



Schriftliche Prüfung

Elektroenergiesysteme / Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie

30. September 2009

Muster Lösung

Vorname

Nachname

Matrikelnummer

Aufgabenübersicht:

		Punktezahl	
		maximal	erreicht
a.	Frequenzkompensierter Spannungsteiler	14	
b.	Wanderwellen	16	
c.	Synchrongenerator	16	
d.	Einphasentransformator	16	
Gesamt:		62	

Die Klausur besteht aus 18 nummerierten Seiten (einschließlich Deckblatt).

Hinweis: Die Ergebnisse müssen den Lösungsansatz und den Rechenweg erkennen lassen, die Angabe eines Ergebnisses reicht nicht aus! Der Lösungsweg muss vollständig angegeben werden und nachvollziehbar sein. Begründen Sie Ihre Antworten! Bitte nicht mit Bleistift oder Rotstift schreiben, da dies nicht gewertet wird.

Aufgabe 1: Frequenzkompensierter Spannungsteiler

Der Tastkopf eines Oszilloskops und die Eingangsimpedanz des Oszilloskops bilden zusammen einen ohmsch-kapazitiven Spannungsteiler. Abbildung 1 stellt das Ersatzschaltbild der Gesamtanordnung dar. Die Kapazität der Anschlussleitung sei vernachlässigbar.

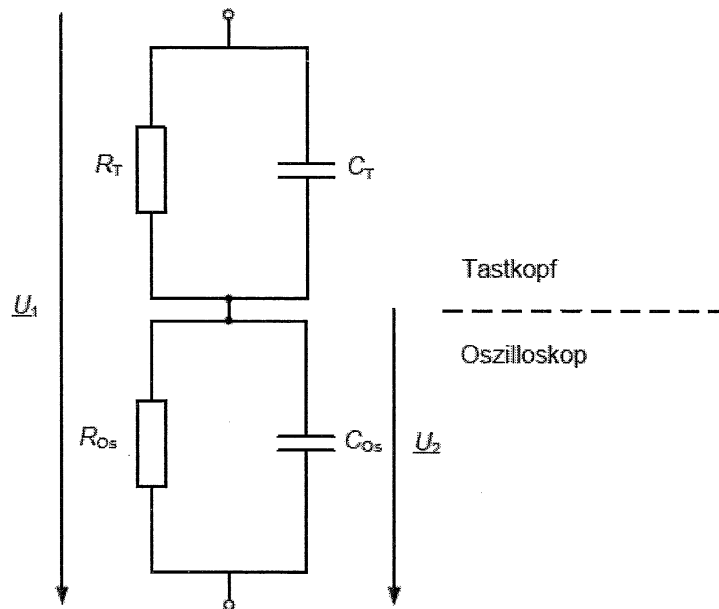


Abbildung 1: Frequenzkompensierter Spannungsteiler

- a. Bestimmen Sie das Verhältnis der Spannungen $\underline{V} = \frac{U_2}{U_1}$. Welche Bedingung muss erfüllt sein, damit dieses unabhängig von der Frequenz der zu messenden Spannung ist?

$$\underline{V} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\underline{Z}_{Os}}{\underline{Z}_{Os} + \underline{Z}_T} \quad , \quad \underline{Z}_{Os} = \frac{R_{Os} \cdot \frac{1}{j\omega C_{Os}}}{R_{Os} + \frac{1}{j\omega C_{Os}}} = \frac{R_{Os}}{1 + j R_{Os} \omega C_{Os}}$$

$$\underline{Z}_T = \frac{R_T}{1 + j \omega R_T C_T}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{R_{Os}}{1 + j \omega R_{Os} C_{Os}}}{\frac{R_T}{1 + j \omega R_T C_T} + \frac{R_{Os}}{1 + j \omega R_{Os} C_{Os}}} = \frac{R_{Os}}{R_{Os} + R_T \cdot \frac{1 + j \omega C_{Os} R_{Os}}{1 + j \omega C_T R_T}}$$

Keine Frequenzabhängigkeit für $C_{Os} R_{Os} = C_T R_T$

(4)

- b. Für alle Frequenzen soll das Teilerverhältnis den Wert $V_0 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{10}$ annehmen. Es sei $R_{Os} = 1 \text{ M}\Omega$ und $C_{Os} = 27 \text{ pF}$. Bestimmen Sie die Werte für R_T und C_T !

