



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme

The background image shows a close-up of yellow sunflowers in the foreground, with solar panels and three wind turbines visible in the background against a blue sky with scattered white clouds.

GRUNDLAGEN DER ELEKTRISCHEN ENERGIETECHNIK

Teil 1, Übung 3 - Freileitung

Dr.-Ing. Jonas Wussow, 06.05.2022

Aufgaben aus der Vorlesung (I)

$$X_L = l \cdot X_L' = 100 \text{ km} \cdot 0,25 \frac{\Omega}{\text{km}} = 25 \Omega$$

$$Y_C = l \cdot Y_C' = 100 \text{ km} \cdot 4,5 \frac{\mu\text{S}}{\text{km}} = 450 \mu\text{S}$$

a) Außenleiterstrom: $S = 3 \cdot U_\lambda \cdot I$, $S = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I$

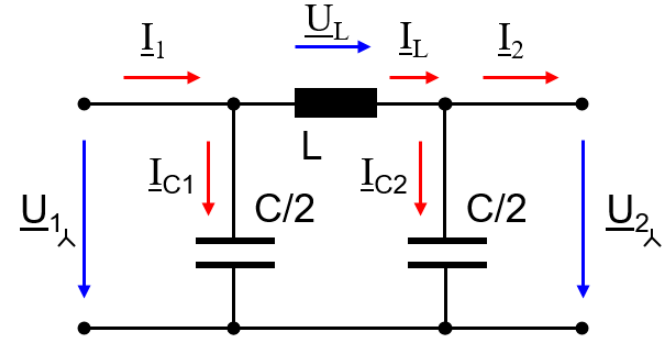
$$I_2 = \frac{S}{3 \cdot U_2} = \frac{690 \text{ MVA}}{3 \cdot 220 \text{ kV}} = \mathbf{1045 \text{ A}}$$

b) I_L bestimmen:

$$\underline{I}_L = \underline{I}_2 + \underline{I}_{C2} \quad \underline{X}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \cdot \frac{1}{\omega C} = -jX_C$$

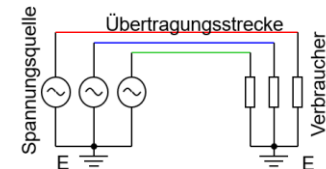
$$\underline{I}_{C2} = \frac{U_2}{-jX_{C2} \cdot 2} = \frac{U_2}{-jX_{C2} \cdot 2} \cdot \frac{j}{j} = j \frac{U_2}{X_{C2} \cdot 2} = jU_2 \frac{Y_{C2}}{2} = j49,5 \text{ A}$$

$$\underline{I}_L = \underline{I}_2 + \underline{I}_{C2} = 1045 \text{ A} + j \cdot 49,5 \text{ A}$$



Eine 420-kV-Übertragungsstrecke mit 100 km Länge soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die zu übertragende Scheinleistung sei 690 MVA bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV.

- Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom aus der Scheinleistung!
- Wie groß ist die Längsspannung an der Leitungsinduktivität?
- Wie groß ist der kapazitive Verschiebungsstrom für einen Außenleiter?



Aufgaben aus der Vorlesung (I)

$$\underline{U}_L = \underline{I}_L \cdot \underline{X}_L = (1045 \text{ A} + j \cdot 49,5 \text{ A}) \cdot j25 \Omega = -1,237 \text{ kV} + j26,125 \text{ kV}$$

c) $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{U}_L = 220 \text{ kV} + j26,125 \text{ kV} - 1,237 \text{ kV} = 218,76 \text{ kV} + j26,125 \text{ kV}$

$$\underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_1}{-jX_{C1} \cdot 2} = \underline{U}_1 \cdot j \frac{Y_{C1}}{2} = (218,76 \text{ kV} + j26,125 \text{ kV}) \cdot j225 \mu\text{S} = -5,9 \text{ A} + j49,22 \text{ A}$$

