



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme

The background image shows a close-up of a large yellow sunflower in the foreground on the left. Behind it, a field of solar panels is visible, and in the distance, three white wind turbines stand against a bright blue sky with scattered white clouds.

GRUNDLAGEN DER ELEKTRISCHEN ENERGIETECHNIK

Teil 1, Übung 4 - Einspeisung eines Drehstrom-Synchrongenerators

Dr.-Ing. Jonas Wussow, 13.05.2022

Aufgaben aus der Vorlesung (I)

a) Umdrehungszahl $n = 3000 \frac{1}{\text{min}} = 50 \frac{1}{\text{s}}$

Netzfrequenz ist entscheidend, da die Synchronmaschine am Netz läuft. Fluss ändert sich mit der Netzfrequenz. $f_N = n \cdot p$ ($p = \text{Polpaarzahl}$)

Wäre die Drehzahl geringer, müsste die Polpaarzahl größer sein, sonst könnte die Maschine nicht am Netz laufen. → Umdrehungszahl irrelevant für den Fluss.

$$U_P = 24 \text{ kV} \cdot e^{j20^\circ}$$

$$U_P = 22,6 \text{ kV} + j \cdot 8,2 \text{ kV}$$

$$\underline{U} = \frac{j\omega\phi}{\sqrt{2}}$$

$$\phi_P = \frac{\underline{U} \cdot \sqrt{2}}{j \cdot \omega} = \frac{-j \cdot \underline{U} \cdot \sqrt{2}}{\omega}$$

$$\phi_P = \frac{-j \cdot (22,6 \text{ kV} + j \cdot 8,2 \text{ kV}) \cdot \sqrt{2}}{\omega} = \frac{(+8,2 \text{ kV} - j \cdot 22,6 \text{ kV}) \cdot \sqrt{2}}{\omega}$$

$$\phi_P = \frac{24 \text{ kV} \cdot e^{-j70^\circ} \cdot \sqrt{2}}{\omega} = \frac{33,9 \text{ kV} \cdot e^{-j70^\circ}}{\omega} = 108 \text{ Vs} \cdot e^{-j70^\circ} = \mathbf{108 \text{ Wb} \cdot e^{-j70^\circ}}$$

Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

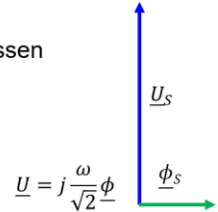
Polradspannung $\underline{U}_{P,Y} = 24 \text{ kV} \cdot e^{20^\circ}$

Ständerspannung $\underline{U}_{S,Y} = 20 \text{ kV}$

Umdrehungsgeschwindigkeit 3000 pro Minute

Netzfrequenz 50 Hz

- Bestimmen Sie den Magnetfluss durch das Polrad und die Ständerwicklungen
- Zeichnen Sie ein Zeigerdiagramm mit den beiden Flüssen im Magnetkreis



Aufgaben aus der Vorlesung (I)

$$U_S = 20 \text{ kV} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$U_S = 20 \text{ kV} + j \cdot 0$$

$$\underline{U} = \frac{j\omega\phi}{\sqrt{2}}$$

$$\phi_S = \frac{\underline{U} \cdot \sqrt{2}}{j \cdot \omega} = \frac{-j \cdot \underline{U} \cdot \sqrt{2}}{\omega}$$

$$\phi_S = \frac{-j \cdot (20 \text{ kV} + j \cdot 0) \cdot \sqrt{2}}{\omega} = \frac{(0 - j \cdot 20 \text{ kV}) \cdot \sqrt{2}}{\omega}$$

$$\phi_S = \frac{-j \cdot 28,28 \text{ kV}}{\omega} = \frac{28,28 \text{ kV} \cdot e^{-j90^\circ}}{\omega} = 90 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot e^{-j90^\circ} = \mathbf{90 \text{ Wb} \cdot e^{-j90^\circ}}$$

Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

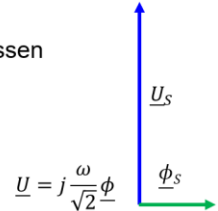
Polradspannung $\underline{U}_{p,Y} = 24 \text{ kV} \cdot e^{20^\circ}$

Ständerspannung $\underline{U}_{s,Y} = 20 \text{ kV}$

Umdrehungsgeschwindigkeit 3000 pro Minute

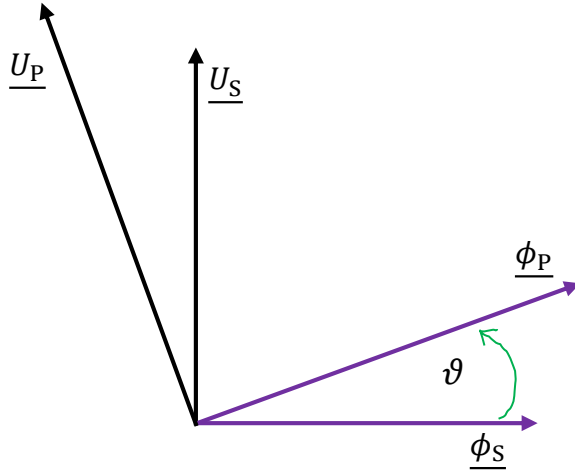
Netzfrequenz 50 Hz

- Bestimmen Sie den Magnetfluss durch das Polrad und die Ständerwicklungen
- Zeichnen Sie ein Zeigerdiagramm mit den beiden Flüssen im Magnetkreis