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{10} = \frac{R_{Os}}{R_{Os} + R_T} \quad \text{und} \quad C_{Os} R_{Os} = C_T R_T$$

$$\Rightarrow R_T = 9 R_{Os} = 9 \text{ M}\Omega$$

$$\Rightarrow C_T = \frac{C_{Os} R_{Os}}{R_T} = \frac{1}{9} C_{Os} = 3 \text{ pF}$$

2

- c. Versehentlich wird jedoch $C_T = 0$ pF gewählt. Zur Überprüfung des Tastkopfes wird ein Spannungssprung der Höhe U_0 angelegt, $u_1(t) = U_0 \cdot \sigma(t)$. Bestimmen Sie die Zeitfunktion der am Oszilloskop angezeigten Spannung $u_2(t)$ formelmäßig! Setzen Sie keine Zahlenwerte ein! Es gelten folgende Korrespondenzen:

$$\mathcal{L}\{\sigma(t)\} = \frac{1}{p}$$

$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \frac{1}{p \cdot (p + \alpha)}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_{OS}}{R_{OS} + R_T (1 + j\omega C_{OS} R_{OS})} \quad j\omega \hat{=} p$$

$$U_1(p) = \frac{U_0}{p}$$

$$U_2(p) = U_1(p) \cdot \frac{R_{OS}}{R_{OS} + R_T (1 + p C_{OS} R_{OS})} = \frac{U_0}{p} \cdot \frac{R_{OS}}{R_{OS} + R_T + p C_{OS} R_{OS} R_T}$$

$$= \frac{U_0}{p} \cdot \frac{R_{OS}}{C_{OS} R_{OS} R_T} \cdot \frac{1}{\frac{R_{OS} + R_T}{R_{OS} R_T C_{OS}} + p} \quad 0-0$$

$$\frac{U_0 R_{OS}}{C_{OS} R_{OS} R_T} \cdot \frac{C_{OS} R_{OS} R_T}{R_{OS} + R_T} \left(1 - e^{-t \left(\frac{R_{OS} + R_T}{R_{OS} C_{OS} R_T} \right)} \right)$$

$$= U_0 \cdot \frac{R_{OS}}{R_{OS} + R_T} \left(1 - e^{-t \left(\frac{R_{OS} + R_T}{R_{OS} R_T C_{OS}} \right)} \right)$$

(4)

- d. Bestimmen Sie für $C_T = 0$ pF die Frequenz f_g , bei der der Betrag des Teilverhältnisses auf $V_g = |V(f_g)| = 97\% \cdot V_0$ zurückgegangen ist ($V_0 = \frac{1}{10}$). Setzen Sie hierzu die Zahlenwerte aus Teilaufgabe b) ein. Wenn Sie R_T nicht bestimmen konnten, rechnen Sie mit $R_T = 8 \text{ M}\Omega$.

$$|V| = \frac{R_{os}}{\sqrt{(R_{os} + R_T)^2 + (\omega C_{os} R_{os} R_T)^2}} \stackrel{!}{=} V_g$$

$$\Rightarrow \left(\frac{R_{os}}{V_g}\right)^2 = (R_{os} + R_T)^2 + \omega^2 (C_{os} R_{os} R_T)^2$$

$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{\left(\frac{R_{os}}{V_g}\right)^2 - (R_{os} + R_T)^2}{(C_{os} R_{os} R_T)^2} \Rightarrow f_g = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\left(\frac{R_{os}}{V_g}\right)^2 - (R_{os} + R_T)^2}{(C_{os} R_{os} R_T)^2}}$$

$$\Rightarrow \text{Zahlenwerte } V_g = 97\% \cdot \frac{1}{10} = 0,97$$

$$\omega_g = 10313,73 \text{ } 1/s \Rightarrow f_g = 1641,48 \text{ Hz}$$

$$(\text{alternativ } f_g = 3704,8 \text{ Hz})$$

(4)

