Technische Universität Braunschweig

Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme

Grundlagen der elektrischen Energietechnik
Teil 1: Grundlagen der Energieversorgung
Übung 4 - Einspeisung eines Drehstrom-Synchrongenerators

Johanna Grobler | 25.04.2024

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. $f_\text{N} = n \cdot p \ (p = Polpaarzahl)$

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

$$U_\text{P} = 24\text{ kV} \cdot \text{e}^{\text{j}20°}$$

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

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

$$\underline{\phi_\text{P}} = \frac{\underline{U}\cdot\sqrt{2}}{j\cdot\omega} = \frac{-j\cdot\underline{U}\cdot\sqrt{2}}{\omega}$$

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

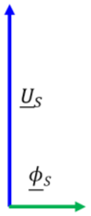
$$\underline{\phi_\text{P}} = \frac{24\text{ kV}\cdot\text{e}^{-\text{j}70°}\cdot\sqrt{2}}{\omega} = \frac{33{,}9\text{ kV}\cdot\text{e}^{-\text{j}70°}}{\omega} = 108\text{ Vs}\cdot\text{e}^{-\text{j}70°} = \mathbf{108\text{ Wb}\cdot\text{e}^{-\text{j}70°}}$$

Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

- Polradspannung $\underline{U}_{P,Y} = 24\ kV \cdot e^{20°}$
- Ständerspannung $\underline{U}_{S,Y} = 20\ kV$
- 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

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



Aufgaben aus der Vorlesung (I)

$$U_S = 20\ \mathrm{kV}\ \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}0°}$$

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

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

$$\underline{\phi}_S = \frac{\underline{U}\cdot\sqrt{2}}{\mathrm{j}\cdot\omega} = \frac{-\mathrm{j}\cdot\underline{U}\cdot\sqrt{2}}{\omega}$$

$$\underline{\phi}_S = \frac{-\mathrm{j}\cdot(20\ \mathrm{kV}+\mathrm{j}\cdot 0)\cdot\sqrt{2}}{\omega} = \frac{(0-\mathrm{j}\cdot 20\ \mathrm{kV})\cdot\sqrt{2}}{\omega}$$

$$\underline{\phi}_S = \frac{-\mathrm{j}\cdot 28{,}28\ \mathrm{kV}}{\omega} = \frac{28{,}28\ \mathrm{kV}\cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}90°}}{\omega} = 90\ \mathrm{V}\cdot\mathrm{s}\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}90°} = \mathbf{90\ Wb\cdot e^{-j90°}}$$

Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

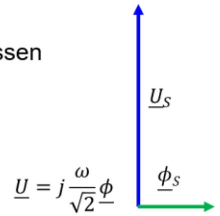
Polradspannung $\underline{U}_{P,Y} = 24\ kV \cdot e^{20°}$

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

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

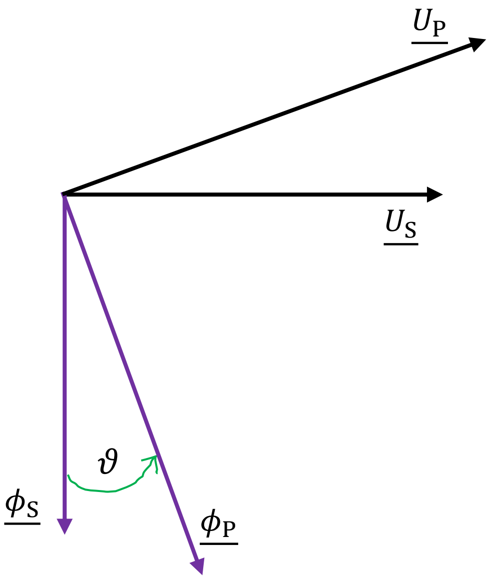


Aufgaben aus der Vorlesung (I)

b)

$$\underline{\phi_{P}} = 108\ \mathrm{Wb} \cdot \mathrm{e}^{-j70°}$$

$$\underline{\phi_{S}} = 90\ \mathrm{Wb} \cdot \mathrm{e}^{-j90°}$$



Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

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

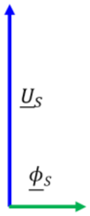
Ständerspannung $\underline{U}_{S,Y} = 20\ kV$