Aufgaben aus der Vorlesung (I)

b) $\underline{\phi}_P = 108 \text{ Wb} \cdot e^{-j70^\circ}$
 $\underline{\phi}_S = 90 \text{ Wb} \cdot e^{-j90^\circ}$



Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

Polradspannung $\underline{U}_{P,Y} = 24 \text{ kV} \cdot e^{20^\circ}$

Ständerspannung $\underline{U}_{S,Y} = 20 \text{ kV}$

Umdrehungsgeschwindigkeit 3000 pro Minute

Netzfrequenz 50 Hz

- Bestimmen Sie den Magnetfluss durch das Polrad und die Ständerwicklungen
- Zeichnen Sie ein Zeigerdiagramm mit den beiden Flüssen im Magnetkreis

A coordinate system with a vertical blue axis labeled \underline{U}_S and a horizontal green axis labeled $\underline{\phi}_S$. To the left of the origin, the equation $\underline{U} = j \frac{\omega}{\sqrt{2}} \underline{\phi}$ is written.

Aufgaben aus der Vorlesung (II)

a) $U_{S\lambda} = 20 \text{ kV}$

$$I_{S\lambda} = \frac{S}{3 \cdot U_{S\lambda}} = \frac{600 \text{ MVA}}{3 \cdot 20 \text{ kV}} = \mathbf{10 \text{ kA}}$$

b) $x_d = \frac{X_d \cdot I_{S\lambda}}{U_{S\lambda}}$

$$X_d = \frac{x_d \cdot U_{S\lambda}}{I_{S\lambda}} = \frac{1,5 \cdot 20 \text{ kV}}{10 \text{ kA}} = \mathbf{3 \Omega}$$

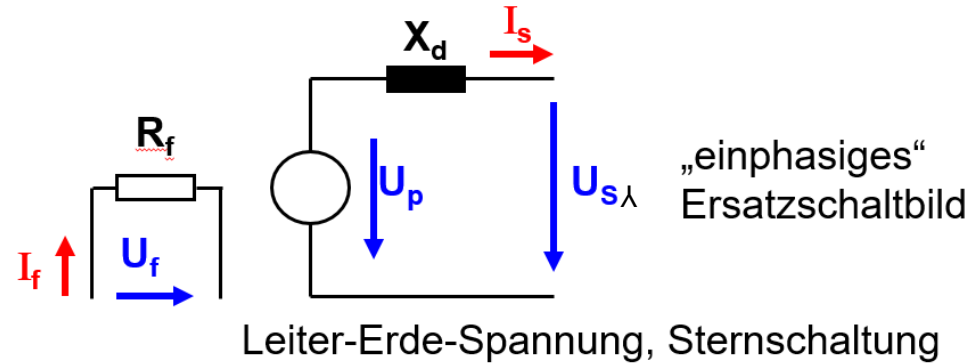
Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

Scheinleistung $S = 600 \text{ MVA}$

Betriebsspannung $U_S = 20 \text{ kV}$

Relative synchrone Reaktanz $x_d = 1,5$

- Bestimmen Sie bitte den Ständerstrom!
- Wie groß ist die synchrone Reaktanz (Blindwiderstand) ?



Aufgaben aus der Vorlesung

III. Was beschreibt der Polradwinkel?

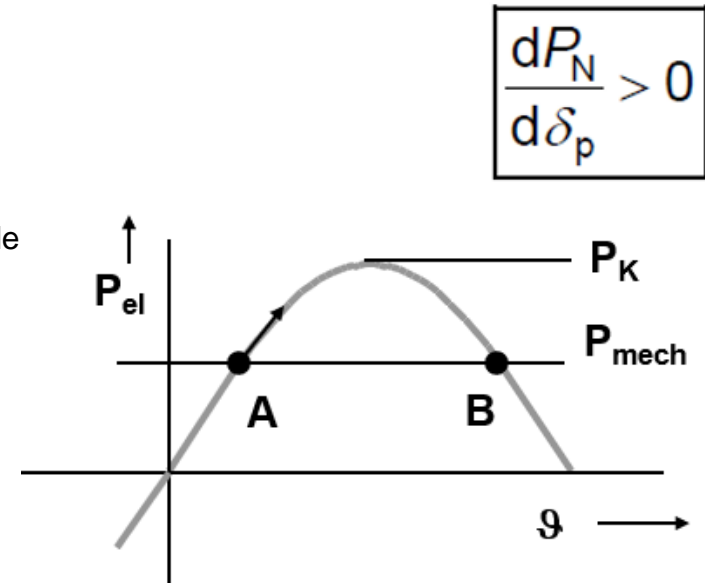
- Elektrische Verschiebung zwischen Polrad- und Netzspannung

