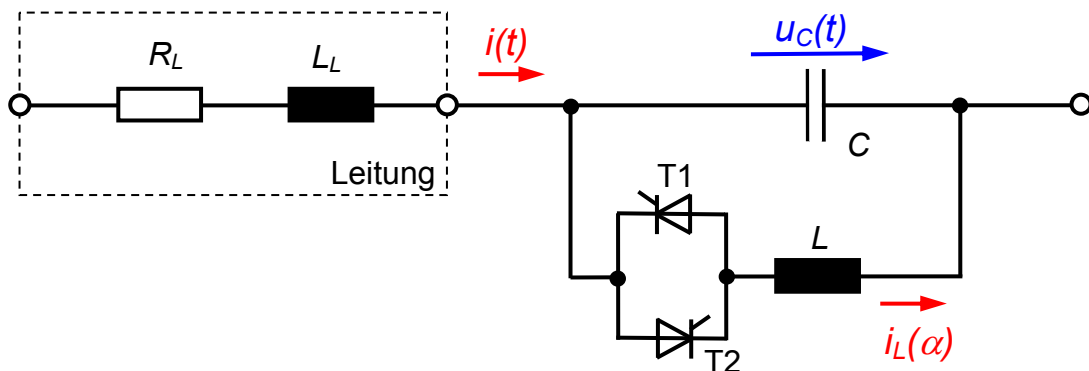


Bild 12.1: Schaltung eines TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

- Bestimmen Sie die notwendige Kapazität des TCSC, um eine vollständige Kompensation des Längsspannungsabfalls an der Leitung mit dem gegebenen $\cos(\varphi)$ der Last zu ermöglichen.
- Welche Induktivität ist erforderlich, damit der Längsspannungsabfall an der Leitung vollständig kompensiert wird für den Fall, dass der Verbraucher die maximal mögliche Wirkleistung aufnimmt? Das Verhältnis X_C/X_L soll dabei in einem Wertebereich zwischen 3 und 6 liegen und die Induktivität soll möglichst kostengünstig in der Herstellung sein. Bestimmen Sie mit Hilfe von **Bild 12.2** den Steuerwinkel β , mit dem die Thyristoren des TCSC angesteuert werden müssen.
- Mit welchem Steuerwinkel β müssen die Thyristoren des TCSC angesteuert werden, damit der Längsspannungsabfall der Leitung bei Speisung eines Verbrauchers mit einer Leistung von 250 MW und einem $\cos(\varphi) = 0,75$ gerade kompensiert wird. Verwenden Sie zur näherungsweisen Bestimmung des Steuerwinkels β die in **Bild 12.2** dargestellte Graphik.
- Welche Blindleistung muss der TCSC hierfür aufbringen und wie groß ist die induktive Blindleistung der Freileitung bei diesem Betrieb?