$$\underline{I}_L = 1045 \text{ A} + j \cdot 49,5 \text{ A}$$

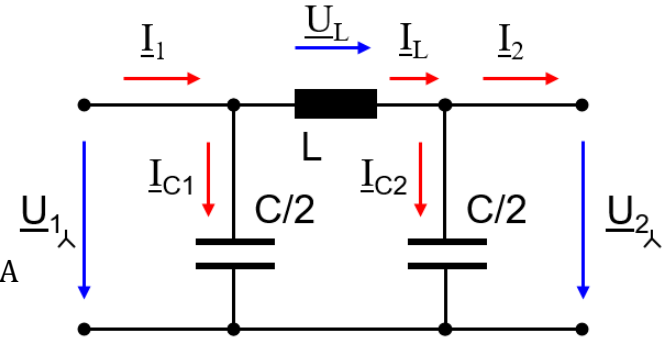
$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_L$$

$$\underline{I}_1 = -5,9 \text{ A} + j49,22 \text{ A} + 1045 \text{ A} + j49,5 \text{ A}$$

$$\underline{I}_1 = 1039,1 \text{ A} + j98,7 \text{ A}$$

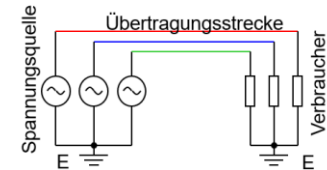
$$\underline{I}_C = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} = -5,9 \text{ A} + j49,22 \text{ A} + j49,5 \text{ A} = -5,9 \text{ A} + j98,7 \text{ A}$$

$$I_C = 98,9 \text{ A}$$

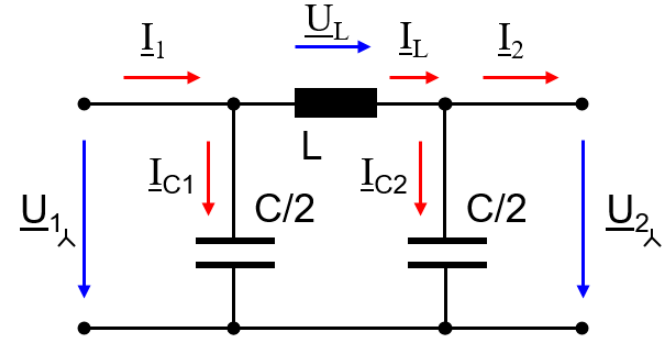
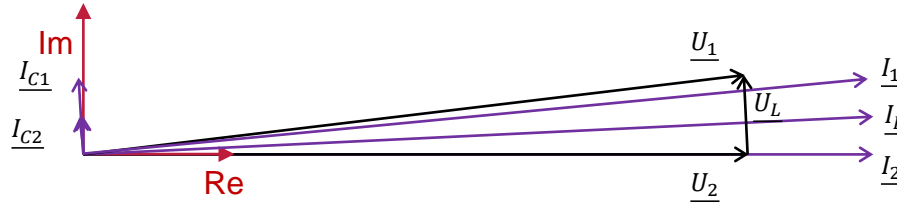


Eine 420-kV-Übertragungsstrecke mit 100 km Länge soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die zu übertragende Scheinleistung sei 690 MVA bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV.

- Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom aus der Scheinleistung!
- Wie groß ist die Längsspannung an der Leitungsinduktivität?
- Wie groß ist der kapazitive Verschiebungsstrom für einen Außenleiter?

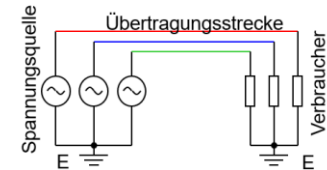


Aufgaben aus der Vorlesung (I)



Eine 420-kV-Übertragungsstrecke mit 100 km Länge soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die zu übertragende Scheinleistung sei 690 MVA bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV.

- Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom aus der Scheinleistung!
- Wie groß ist die Längsspannung an der Leitungsinduktivität?
- Wie groß ist der kapazitive Verschiebungsstrom für einen Außenleiter?