IV. Was ist das Kippmoment?

- Stabilitätsgrenze bei Polradwinkel von 90°
- Übersteigt das Turbinenmoment das Kippmoment beschleunigt de

V. Wie erhält man aus dem Kippmoment die Kippleistung?

- $P_G = M_G \cdot \omega_{\text{mech}}$



Aufgaben aus der Vorlesung (VI)

$$U_{S\lambda} = 20 \text{ kV}$$

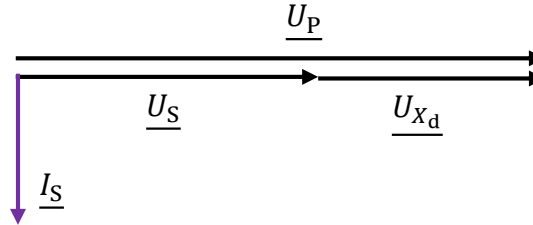
$$X_d = \frac{x_d U_{\Delta}^2}{S} = \frac{1,5 \cdot (20 \text{ kV} \cdot \sqrt{3})^2}{600 \text{ MVA}} = 3 \Omega$$

$$I_{S\lambda} = \frac{S}{3 \cdot U_{S\lambda}} = \frac{300 \text{ Mvar}}{3 \cdot 20 \text{ kV}} = 5 \text{ kA induktiv also } -j \cdot 5 \text{ kA}$$

$$\underline{U}_{X_d} = jX_d \cdot \underline{I}_{S\lambda} = j3 \Omega \cdot (-j5 \text{ kA}) = 15 \text{ kV} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_P = \underline{U}_{X_d} + \underline{U}_{S\lambda} = 15 \text{ kV} + 20 \text{ kV} = 35 \text{ kV}$$

$$X_d = \frac{x_d U_{\Delta}^2}{S_n}$$

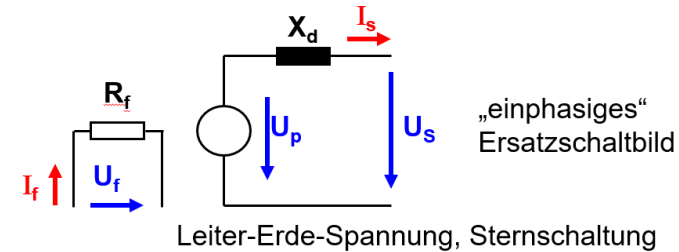


Ein Kraftwerk mit einem 600 MVA Generator mit $x_d = 1,5$ liefert an den Ständeranschlüssen eine induktive Blindleistung von 300 Mvar.

Die Ständer-Stern-Spannung beträgt 20 kV.

Zeichnen sie das Zeigerdiagramm und rechnen sie in kartesischen Koordinaten.

- Bestimmen Sie den Ständerstrom
- Wie groß ist die Spannung an der synchronen Reaktanz?
- Welche Polradspannung ist am Generator einzustellen?
- Wie groß ist der Polradwinkel ϑ ?



Aufgaben aus der Vorlesung (VII)

a) $P = 100 \text{ MW}$, $U_{\Delta} = 380 \text{ kV}$, $U_{\lambda} = 219,4 \text{ kV}$

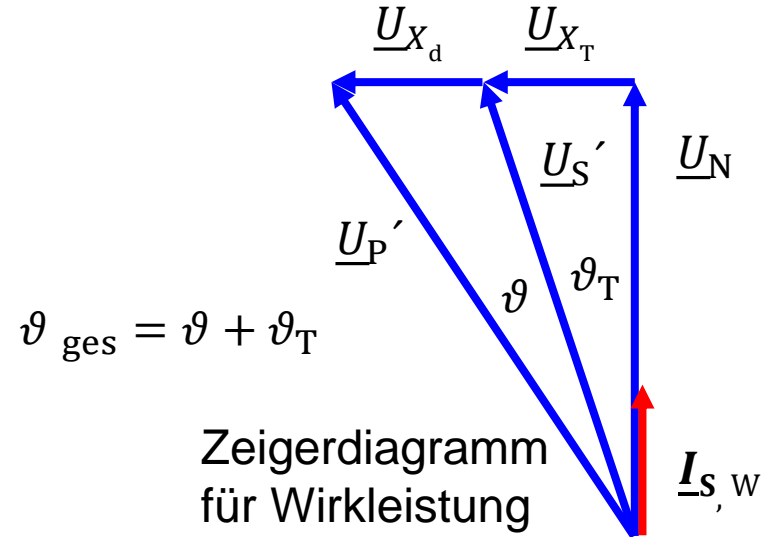
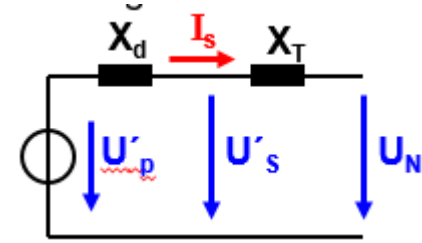
$$I_{\lambda, W} = \frac{P}{3 \cdot U_{N\lambda}} = \frac{100 \text{ MW}}{3 \cdot \frac{380 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} = \mathbf{151,9 \text{ A}}$$