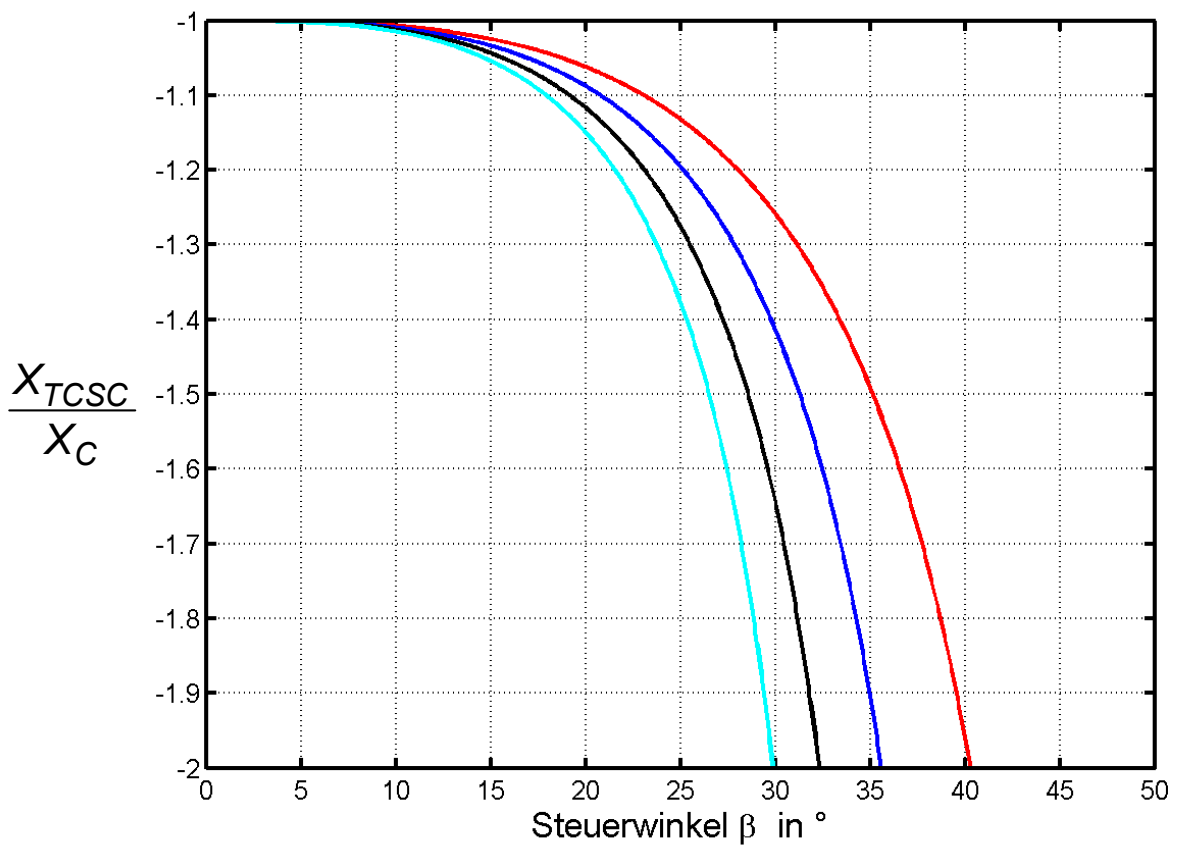
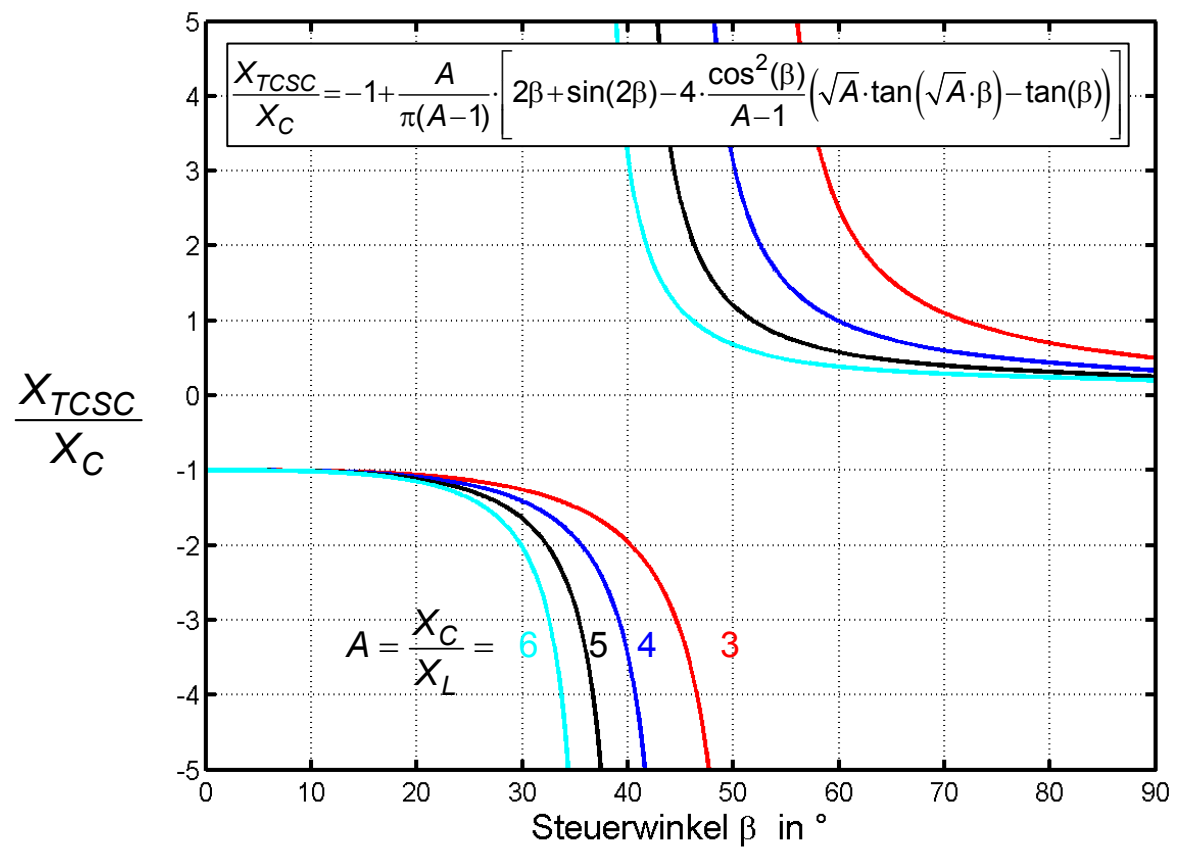