Aufgaben aus der Vorlesung (II)

a) Wellenwiderstand = Lastwiderstand \rightarrow Anpassung \rightarrow natürliche Leistung

$$Z = \sqrt{\frac{X_L'}{Y_C'}} = 235,7 \, \Omega$$

$$P_{\text{nat}} = \frac{U^2}{Z} = \frac{(U_\lambda \cdot \sqrt{3})^2}{Z} = \frac{(381 \, \text{kV})^2}{235,7 \, \Omega} = 616 \, \text{MW} \quad \text{Gesamtleistung}$$

b) $I_\lambda = \frac{S}{3 \cdot U_\lambda} = \frac{616 \, \text{MW}}{3 \cdot 220 \, \text{kV}} = 933 \, \text{A} \quad \text{Strom in einem Leiter}$

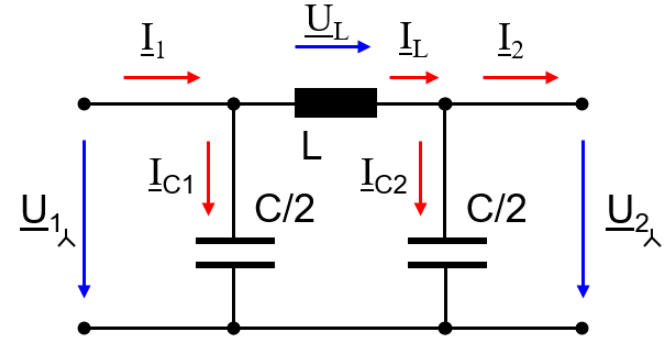
c) $W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}^2$

$$\hat{I} = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 933 \, \text{A} = 1320 \, \text{A}$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = 79,6 \, \text{mH}$$

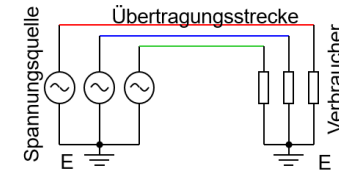
$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \hat{I}^2 = 0,5 \cdot 79,6 \, \text{mH} \cdot (1320 \, \text{A})^2 = 69,3 \, \text{kJ}$$

d) $Q = 0$ wegen Anpassung, nur Wirkleistung wird übertragen



Eine 420-kV-Übertragungsstrecke mit 100 km Länge soll als Freileitungsstrecke ausgelegt werden. Die natürliche Leistung soll übertragen werden bei einer Leiter-Erd-Betriebsspannung von 220 kV.

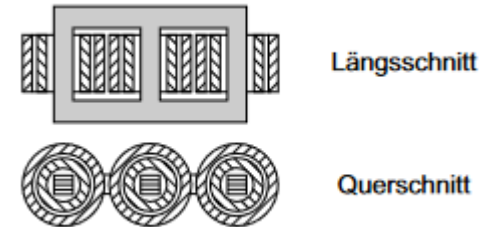
- Bestimmen Sie bitte die natürliche Leistung!
- Wie groß ist der Außenleiterstrom?
- Wie groß ist die maximale magnetisch gespeicherte Feldenergie für einen Außenleiter?
- Wie groß ist die in der Leitung pendelnde Blindleistung?



Aufgaben aus der Vorlesung

III. Beschreiben Sie den Aufbau eines Drehstrom-Zweiwicklungs-Transformators mit drei Schenkeln!

- Jeweils drei Primär- und Sekundärwicklungen
- Primärwicklungen sind jeweils identisch
- Sekundärwicklungen sind jeweils identisch
- Jede Phase (R-S-T) wird über je einen Schenkel gewickelt
- Umgebungsmedium: Öl, SF₆, (Luft)



Aufgaben aus der Vorlesung (IV)

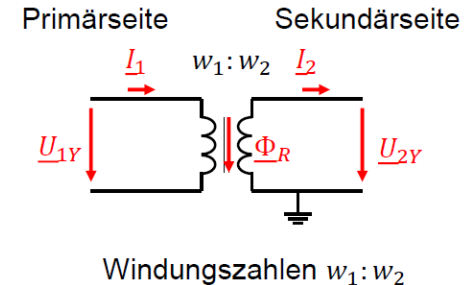
a) $I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{17 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ kV}} = 491 \text{ A}$

b) $\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{110 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} = 5,5$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{5,5} \rightarrow I_1 = \frac{w_2}{w_1} \cdot I_2 = \frac{1}{5,5} \cdot 491 \text{ A} = 89 \text{ A}$$

Ein Drehstromtransformator 110 kV/ 20 kV versorgt das Mittelspannungsnetz bei einer Betriebsspannung von 20 kV mit einer Wirkleistung von 17 MW.