b) $X_T = \frac{u_k U_{\Delta}^2}{S}$ $X_T = \frac{u_k U_{\Delta}^2}{S} = \frac{0,1 \cdot (380 \text{ kV})^2}{630 \text{ MVA}} = 22,9 \Omega$

$$\underline{U_{X_T, W}} = I_{\lambda, W} \cdot jX_T = 151,9 \text{ A} \cdot j22,9 \Omega = j3,48 \text{ kV}$$

$$X_d = \frac{x_d U_{\Delta}^2}{S} \quad X_d = \frac{x_d U_{\Delta}^2}{S} = \frac{1,5 \cdot (380 \text{ kV})^2}{600 \text{ MVA}} = 361 \Omega$$

$$\underline{U_{X_d, W}} = I_{\lambda, W} \cdot jX_d = 151,9 \text{ A} \cdot j361 \Omega = j54,8 \text{ kV}$$



Aufgaben aus der Vorlesung (VII)

a) $Q = 100 \text{ Mvar}$, $U_{\Delta} = 380 \text{ kV}$, $U_{\lambda} = 219,4 \text{ kV}$

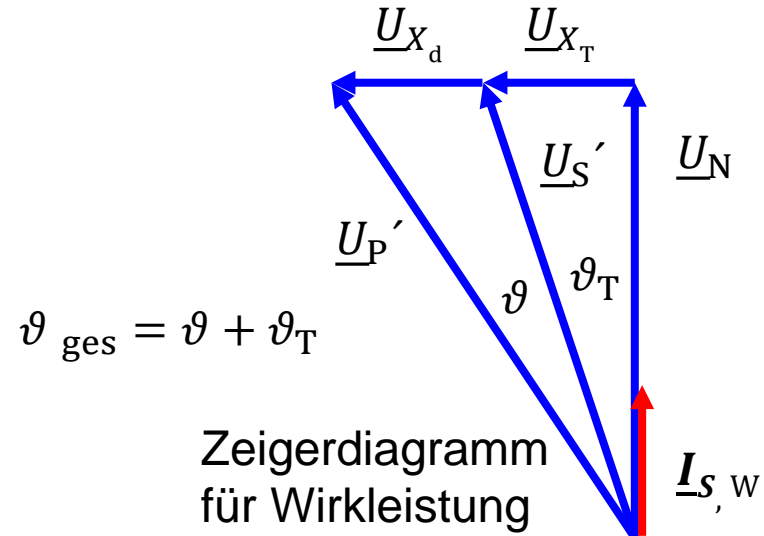
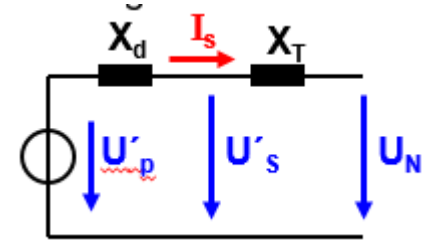
$$I_{\lambda,B} = \frac{Q}{3 \cdot U_{N\lambda}} = \frac{100 \text{ Mvar}}{3 \cdot \frac{380 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} = \mathbf{151,9 \text{ A}}$$

b) $X_T = \frac{u_k U_{\Delta}^2}{S}$ $X_T = \frac{u_k U_{\Delta}^2}{S} = \frac{0,1 \cdot (380 \text{ kV})^2}{630 \text{ MVA}} = 22,9 \Omega$

$$\underline{U}_{X_{T,B}} = j I_{\lambda,B} \cdot j X_T = j 151,9 \text{ A} \cdot j 22,9 \Omega = -3,48 \text{ kV}$$

$$X_d = \frac{x_d U_{\Delta}^2}{S} \quad X_d = \frac{x_d U_{\Delta}^2}{S} = \frac{1,5 \cdot (380 \text{ kV})^2}{600 \text{ MVA}} = 361 \Omega$$

$$\underline{U}_{X_{d,B}} = j I_{\lambda,B} \cdot j X_d = j 151,9 \text{ A} \cdot j 361 \Omega = -54,8 \text{ kV}$$



Aufgaben aus der Vorlesung (VII)