Aufgabe 2: Wanderwellen

Die Impulse eines Impulsgenerators sollen mit einem Transientenrekorder aufgezeichnet werden. Zum Anschluss steht ein verlustfreies Koaxialkabel der Länge $\ell = 20$ m zur Verfügung. Der Induktivitätsbelag sei $L' = 250$ nH/m, der Kapazitätsbelag sei $C' = 100$ pF/m. Der Aufbau entspreche dem Ersatzschaltbild in Abbildung 2. Die Leerlaufspannung des Impulsgenerators kann näherungsweise durch die Sprungfunktion $u_0(t) = U_0 \cdot \sigma(t)$ beschrieben werden. Die Eingangsimpedanz des Transientenrekorders beträgt $C_T = 30$ pF parallel zu $R_T = 1$ M Ω .

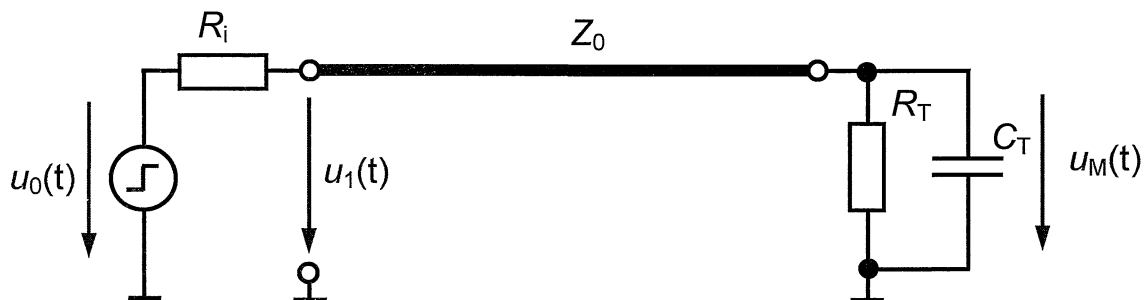


Abbildung 2: Anordnung zur Messung der Ausgangsspannung eines Impulsgenerators

- a. Berechnen Sie den Wellenwiderstand Z_0 des Koaxialkabels.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = 50 \Omega$$

①

- b. Wie groß muss der Innenwiderstand R_i des Impulsgenerators gewählt werden, damit die vom Transientenrekorder zurücklaufende Spannungswelle am Leitungsende des Impulsgenerators nicht reflektiert wird? Begründen Sie Ihre Aussage!

$$R(\rho) = \frac{R_i - Z_0}{R_i + Z_0} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow R_i = Z_0 = 50 \Omega$$

②

- c. Bestimmen Sie den Zahlenwert des Einlauffaktors X der Leitung vom Impulsgenerator aus gesehen und die Zeitfunktion der einlaufenden Welle $u_1(t)$! Wenn Sie den Wellenwiderstand Z_0 in Teilaufgabe a) und den Innenwiderstand des Signalgenerators R_i in Teilaufgabe b) nicht bestimmen konnten, wählen Sie $Z_0 = 80 \Omega$ und $R_i = 75 \Omega$.

$$X = \frac{Z_0}{R_i + Z_0} = \frac{1}{2}, \quad u_1(t) = X \cdot u_0(t) = \frac{1}{2} \cdot U_0 \cdot \sigma(t)$$

$$\left(\text{alternativ } X = \frac{80}{155}, \quad u_1(t) = \frac{80}{155} \cdot u_0(t) \right)$$