Bild 12.2: Werte der Funktion X_{TCSC}/X_C zur näherungsweisen Bestimmung des Steuerwinkels β eines TCSC

13. Aufgabe: Längskompensation einer Übertragungsleitung mit einem TCSC

Über eine 100 km lange 110-kV-Freileitung wird eine Wirkleistung von 75 MW mit einem Leistungsfaktor des Verbrauchers von $\cos(\varphi) = 0,8$ (induktiv) übertragen. Durch den Einsatz eines TCSC sollen verbesserte Übertragungseigenschaften erreicht werden.

Folgende Daten der Anlage sind bekannt:

$$\begin{aligned} f &= 50 \text{ Hz} & U_r &= 110 \text{ kV} \\ R' &= 0,1 \, \Omega/\text{km} & L' &= 1,3 \text{ mH/km} \end{aligned}$$

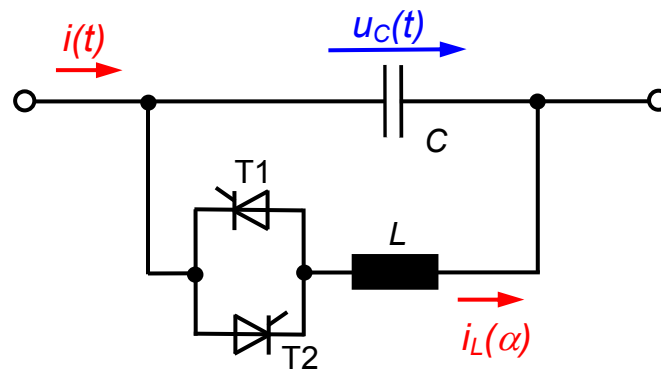


Bild 13.1: Schaltung eines TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

- Durch Reihenkompensation mit dem TCSC soll der Längsspannungsabfall der Leitung zu Null kompensiert werden. Welcher kapazitive Blindwiderstand ist dazu bei gegebener Belastung erforderlich?
- Der TCSC soll mit einer Induktivität von 10 mH realisiert werden. Wie groß ist die Kapazität, wenn $X_C/X_L = 5$ gewählt wird und bei welchem Steuerwinkel β wird der zuvor berechnete kapazitive Widerstand erreicht? Verwenden Sie zur näherungsweisen Bestimmung des Steuerwinkels β die in **Bild 12.2** dargestellte Graphik.
- Gibt es einen minimalen Leistungsfaktor $\cos(\varphi) \geq 0$, bis zu dem eine vollständige Längskompensation der Leitung mit dem so dimensionierten TCSC möglich ist? Bei welchem Steuerwinkel β wird die Leitung bei minimalem Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ vollständig kompensiert. Verwenden Sie zur näherungsweisen Bestimmung des Steuerwinkels β die in **Bild 12.2** dargestellte Graphik.

14. Aufgabe: Strombegrenzer (Short-Circuit Current Limiter, SCCL)

Ein Generator speist über zwei parallel geschaltete Transformatoren ein 400-kV-Netz (Netzfrequenz 50 Hz). Durch einen Short-Circuit Current Limiter (SCCL) soll der Kurzschlussstrom auf die Hälfte des Wertes ohne den SCCL begrenzt werden.

Folgende Daten der Anlage sind bekannt:

	G	T1	T2
S_N [MVA]	1530	740	740
U_N [kV]	27	27/400	27/400
X_d'' oder u_k [%]	0,3653	0,155	0,155

Die Drossel besitzt einen ohmschen Widerstand von $0,15 \, \Omega$.