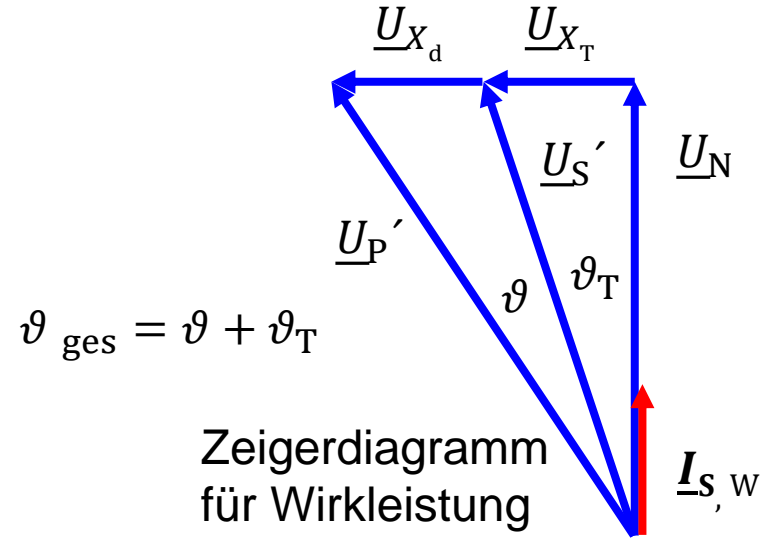
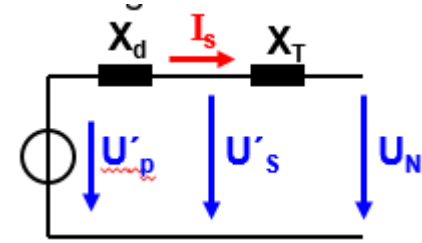
$$\underline{U}_S' = \underline{U}_{N\lambda} + \underline{U}_{X_T,W} + \underline{U}_{X_T,B} = 219,4 \text{ kV} + j3,48 \text{ kV} - 3,48 \text{ kV} = 215,9 \text{ kV} + j3,48 \text{ kV} = 215,9 \text{ kV} \cdot e^{j0,9^\circ}$$

$$\vartheta_T = 0,9^\circ$$

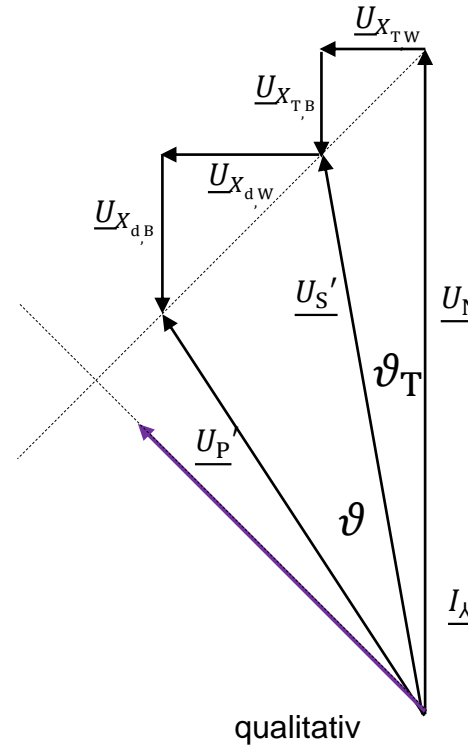
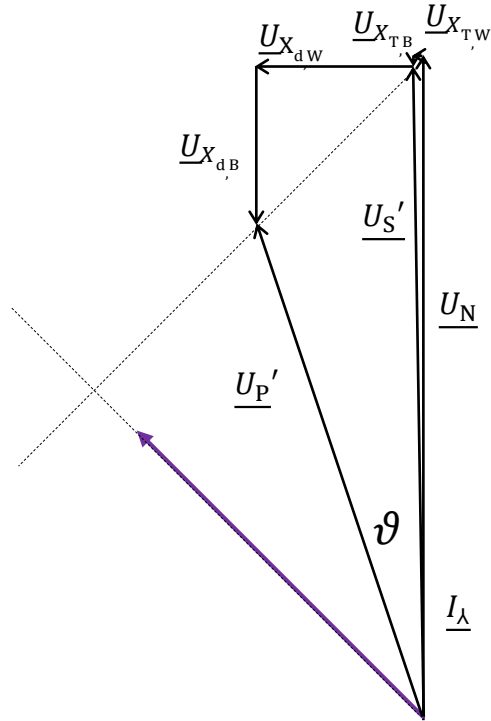
$$\begin{aligned} \text{c) } \underline{U}_P' &= \underline{U}_S' + \underline{U}_{X_d,W} + \underline{U}_{X_d,B} = 215,9 \text{ kV} + j3,48 \text{ kV} - 54,8 \text{ kV} + j54,8 \text{ kV} \\ &= 161 \text{ kV} + j58,3 \text{ kV} = 171,3 \text{ kV} \cdot e^{j19,9^\circ} \end{aligned}$$