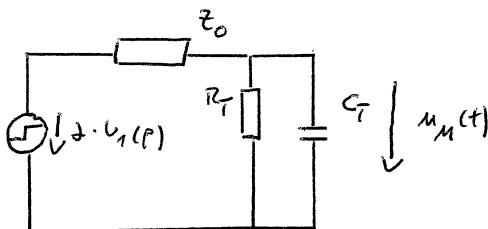
2

- d. Berechnen Sie die Zeitfunktion $u_M(t)$ der gemessenen Spannung und bringen Sie das Ergebnis auf die Form $u_M(t) = A \cdot U_0 \cdot (B - \exp(\frac{-t}{\tau}))$. Geben Sie den Zahlenwert der Zeitkonstante τ an, mit der $u_M(t)$ an den Klemmen des Transientenrekorders ansteigt. Stellen Sie hierzu das Wellenersatzschaltbild auf und benutzen Sie folgende Korrespondenzen:

$$\mathcal{L}\{\sigma(t)\} = \frac{1}{p}$$

$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \frac{1}{p \cdot (p + \alpha)}$$

Wellenersatzschaltbild:



$$u_1(p) = \frac{U_0}{2p}$$

$$\frac{U_M(p)}{2U_1(p)} = \frac{R_T}{R_T + Z_0 + p C_T R_T Z_0} = \frac{R_T}{C_T R_T Z_0} \cdot \frac{1}{\frac{R_T + Z_0}{C_T R_T Z_0} + p}$$

$$U_M(p) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \frac{U_0}{p} \cdot \frac{R_T}{C_T R_T Z_0} \cdot \frac{1}{\frac{R_T + Z_0}{C_T R_T Z_0} + p}$$

$$U_M(t) = \frac{U_0 \cdot R_T}{C_T R_T Z_0} \cdot \frac{C_T R_T Z_0}{R_T + Z_0} \cdot \left(1 - e^{-t \cdot \frac{R_T + Z_0}{C_T R_T Z_0}} \right)$$

$$= U_0 \cdot \frac{R_T}{R_T + Z_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{C_T R_T Z_0}{R_T + Z_0} = 1,5 \text{ ms}$$

(5)

- e. Zur Verbesserung der Messung wird zu R_T ein weiterer Widerstand $R_{Zus} = Z_0$ parallelgeschaltet. Bestimmen Sie wiederum den Zahlenwert der Zeitkonstante τ , mit der $u_M(t)$ nun an den Klemmen des Transientenrekorders ansteigt. Geben Sie hier nicht nur das Ergebnis, sondern auch den Rechenweg oder eine kurze Begründung an!

$$R_T' = \frac{R_T Z_0}{Z_0 + R_T} ; \tau = \frac{C_T R_T' Z_0}{R_T' + Z_0} = \frac{C_T \frac{R_T Z_0}{R_T + Z_0} Z_0}{\frac{R_T Z_0}{R_T + Z_0} + Z_0}$$

$$= \frac{C_T R_T Z_0}{2 R_T + Z_0} = 0,75 \text{ ms}$$

(3)

- f. Bestimmen Sie den Wert, gegen den $u_M(t)$ für $t \rightarrow \infty$ geht, nachdem die Parallelschaltung des Widerstands $R_{Zus} = Z_0$ zu R_T in e) durchgeführt wurde! Um welchen Faktor ist dieser Wert gegenüber der ursprünglichen Anordnung zurückgegangen? Geben Sie den Zahlenwert an!

$$\text{mit } R_{Zus}: \lim_{t \rightarrow \infty} u_M(t) = U_0 \cdot \frac{R_T}{R_T + Z_0} = \frac{R_T Z_0 \cdot U_0}{R_T Z_0 + R_T Z_0 + Z_0^2} = \frac{R_T}{2R_T + Z_0} \cdot U_0$$

$$\text{ohne } R_{Zus}: \lim_{t \rightarrow \infty} u_M(t) = U_0 \cdot \frac{R_T}{R_T + Z_0}$$

$$\text{Faktor: } \frac{\frac{R_T}{2R_T + Z_0}}{\frac{R_T}{R_T + Z_0}} = \frac{R_T + Z_0}{2R_T + Z_0} = 1/2$$

3

Aufgabe 3: Synchrongenerator

Ein vierpoliger Synchrongenerator mit Vollpoläufer besitze die Daten

$$S_N = 150 \text{ MVA} \quad U_N = 11 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad L_H = 2,9 \text{ mH} \quad L_{\sigma 1} = 0,856 \text{ mH}$$

und wird an einem symmetrischen Drehstromnetz mit fester Spannung und Frequenz betrieben. Der ohmsche Widerstand der Statorwicklung R_1 sei vernachlässigbar. Im Nennbetrieb sei die abgegebene Wirkleistung $P_N = 135 \text{ MW}$.