- Bestimmen Sie bitte den Außenleiterstrom auf der Sekundärseite
- Berechnen Sie den Außenleiterstrom auf der Primärseite über das Windungszahlverhältnis



Aufgaben aus der Vorlesung

V. Wie ist die Bemessungsübersetzung definiert?

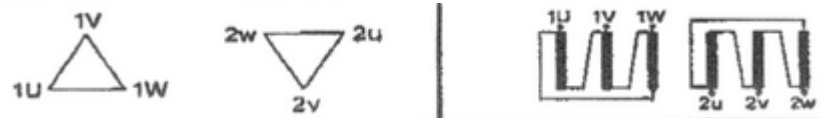
$$- \quad \ddot{u}_r = \frac{U_{\text{Primär}}}{U_{\text{Sekundär}}}$$

VI. Gibt es Transformatoren mit einer Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärspannung?

- Ja, siehe Schaltgruppen
- Yd5 → 150° Phasenverschiebung



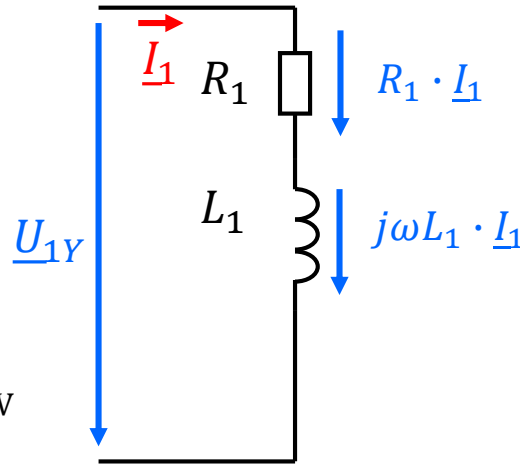
- Dd6 → 180° Phasenverschiebung



Aufgaben aus der Vorlesung (VII)

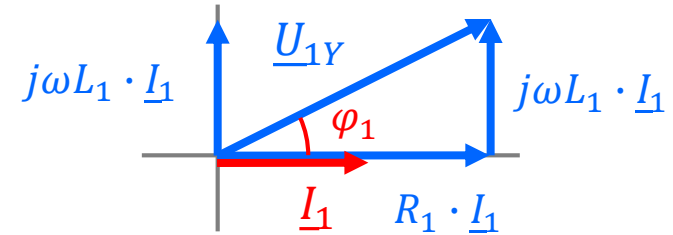
- Bitte berechnen Sie den Scheinwiderstand für eine Impedanz, die bei 50 Hz und einer Spannung von 1400 V einen Strom von 100 A mit einer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom von 30° fließen lässt!

$$\underline{Z} = \frac{1400 \text{ V}}{100 \text{ A}} \cdot e^{j30^\circ} = 14 \Omega \cdot e^{j30^\circ} = 12 \Omega + j7 \Omega$$



$$\underline{U}_{R1} = R_1 \cdot \underline{I}_1 = 12 \Omega \cdot 100 \text{ A} = 1200 \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L1} = j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1 = j7 \Omega \cdot 100 \text{ A} = j700 \text{ V}$$



$$\underline{U}_{1Y} = 1400 \text{ V} \cdot e^{j30^\circ}$$

$$\underline{I}_1 = 100 \text{ A}$$

$$\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$$

Aufgaben aus der Vorlesung (VIII)

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{17 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ kV}} = 491 \text{ A}$$

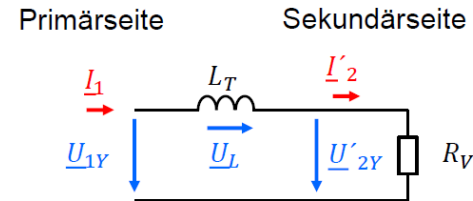
$$I'_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot I_2 = \frac{1}{5,5} \cdot 491 \text{ A} = 89 \text{ A} \quad I'_2 = I_1$$

$$Z_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,2 \text{ H} = 62,8 \Omega$$

$$U_L = Z_L \cdot I'_2 = 5,59 \text{ kV}$$

Ein Drehstromtransformator 110 kV/ 20 kV mit einer Induktivität von 200 mH versorgt das Mittelspannungsnetz bei einer Betriebsspannung von 20 kV mit einer Wirkleistung von 17 MW.

- Wie groß ist die Längsspannung an der Transformatorinduktivität bezogen auf die Primärseite?