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

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



Aufgaben aus der Vorlesung (II)

a) $U_{S\curlywedge} = 20\ \mathrm{kV}$

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

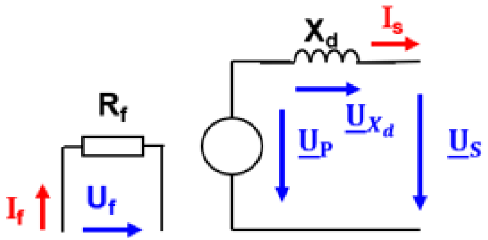
b) $x_\mathrm{d} = \frac{X_d \cdot I_{S\curlywedge}}{U_{S\curlywedge}}$

$$X_\mathrm{d} = \frac{x_d \cdot U_{S\curlywedge}}{I_{S\curlywedge}} = \frac{1{,}5 \cdot 20\ \mathrm{kV}}{10\ \mathrm{kA}} = \mathbf{3}\ \boldsymbol{\Omega}$$

Ein Drehstrom-Synchrongenerator hat folgende Kenndaten:

Scheinleistung	S = 600 MVA
Betriebsspannung	U_S = 20 kV
Relative synchrone Reaktanz	x_d = 1,5

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



„einphasiges“ Ersatzschaltbild

Leiter-Erde-Spannung, Sternschaltung

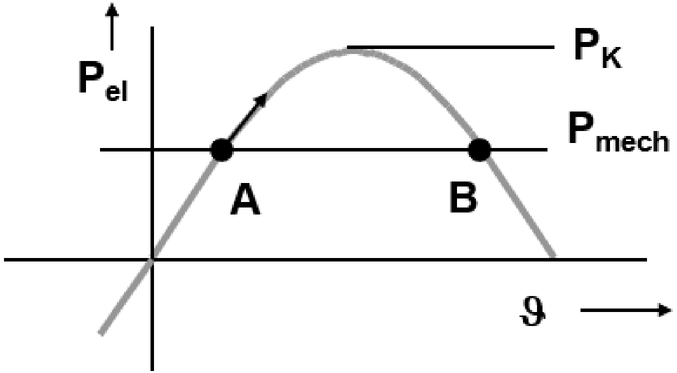
Aufgaben aus der Vorlesung

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 der Läufer



V. Wie erhält man aus dem Kippmoment die Kippleistung?

- $P_{\mathrm{G}} = M_{\mathrm{G}} \cdot \omega_{\mathrm{mech}}$

Aufgaben aus der Vorlesung (VI)

$U_{S\curlywedge} = 20\ \mathrm{kV}$

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

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

$\underline{U_{X_\mathrm{d}}} = jX_\mathrm{d} \cdot \underline{I_{S\curlywedge}} = \mathrm{j}3\ \Omega \cdot (-\mathrm{j}5\ \mathrm{kA}) = 15\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}0°}$

$\underline{U_\mathrm{P}} = \underline{U_{X_\mathrm{d}}} + \underline{U_{S\curlywedge}} = 15\ \mathrm{kV} + 20\ \mathrm{kV} = 35\ \mathrm{kV}$

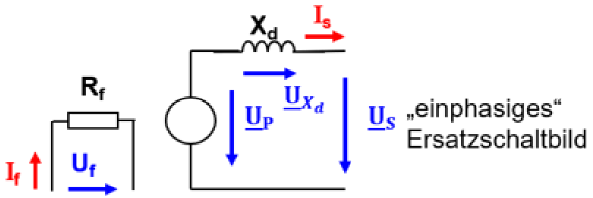
$$X_\mathrm{d} = \frac{x_\mathrm{d} U_\Delta^2}{S_\mathrm{n}}$$

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

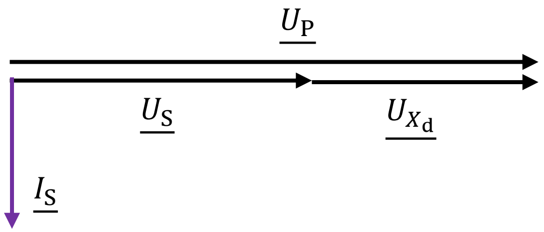
Die Ständer-Stern-Spannung beträgt 20 kV.