- a. Berechnen Sie für den Nennbetrieb die Polradspannung sowie den Statorstrom I_1 nach Betrag und Phase! Berechnen Sie die im Nennbetrieb abgegebene Blindleistung und den Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$! $\rightarrow$ Fallunterscheidung: Fall 1: $Q > 0$

$$\cos(\varphi) = \frac{P_N}{S_N} = 0,9 \Rightarrow \varphi = 25,84^\circ, \quad Q_N = S_N \cdot \sin \varphi = 65,38 \text{ Mvar}$$

$$\underline{I}_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = 7872,96 \text{ A} \Rightarrow \underline{I} = 7872,96 \text{ A} \cdot e^{-j25,84^\circ}$$

$$\underline{U}_p = \underline{U}_1 + j\omega(L_{\sigma 1} + L_H) \cdot \underline{I}, \quad 2\pi f \cdot (L_{\sigma 1} + L_H) = 1,18 \Omega$$

$$\underline{U}_p = 13344,32 \text{ V} \cdot e^{j38,8^\circ}$$

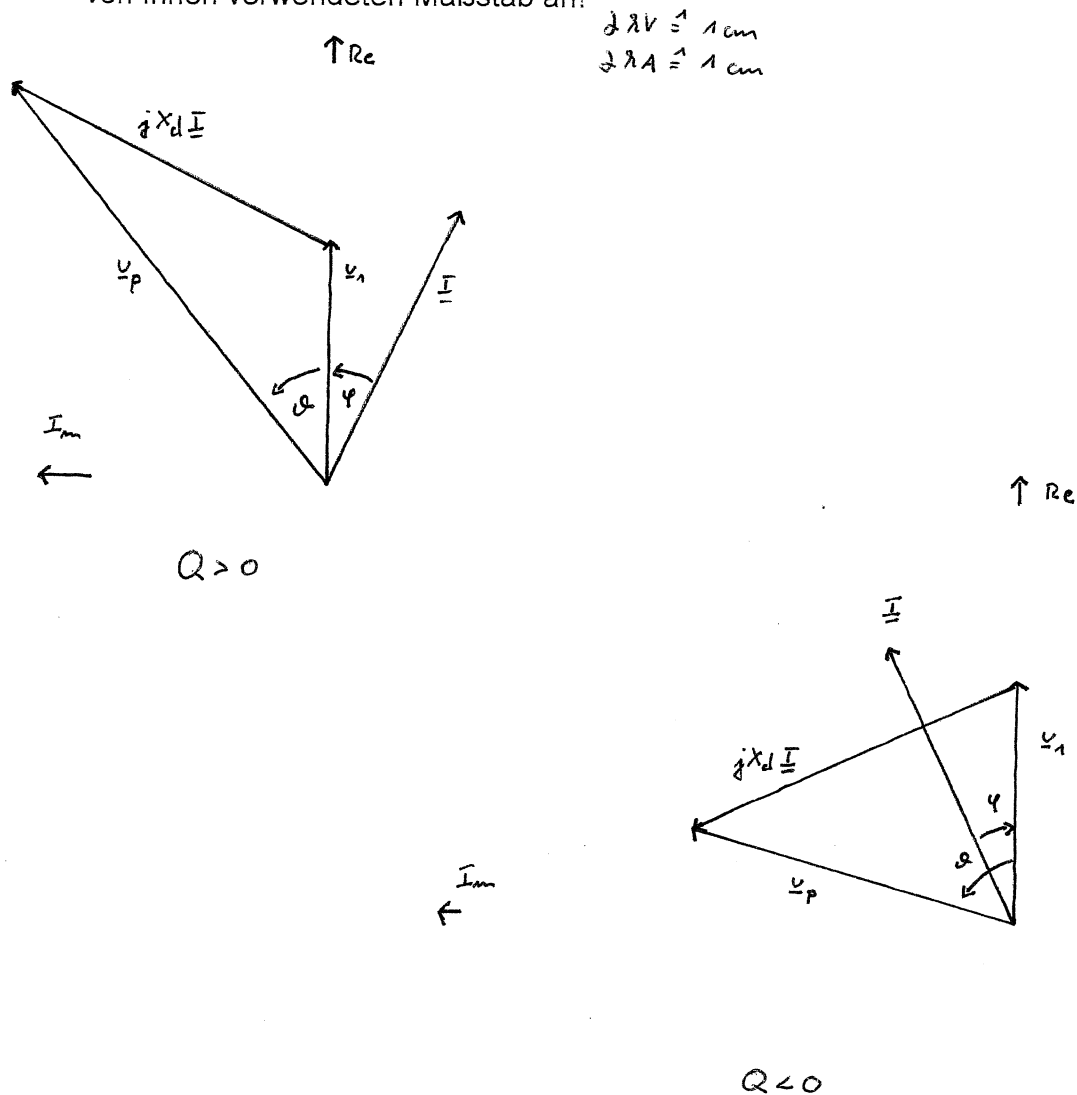
Fall 2: $Q < 0$

$$\underline{I} = 7872,96 \text{ A} \cdot e^{j25,84^\circ}$$

$$\underline{U}_p = 8672,03 \text{ V} \cdot e^{j74,64^\circ}$$

(5)

- b. Zeichnen Sie ein maßstäbliches Zeigerdiagramm für den Nennbetrieb! Geben Sie den von Ihnen verwendeten Maßstab an!



- c. Geben Sie die Drehzahl n des Läufers an und bestimmen Sie das Drehmoment M_N , das im Nennbetrieb am Rotor angreift!

$$n = \frac{60 \cdot f_N}{p} = 1500 \frac{1}{\text{min}}$$