Aufgabe 3a und b

a) Wie groß ist die natürliche Leistung der Leitung?

$$P_{\text{nat}} = \frac{U^2}{Z} \quad \text{mit } Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{0,25 \frac{\Omega}{\text{km}}}{4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}}} = 250 \, \Omega \quad \rightarrow \quad P_{\text{nat}} = \frac{(750 \, \text{kV})^2}{250 \, \Omega} = \mathbf{2.250 \, \text{MW}}$$

b) Welcher Leitungswinkel stellt sich bei Übertragung der natürlichen Leistung ein?

- Bei Anpassung ist Verbraucherwiderstand = Wellenwiderstand
- Daraus folgt für die Spannungen lediglich eine Phasenverschiebung

$$|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2| \quad \rightarrow \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot e^{j\vartheta} \quad \vartheta = \sqrt{\omega L' \cdot \omega C'} \cdot l \text{ im Bogenmaß; } \vartheta = \sqrt{\omega L' \cdot \omega C'} \cdot l \cdot \frac{360^\circ}{2\pi} \text{ im Gradmaß}$$

$$\vartheta = \sqrt{\omega L' \cdot \omega C'} \cdot l = \sqrt{0,25 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}} \cdot 800 \, \text{km}} = 0,8 \quad \vartheta = 0,8 \cdot \frac{360^\circ}{2\pi} = \mathbf{45,8^\circ}$$

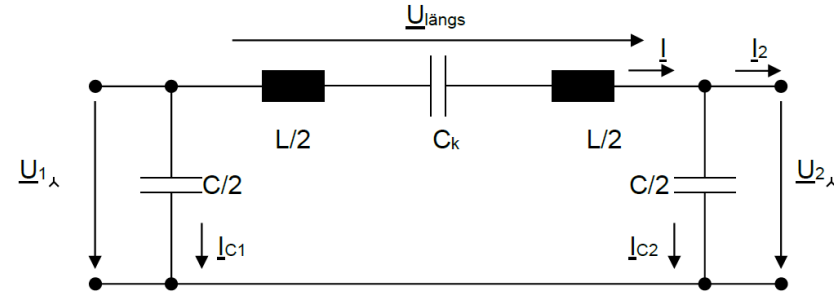
Aufgabe 3c

Welcher Leitungswinkel stellt sich ein, wenn die Leitung in der Mitte mit einer Kapazität von $38,8 \mu\text{F}$ pro Phase längskompensiert wird und die am Leitungsende abgegebene Wirkleistung bei $U_2 = 750 \text{ kV}$ der natürlichen Leistung nach a) entspricht?

ϑ wird grafisch über ein Zeigerdiagramm bestimmt (Maßstab: $50 \text{ kV} = 1 \text{ cm}$ $1 \text{ kA} = 2 \text{ cm}$), dafür zunächst Berechnung der relevanten Größen: Beträge von \underline{U}_2 , \underline{I}_2 , \underline{I}_{C2} , \underline{I} , $\underline{U}_{\text{längs}}$, \underline{U}_1

$$U_{2\lambda} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{750 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 433 \text{ kV}$$

$$I_2 = \frac{P_{\text{nat}}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{P_{\text{nat}}}{3 \cdot U_{2\lambda}} = \frac{2250 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 750 \text{ kV}} = 1,73 \text{ kA}$$



Aufgabe 3c

$$I_{C2} = \frac{\omega C}{2} \cdot U_2 = 1,6 \text{ mS} \cdot 433 \text{ kV} = 693 \text{ A}$$

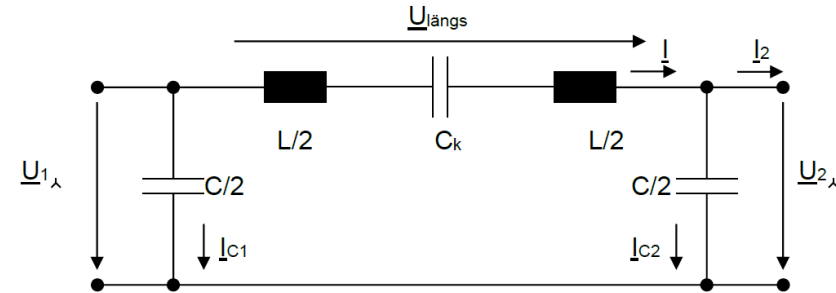
$$\text{mit } \omega C = \omega C' \cdot l = 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}} \cdot 800 \text{ km} = 3,2 \text{ mS}$$