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 ?



Leiter-Erde-Spannung, Sternschaltung



Aufgabe 4a

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

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

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

$$\underline{U}_{1\mathrm{Y}} = \underline{I} \cdot (\mathrm{j}X + R) + \underline{U}_{2\mathrm{Y}} \rightarrow \underline{U}_{2\mathrm{Y}} = \underline{U}_{1\mathrm{Y}} - \underline{I} \cdot (\mathrm{j}X + R) = \underline{U}_{1\mathrm{Y}} - \underline{U}_{\mathrm{L}} - \underline{U}_{\mathrm{R}}$$

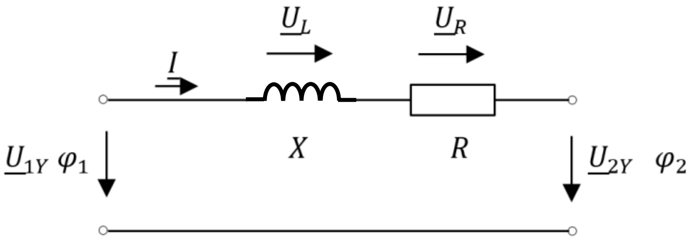
$$X = \omega L' \cdot l = 0{,}4\frac{\Omega}{\mathrm{km}} \cdot 200\mathrm{km} = 80\ \Omega$$

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

$$\cos\varphi_1 = 0{,}8 \rightarrow \varphi_1 = \arccos 0{,}8 = 36{,}9°$$

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

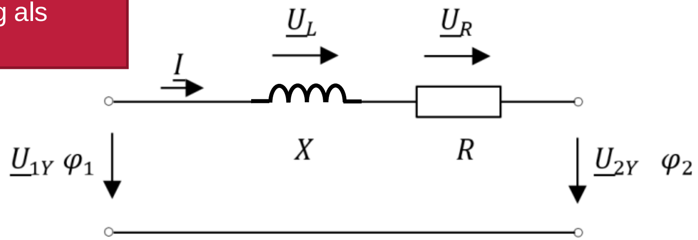
R‘ = 0,1 Ω/km ωL‘ = 0,4 Ω/km



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

Aufgabe 4a

110-kV-Drehstrom-Freileitung gegeben
Verwendung von U_Δ, da in Hochspannungsnetzen üblicherweise die Dreiecksspannung als Nennwert angegeben wird.



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

$$\underline{I} = 262\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}36{,}9°} = 209{,}52\ \mathrm{A} - \mathrm{j}\ 157{,}31\ \mathrm{A}$$

$$\underline{U}_\mathrm{L} = \mathrm{j}\ X \cdot \underline{I} = 80\ \Omega \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}90°} \cdot\ 262\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}36{,}9°} = 21\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}53{,}1°} = 12{,}6\ \mathrm{kV} + \mathrm{j}\ 16{,}8\ \mathrm{kV}$$

$$\underline{U}_\mathrm{R} = R \cdot \underline{I} = \ 20\ \Omega \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}0°} \cdot 262\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}36{,}9°} = 5{,}24\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}36{,}9°} = 4{,}2\ \mathrm{kV} - \mathrm{j}\ 3{,}1\ \mathrm{kV}$$