$$M_N = \frac{P_N}{\omega} \cdot p = 859,44 \text{ Nm}$$

(2)

(3)

- d. Der Synchrongenerator wird in den Phasenschieberbetrieb versetzt. Der Erregerstrom wird zu Null geregelt. Bestimmen Sie den Statorstrom I_1 nach Betrag und Phase! Wie groß ist die Blindleistung, die abgegeben bzw. aufgenommen wird?

$$\begin{aligned} \underline{V}_p &= 0, \text{ da } \underline{I}_e = 0 \Rightarrow \underline{V}_1 + j X_d \underline{I}_1 = 0 \Rightarrow \underline{I}_1 = \frac{-\underline{V}_1}{j X_d} \\ &= 5382,16 \text{ A} \cdot e^{j 90^\circ} \\ Q_1 &= -\frac{3 \underline{V}_1^2}{X_d} = -102,54 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

2

- e. Der Turbogenerator wird über ein kurzes Stück verlustlose Freileitung mit der nächsten Sammelschiene verbunden. Die Freileitung kann vereinfacht durch ihre Längsreaktanz $X_L = 2 \Omega$ dargestellt werden. Der Erregerstrom des Generators sei gegenüber Teilaufgabe a) unverändert. Bestimmen Sie die maximale Wirkleistung $P_{\max}$, die an der Sammelschiene ins Netz eingespeist werden kann, wenn an dieser genau die Nennspannung $U_N = 11 \text{ kV}$ anliegt! Wie groß ist für diesen Fall die Phasenverschiebung zwischen der Spannung an der Sammelschiene und der Polradspannung? Bestimmen Sie den komplexen Wert des Stroms, der in diesem Fall über die Leitung fließt.