$$I = \sqrt{I_2^2 + I_{C2}^2} = \sqrt{(1,73 \text{ kA})^2 + (0,69 \text{ kA})^2} = 1,86 \text{ kA}$$

$$X_{\text{längs}} = \frac{1}{2} \omega L - \frac{1}{\omega C_k} + \frac{1}{2} \omega L = \omega L - \frac{1}{\omega C_K}$$

$$\omega C_K = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 38,8 \text{ } \mu\text{F} = 12,2 \text{ mS}$$

$$\omega L = \omega L' \cdot l = 0,25 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 800 \text{ km} = 200 \Omega$$



Die Kapazität beeinflusst bei kleinen Beträgen nicht den Phasenversatz von Strom und Spannung, sondern lediglich den **Betrag des Blindwiderstands**. → Rechnung mit Beträgen

Bei Beträgen des Widerstands der Kapazität größer als derer der Induktivitäten dreht sich das Vorzeichen des Blindwiderstands um:

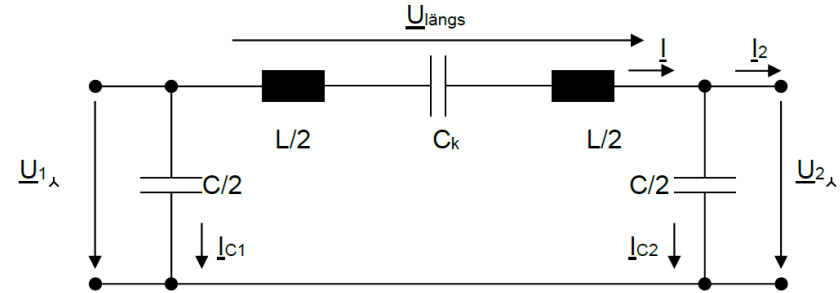
$X > 0$: induktiv, Strom eilt um 90° nach

$X < 0$: kapazitiv, Strom eilt um 90° vor

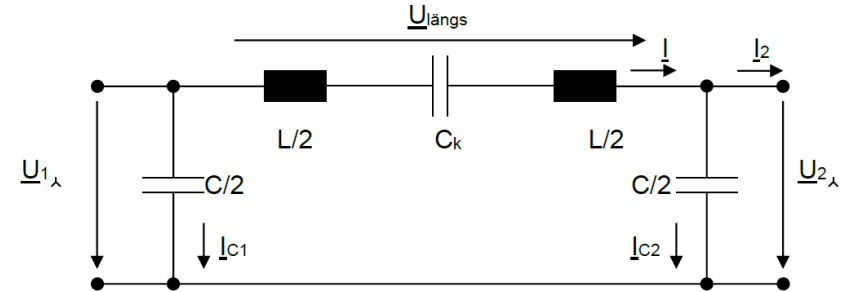
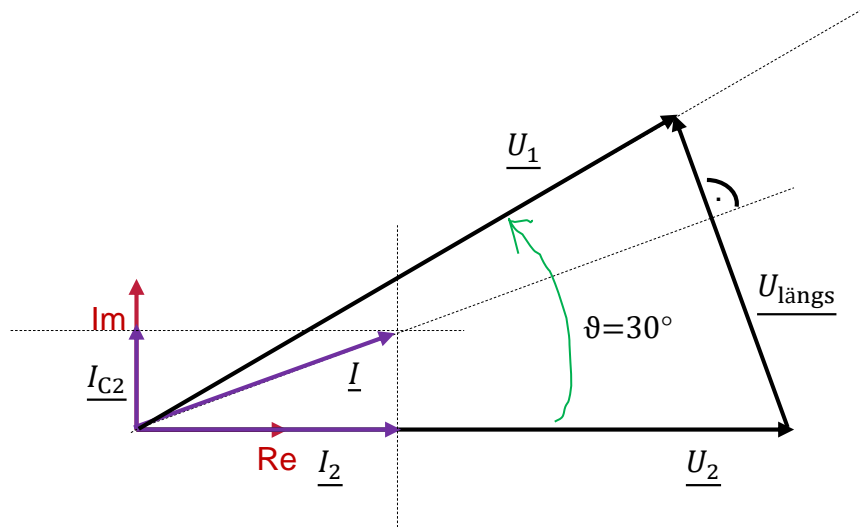
Aufgabe 3c

$$X_{\text{längs}} = \left(200 \, \Omega - \frac{1}{12,2 \, \text{mS}} \right) = 118 \, \Omega$$

$$U_{\text{längs}} = I \cdot X_{\text{längs}} = 1,86 \, \text{kA} \cdot 118 \, \Omega = 219,5 \, \text{kV}$$