$$\text{d) } \vartheta_{\text{ges}} = 19,9^\circ$$

$$\vartheta = 19,9^\circ - 0,9^\circ = 19^\circ$$



Aufgaben aus der Vorlesung (VII)



e) Trafo hat kaum Einfluss auf Übertragungswinkel

Aufgabe 4a

Welche Wirk- und Blindleistung nimmt ein Verbraucher am Leitungsende ab, wenn am Leitungsanfang bei $U_1 = 110 \text{ kV}$ eine Scheinleistung $S_1 = 50 \text{ MVA}$ bei $\cos\varphi = 0,8$ (induktiv) eingespeist wird?

$$P_2 = S_2 \cdot \cos\varphi_2 = 3 \cdot U_{2Y} \cdot I \cdot \cos\varphi_2$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin\varphi_2 = 3 \cdot U_{2Y} \cdot I \cdot \sin\varphi_2$$

$$\underline{U}_{1Y} = \underline{I} \cdot (jX + R) + \underline{U}_{2Y} \rightarrow \underline{U}_{2Y} = \underline{U}_{1Y} - \underline{I} \cdot (jX + R) = \underline{U}_{1Y} - \underline{U}_X - \underline{U}_R$$

$$X = \omega L' \cdot l = 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 200 \text{ km} = 80 \Omega$$

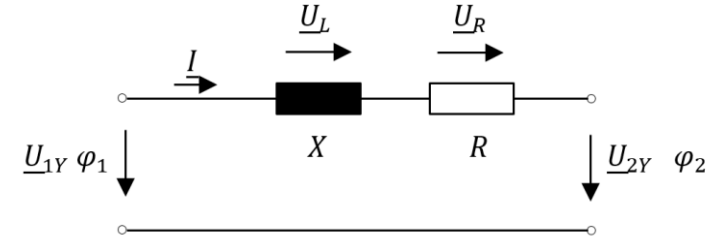
$$R = R' \cdot l = 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 200 \text{ km} = 20 \Omega$$

$$\cos\varphi_1 = 0,8 \rightarrow \varphi_1 = \arccos 0,8 = 36,9^\circ$$

Eine 200 km lange 110-kV-Drehstrom-Freileitung hat die Leitungsbeläge:

$$R' = 0,1 \Omega/\text{km}$$

$$\omega L' = 0,4 \Omega/\text{km}$$



„Einspeisung bei $\cos\varphi$ “: Es besteht bereits ein Versatz von Strom und Spannung; wenn $\varphi_u = 0^\circ$, dann $\varphi_i = -\varphi$

Aufgabe 4a

$$I = \frac{S_1}{\sqrt{3} \cdot U_{1\Delta}} = \frac{50 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV}} = 262 \text{ A}$$

$$\underline{I} = 262 \text{ A} \cdot e^{-j36,9^\circ} = 209,52 \text{ A} - j 157,31 \text{ A}$$

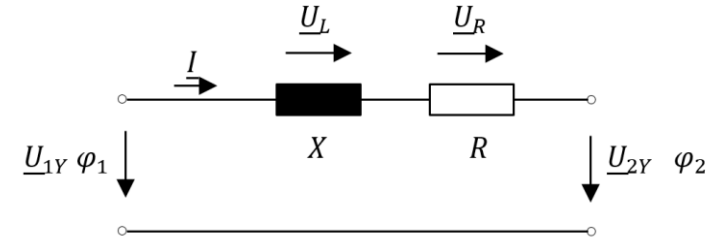
$$\underline{U}_X = j X \cdot \underline{I} = 80 \Omega \cdot e^{j90^\circ} \cdot 262 \text{ A} \cdot e^{-j36,9^\circ} = 21 \text{ kV} \cdot e^{j53,1^\circ} = 12,6 \text{ kV} + j 16,8 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_R = R \cdot \underline{I} = 20 \Omega \cdot e^{j0^\circ} \cdot 262 \text{ A} \cdot e^{-j36,9^\circ} = 5,24 \text{ kV} \cdot e^{-j36,9^\circ} = 4,2 \text{ kV} - j 3,1 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{2Y} = \underline{U}_{1Y} - \underline{U}_X - \underline{U}_R = 63,5 \text{ kV} - (12,6 \text{ kV} + j 16,8 \text{ kV}) - (4,2 \text{ kV} - j 3,1 \text{ kV})$$

$$\underline{U}_{2Y} = 46,7 \text{ kV} - j 13,7 \text{ kV} = 48,7 \text{ kV} \cdot e^{-j16,3^\circ}$$