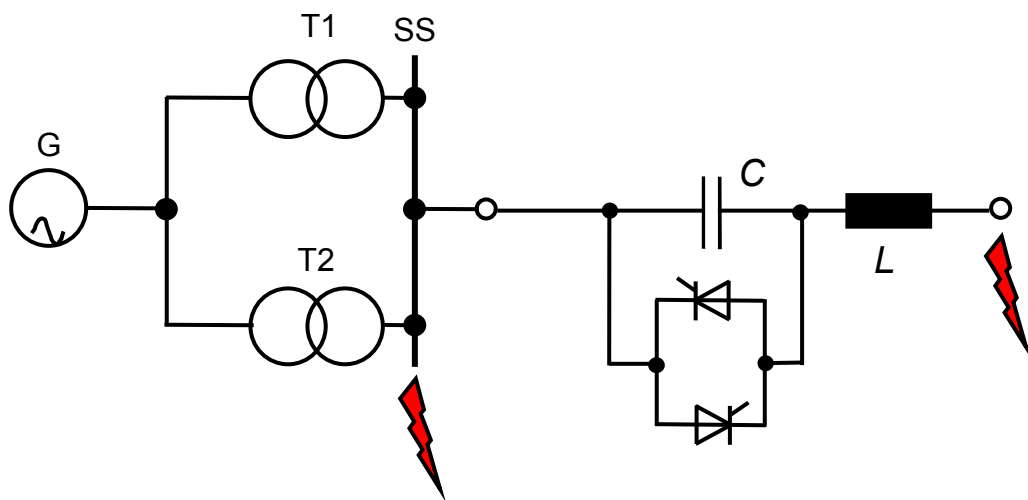


Bild 14.1: Strombegrenzung einer Generatoreinspeisung durch einen SCCL

- Bestimmen Sie die Ersatzimpedanzen des Generators und der Transformatoren.
- Berechnen Sie den Anfangskurzschlusswechselstrom I_k'' bei einem Kurzschluss an der Sammelschiene (SS)

Hinweis:
$$I_k'' = \frac{1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_{res}}$$

- Welche Induktivität L muss die Drossel aufweisen, wenn der Anfangskurzschlusswechselstrom I_k'' auf den halben Wert des Stromes vor dem SCCL verringert werden soll. Wie groß ist dann die Kapazität C zu wählen?
- Welche Spannungen fallen an der Kapazität C und der Induktivität L ab, wenn die Einspeisung mit maximaler Leistung erfolgt? Wie groß ist der Spannungsabfall an der Induktivität L im Kurzschlussfall?
- Welche Verlustleistung P_V entsteht an der Drossel, wenn die Einspeisung mit maximaler Leistung P_{max} erfolgt? Wie hoch ist der prozentuale Anteil der Verlustleistung in Bezug auf die maximal eingespeiste Leistung $[(P_V/P_{max}) \cdot 100\%]$?

15. Netzregelung: Primärregelung

In dem Umspannwerk eines großen Industriegebietes speisen 3 Generatoren nahe gelegener Kraftwerke ein. Die Sammelschiene 3 ist mit einer Längskupplung S4 ausgestattet, die im Normalschaltzustand geöffnet ist. Die Kraftwerke 1 und 2 speisen ein großes Walzwerk im Industriegebiet, welches durch P_{L1} abgebildet ist. Ein weiterer Industrieverbraucher P_{L2} kann hinzugeschaltet werden. Abbildung 15.1 zeigt das Schema des Energieversorgungssystems.

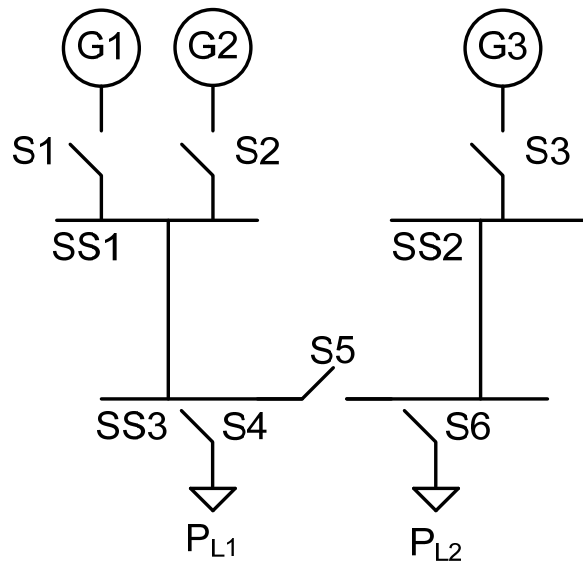


Abbildung 15.1: Netzschema Energieversorgung

Nennfrequenz: $f_0 = 50 \text{ Hz}$:

Nennleistungen der Generatoren bei f_0

$$P_{G10} = 20 \text{ MW}$$

$$P_{G20} = 50 \text{ MW}$$

$$P_{G30} = 15 \text{ MW}$$

Generatorleistung bei f_1 :

$$P_{G11} = 30 \text{ MW}$$

$$P_{G21} = 70 \text{ MW}$$

Nennleistungen der Verbraucher bei f_0 :

$$P_{L1} = 70 \text{ MW, frequenzunabhängig}$$

$$P_{L2} = 10 \text{ MW, } D=10\text{MW/Hz}$$

- Die Leistungsabgabe der Generatoren bei $f_1 = 49,5 \text{ Hz}$ ist bekannt. Zeichnen Sie das f/P Kennliniendiagramm der Generatoren 1 & 2. Bestimmen Sie jeweils die Generatorleistungszahlen.
- Bestimmen Sie die resultierende Generatorkennlinie sowie die Gesamtleistungszahl.

- c) Schalter 1,2 und 4 sind geschlossen. Schalter 3, 5 und 6 geöffnet. Die Last an P_{L1} erhöht sich auf 85 MW. Welche resultierende Netzfrequenz f_2 stellt sich ein? Welche Primärregelanteile übernehmen die jeweiligen Generatoren?
- d) Die Schalter 1,2 und 4 sind geschlossen, Schalter 3,5 und 6 sind offen. die Netzfrequenz beträgt 50 Hz. Last 1 ist wieder auf 70 MW zurückgegangen. Durch Schließen von Schalter 5 und 6 wird die Last L2 jetzt ebenfalls über die Generatoren 1 und 2 versorgt. Welche Netzfrequenz stellt sich jetzt ein? Welche Leistungsanteile werden wie aufgebracht?
- e) Bis auf Schalter 6 sind nun alle Schalter geschlossen, die Netzfrequenz beträgt wieder 50 Hz. Alle drei Generatoren und Last 1 sind am Netz. Last 2 wird zugeschaltet, was zu einer Frequenzabsenkung um 0,125 Hz führt. Welche Leistungszahl weist Generator 3 auf?

16. Primärregelung im Netzverbund

Ein Verbundnetz besteht aus drei einzelnen Netzgebieten, welche über eigene Kraftwerkskapazitäten verfügen. In Netzabschnitt N2 befindet sich zudem der Hauptverbraucher des Netzverbundes. Abbildung 16.1 zeigt die Verschaltung des Netzverbundes.

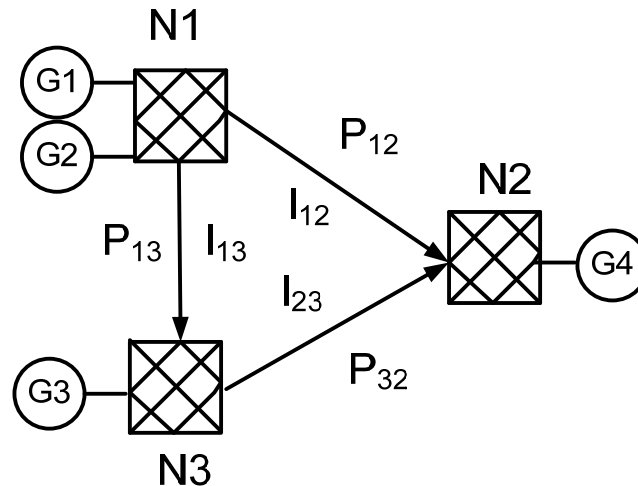


Abbildung 16.1: Netzverbund aus 3 Netzabschnitten

Die Leitungen weisen folgende Längen auf:

$$l_{12}=150 \text{ km}$$

$$l_{23}=70 \text{ km}$$

$$l_{31}=50 \text{ km}$$

Kenndaten der Netzabschnitte:

Netz 1: $K_{G1}=100 \text{ MW/Hz}$; $K_{G2}=200 \text{ MW/Hz}$

Netz 2: $K_2=100 \text{ MW/Hz}$ (resultierende Netzkennlinie)

Netz 3: $K_3=100 \text{ MW/Hz}$; $P_{G3}=100 \text{ MW}$

- Die Netzfrequenz beträgt 50 Hz. Es kommt zum Ausfall des Generators G3 in Netzabschnitt N3. Welche Frequenz resultiert durch die Primärregelungen?
- Welche Anteile der Primärregelungsleistung decken in Netz 1 die Generatoren G1, G2 und der Netzabschnitt N2 nach dem Ausfall?