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

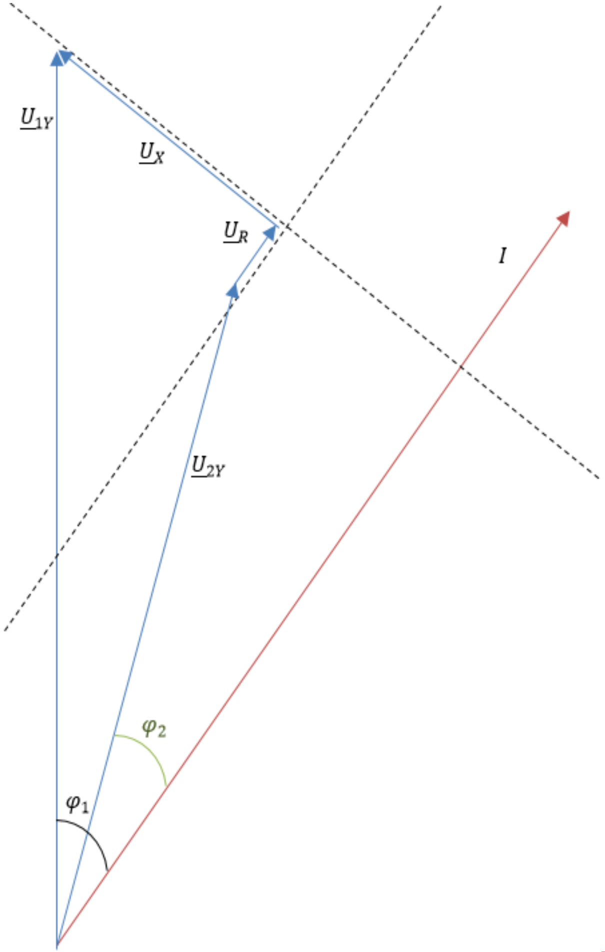
$$\underline{U}_{2\mathrm{Y}} = 46{,}7\ \mathrm{kV} - \mathrm{j}\ 13{,}7\ \mathrm{kV} = 48{,}7\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{j}16{,}3°}$$

$$\varphi_2 = \varphi_{\mathrm{U}2} - \varphi_I = -16{,}3° + 36{,}9° = 20{,}6°$$

Aufgabe 4a

$$\boldsymbol{P}_2 = \boldsymbol{S}_2 \cdot \boldsymbol{\cos\varphi}_2 = 3 \cdot \boldsymbol{U}_{2Y} \cdot \boldsymbol{I} \cdot \boldsymbol{\cos\varphi}_2 = 3 \cdot 48{,}7\ \mathrm{kV} \cdot 262\ \mathrm{A} \cdot \cos 20{,}6° = 35{,}8\ \mathbf{MW}$$

$$\boldsymbol{Q}_2 = \boldsymbol{S}_2 \cdot \boldsymbol{\sin\varphi}_2 = 3 \cdot \boldsymbol{U}_{2Y} \cdot \boldsymbol{I} \cdot \boldsymbol{\sin\varphi}_2 = 3 \cdot 48{,}7\ \mathrm{kV} \cdot 262\ \mathrm{A} \cdot \sin 20{,}6° = 13{,}5\ \mathbf{Mvar}$$



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?

$P_{\mathrm{G}} = 3 \cdot U_{\mathrm{GY}} \cdot I \cdot \cos\varphi_G$ φ_G = Winkel zwischen U_{NetzY} und $\underline{U}_{GY}$

$Q_{\mathrm{G}} = 3 \cdot U_{\mathrm{GY}} \cdot I \cdot \sin\varphi_G$

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

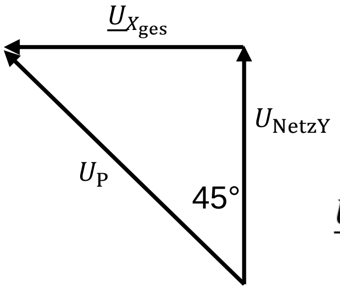
$$\underline{U}_{\mathrm{GY}} = \underline{I} \cdot \mathrm{j}(X_{\mathrm{T}} + X_{\mathrm{L}}) + \underline{U}_{\mathrm{NetzY}}$$

Berechnung des Spannungsfalls U_{Xges}:

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

Aus $\varphi\left[\sphericalangle\, \underline{U}_{X_{\mathrm{ges}}}, \underline{U}_{\mathrm{NetzY}},\right] = 90°$ folgt

$$U_{X_{\mathrm{ges}}} = U_{\mathrm{NetzY}} \cdot \tan(45°) = 63{,}5\ kV$$



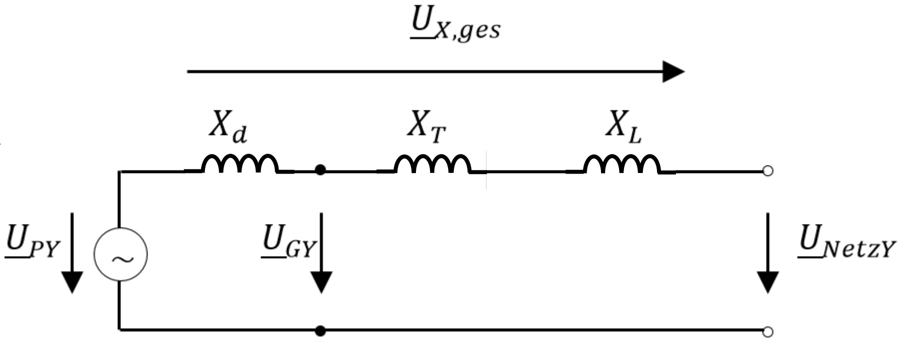
Die beschriebene Leitung diene zur Anbindung eines Drehstrom-Synchrongenerators

(U_n = 20 kV, S_n = 40 MVA, x_d = 100 %)

über einen Drehstromtransformator

(20/110 kV, S_n = 40 MVA, u_k = 15 %)

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



Aufgabe 4b

Berechnung von I über
Spannungsabfall und Impedanz:

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

$X_{\mathrm{L}} = 80\ \Omega$ (*X* aus a))

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

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

$$X_{\mathrm{ges}} = X_{\mathrm{d}} + X_{\mathrm{T}} + X_{\mathrm{L}} = 427{,}9\ \Omega$$

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

$u_{\mathrm{k}} = \frac{U_{\mathrm{k}}}{U} \cdot 100\ \%$ *Bezug: Außenleiter*

Beim Kurzschlussversuch gilt:

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

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

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

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

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

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

Aufgabe 4b

Aus $\varphi\left[\sphericalangle\, \underline{U}_{\mathrm{NetzY}}, \underline{I}\right] = 0°$ folgt $\underline{I} = 148{,}4\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}0°}$

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

$$= 148{,}4\ \mathrm{A} \cdot \mathrm{j}(45{,}5\ \Omega + 80\ \Omega) + 63{,}5\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}0°}$$

$$= 148{,}4\ \mathrm{A} \cdot 125{,}4\ \Omega \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}90°} + 63{,}5\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}0°}$$

$$= 18{,}6\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}90°} + 63{,}5\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}0°} = 63{,}5\ \mathrm{kV} + \mathrm{j}18{,}6\ \mathrm{kV}$$

$$= 66{,}2\ \mathrm{kV} \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}16{,}3°}$$

$$\rightarrow\ \varphi_{\mathrm{G}} = 16{,}3°$$

$$\boldsymbol{P_{\mathrm{G}}} = 3 \cdot \boldsymbol{U_{\mathrm{GY}}} \cdot \boldsymbol{I} \cdot \mathbf{cos}\,\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{G}}} = 3 \cdot 66{,}2\ \mathrm{kV} \cdot 148{,}4\ \mathrm{A} \cdot \cos(16{,}3°) = 28{,}3\ \mathbf{MW}$$

$$\boldsymbol{Q_{\mathrm{G}}} = 3 \cdot \boldsymbol{U_{\mathrm{GY}}} \cdot \boldsymbol{I} \cdot \mathbf{sin}\,\boldsymbol{\varphi_{\mathrm{G}}} = 3 \cdot 66{,}2\ \mathrm{kV} \cdot 148{,}4\ \mathrm{A} \cdot \sin(16{,}3°) = 8{,}3\ \mathbf{Mvar}$$

Aufgabe 4b

Zeigerdiagramm (Maßstab: 5 kV = 1 cm)