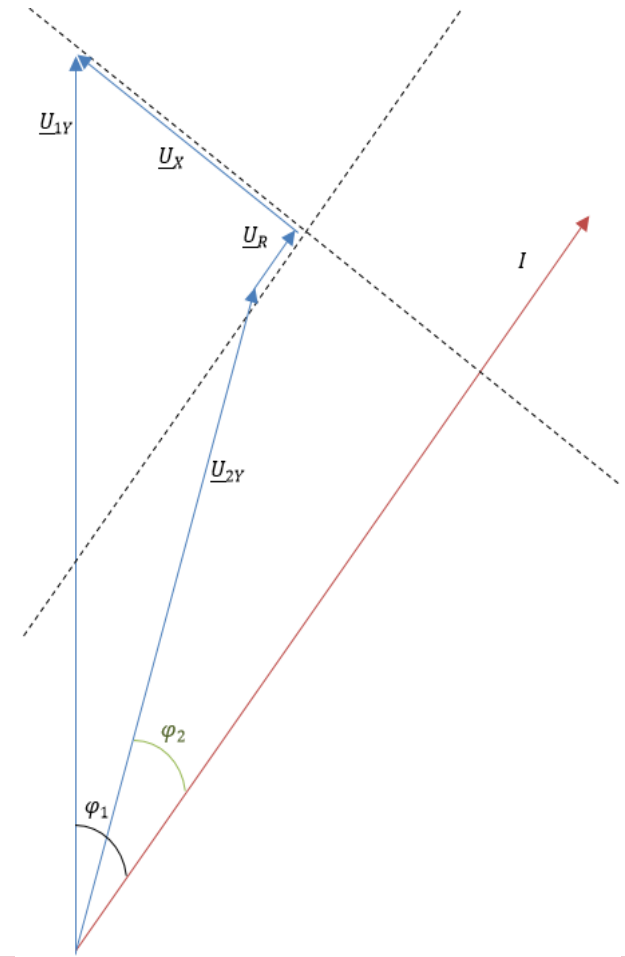
$$\varphi_2 = \varphi_{U_2} - \varphi_I = -16,3^\circ + 36,9^\circ = 20,6^\circ$$



Aufgabe 4a

$$P_2 = S_2 \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot U_{2Y} \cdot I \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 48,7 \text{ kV} \cdot 262 \text{ A} \cdot \cos 20,6^\circ = 35,8 \text{ MW}$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin \varphi_2 = 3 \cdot U_{2Y} \cdot I \cdot \sin \varphi_2 = 3 \cdot 48,7 \text{ kV} \cdot 262 \text{ A} \cdot \sin 20,6^\circ = 13,5 \text{ Mvar}$$



Aufgabe 4b

Welche Wirk- und Blindleistung gibt der Generator an seinen Klemmen ab, wenn bei einem gesamten Übertragungswinkel von 45° in das Netz nur Wirkleistung eingespeist werden soll?

$$P_G = 3 \cdot U_{GY} \cdot I \cdot \cos \varphi_G \quad \varphi_G = \text{Winkel zwischen } U_{\text{NetzY}} \text{ und } \underline{U}_{GY}$$

$$Q_G = 3 \cdot U_{GY} \cdot I \cdot \sin \varphi_G$$

Berechnung von U_{GY} , φ_G über Maschenregel (2. Kirchhoffsches Gesetz):

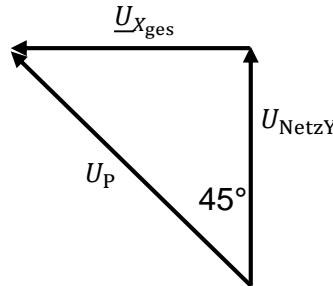
$$\underline{U}_{GY} = \underline{I} \cdot j(X_T + X_{FL}) + \underline{U}_{\text{NetzY}}$$

Berechnung des Spannungsfalls $U_{X_{ges}}$:

U und I Netz in Phase. U_x eilt 90° vor

Aus $\varphi [\angle \underline{U}_{X_{ges}}, \underline{U}_{\text{NetzY}}] = 90^\circ$ folgt

$$U_{X_{ges}} = U_{\text{NetzY}} \cdot \tan(45^\circ) = 63,5 \text{ kV}$$



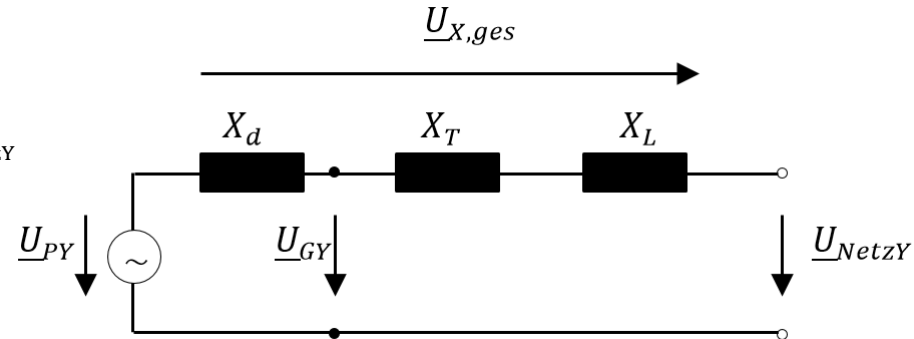
Die beschriebene Leitung diene zur Anbindung eines Drehstrom-Synchrongenerators