Aufgabe 3c



Aufgabe 3d

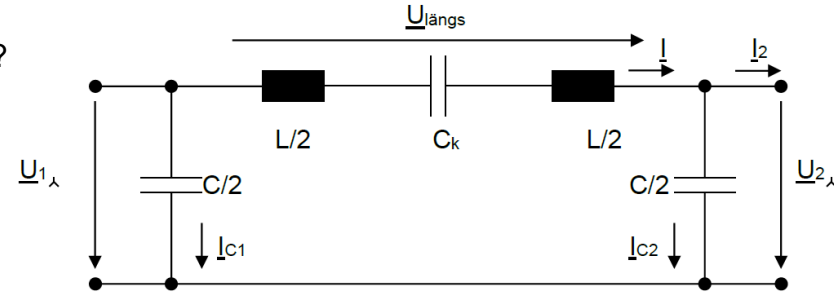
Wie groß ist die natürliche Leistung der nach c) kompensierten Leitung?

Wellenwiderstand hat sich geändert

$$P_{\text{nat}} = \frac{U^2}{Z}$$

$$\text{mit } Z = \sqrt{\frac{X_{\text{längs}}}{\omega C}} = \sqrt{\frac{118 \, \Omega}{3,2 \, \text{mS}}} = 192 \, \Omega$$

$$P_{\text{nat}} = \frac{(750 \, \text{kV})^2}{192 \, \Omega} = 2.930 \, \text{MW}$$



Aufgabe 3e

Welche Spannungsüberhöhung tritt am Leitungsende der nach c) kompensierten Leitung bei Lastabwurf auf?

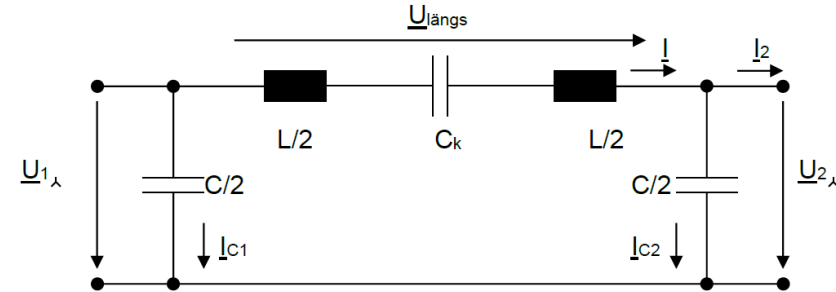
Spannungsüberhöhung $k = \frac{U_2}{U_1}$

Lastabwurf $\rightarrow I_2 = 0$

$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + jX_{\text{längs}} \cdot \underline{I}$ Maschengleichung

$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - jX_{\text{längs}} \cdot \underline{I}$

$\underline{I} = \underline{I}_{C2} = j \frac{\omega C}{2} \cdot \underline{U}_2$ Knotengleichung



Aufgabe 3e

$$\underline{U}_{2\lambda} = \underline{U}_{1\lambda} - jX_{\text{längs}} \cdot j \frac{\omega C}{2} \cdot \underline{U}_{2\lambda} = \underline{U}_{1\lambda} + X_{\text{längs}} \cdot \frac{\omega C}{2} \cdot \underline{U}_{2\lambda}$$

$$\underline{U}_{1\lambda} = \underline{U}_{2\lambda} \cdot \left(1 - X_{\text{längs}} \cdot \frac{\omega C}{2}\right)$$

$$k = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{1 - X_{\text{längs}} \cdot \frac{\omega C}{2}} = \frac{1}{1 - 118 \, \Omega \cdot 1,6 \, \text{mS}} = 1,23$$