($U_n = 20 \text{ kV}$, $S_n = 40 \text{ MVA}$, $x_d = 100 \%$)

über einen Drehstromtransformator

($20/110 \text{ kV}$, $S_n = 40 \text{ MVA}$, $u_k = 15 \%$)

an ein starres Netz ($U_{\text{netz}} = 110 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$).



Aufgabe 4b

Berechnung von I über
Spannungsabfall und Impedanz:

$$I = \frac{U_{X_{\text{ges}}}}{X_{\text{ges}}}$$

$$X_{\text{FL}} = 80 \, \Omega \quad (X \text{ aus a)})$$

$$X_{\text{d}} = x_{\text{d}} \cdot \frac{U^2}{S_{\text{n}}} = 1 \cdot \frac{(110 \, \text{kV})^2}{40 \, \text{MVA}} = 302,5 \, \Omega$$

$$X_{\text{T}} = u_{\text{k}} \cdot \frac{U^2}{S_{\text{n}}} = 0,15 \cdot \frac{(110 \, \text{kV})^2}{40 \, \text{MVA}} = 45,4 \, \Omega$$

$$X_{\text{ges}} = X_{\text{d}} + X_{\text{T}} + X_{\text{FL}} = 427,9 \, \Omega$$

$$I = \frac{U_{X_{\text{ges}}}}{X_{\text{ges}}} = \frac{63,5 \, \text{kV}}{427,9 \, \Omega} = 148,4 \, \text{A}$$

$$u_{\text{k}} = \frac{U_{\text{k}}}{U} \cdot 100 \, \% \quad \text{Bezug: Außenleiter}$$

Beim Kurzschlussversuch gilt:

$$U_{\text{k}} = X_{\text{T}} \cdot I$$

$$\rightarrow X_{\text{T}} = \frac{U_{\text{k}}}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{U_{\text{k}}}{\sqrt{3} \cdot S} \sqrt{3} \cdot U = \frac{u_{\text{k}} \cdot U^2}{S}$$

$$X_{\text{d}} = x_{\text{d}} \cdot \frac{U^2}{S_{\text{n}}} \text{ aus:}$$

$$x_{\text{d}} = \frac{I_{\text{S}}}{U_{\text{S}}} \cdot X_{\text{d}} = \frac{S}{3 \cdot U_{\text{S}}^2} \cdot X_{\text{d}}$$

$$\rightarrow X_{\text{d}} = 3 \cdot \frac{U_{\text{S}}^2}{S} \cdot x_{\text{d}} = \frac{3 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}{S} \cdot x_{\text{d}}$$

$$\rightarrow X_{\text{d}} = \frac{U^2}{S} \cdot x_{\text{d}}$$

Aufgabe 4b

Aus $\varphi [\angle \underline{U}_{\text{NetzY}}, \underline{I}] = 0^\circ$ folgt $\underline{I} = 148,4 \text{ A} \cdot e^{j0^\circ}$

$$\underline{U}_{\text{GY}} = \underline{I} \cdot j(X_{\text{T}} + X_{\text{FL}}) + \underline{U}_{\text{NetzY}}$$

$$= 148,4 \text{ A} \cdot j(45,5 \Omega + 80 \Omega) + 63,5 \text{ kV} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$= 148,4 \text{ A} \cdot 125,4 \Omega \cdot e^{j90^\circ} + 63,5 \text{ kV} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$= 18,6 \text{ kV} \cdot e^{j90^\circ} + 63,5 \text{ kV} \cdot e^{j0^\circ} = 63,5 \text{ kV} + j18,6 \text{ kV}$$

$$= 66,2 \text{ kV} \cdot e^{j16,3^\circ}$$

$$\rightarrow \varphi_{\text{G}} = 16,3^\circ$$

$$P_{\text{G}} = 3 \cdot U_{\text{GY}} \cdot I \cdot \cos \varphi_{\text{G}} = 3 \cdot 66,2 \text{ kV} \cdot 148,4 \text{ A} \cdot \cos(16,3^\circ) = 28,3 \text{ MW}$$

$$Q_{\text{G}} = 3 \cdot U_{\text{GY}} \cdot I \cdot \sin \varphi_{\text{G}} = 3 \cdot 66,2 \text{ kV} \cdot 148,4 \text{ A} \cdot \sin(16,3^\circ) = 8,3 \text{ Mvar}$$

Aufgabe 4b

Zeigerdiagramm (Maßstab: 5 kV = 1 cm)