Hinweis: Wenn Sie den Betrag der Polradspannung in Teilaufgabe a) nicht bestimmen konnten, rechnen Sie mit $|\underline{U}_p| = 14 \text{ kV}$.

$$P_1 = \frac{3 \underline{V}_1 \underline{V}_p}{X_d + X_L} \cdot \sin \vartheta \Rightarrow \text{maximal für } \vartheta = 90^\circ$$

$$P_{\max} = 79,95 \text{ MW (Fall 1)} \quad P_{\max} = 51,96 \text{ MW (Fall 2)}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{V}_p - \underline{V}_1}{j(X_d + X_L)} = 4647,35 \text{ A} e^{j 51,45^\circ} \quad (\text{Fall 1})$$

$$\underline{I}_1 = 3380,14 \text{ A} e^{j 36,22^\circ} \quad (\text{Fall 2})$$

alternativ: $P_{\max} = 83,88 \text{ MW}$

$$\underline{I}_1 = 6082,07 \text{ A } e^{j46,37^\circ}$$

③

- f. Beschreiben Sie in Stichworten wie sich die in Teilaufgabe e) ermittelte maximale Wirkleistung $P_{\max}$ steigern lässt. Die Daten der Synchronmaschine, die Spannung an der Sammelschiene und die Polradspannung sollen dabei nicht verändert werden.

L' oder L'' verkleinern (z.B. durch Bündelleiter, ...) oder

$X_{L, \text{eff}}$ verkleinern durch Serienkompensation mit Kapazität

①

Aufgabe 4: Einphasentransformator

Gegeben sei ein Einphasentransformator mit folgenden Daten

$$S_N = 7,2 \text{ MVA} \quad U_{N1} = 6 \text{ kV} \quad U_{N2} = 120 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

und den Windungszahlen

$$N_1 = 80 \quad N_2 = 1600.$$

- a. Bestimmen Sie die Nennströme I_{N1} und I_{N2} der Unter- und Oberspannungsseite!

$$I_N = \frac{S_N}{U_N}, \quad I_{N1} = 1200 \text{ A}$$
$$I_{N2} = 60 \text{ A}$$

①

- b. Es werde ein Kurzschlussversuch durchgeführt. Dabei wird die Oberspannungsseite kurzgeschlossen. Es gelte das in Abbildung 3 dargestellte Ersatzschaltbild, wobei $R_1 = R_2'$ und $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}'$ angenommen werden kann. Die Spannung wird solange erhöht bis bei $U_1 = 685,2 \text{ V}$ gerade Nennstrom in der Wicklung fließt, d.h. es gilt $I_1 = I_{N1}$. Die gemessenen Verluste betragen $P_k = 30 \text{ kW}$.

Bestimmen Sie die relative Kurzschlussspannung u_k , die Kurzschlussimpedanz Z_k , sowie die Größen R_1 , R_2' , $X_{\sigma 1}$ und $X_{\sigma 2}'$.

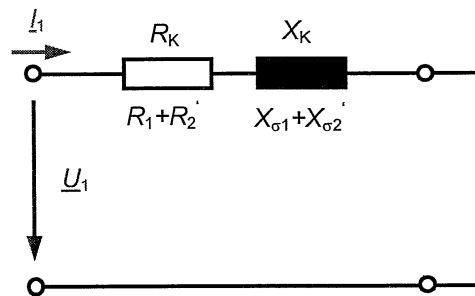


Abbildung 3: Kurzschlussersatzschaltbild des Einphasentransformators

$$u_k = \frac{685,2 \text{ V}}{6000 \text{ V}} = 11,42\%$$

$$Z_k = \frac{685,2 \text{ V}}{1200 \text{ A}} = 0,571 \Omega = u_k \cdot \frac{U_N}{S_N}$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_N^2} = 0,0208 \Omega \Rightarrow R_1 = R_2' = 0,0104 \Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 0,571 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = 0,285 \Omega$$

(4)

- c. Es werde ein Leerlaufversuch durchgeführt. Dabei wird an der Unterspannungsseite Nennspannung angelegt, die Oberspannungsseite bleibt unbelastet. Es gelte das in Abbildung 4 dargestellte Ersatzschaltbild. R_1 , R_2' , $X_{\sigma 1}$ und $X_{\sigma 2}'$ können bei diesem Versuch vernachlässigt werden. Der Strom in der Unterspannungswicklung beträgt hierbei $I_1 = 3,18 \text{ A}$, die gemessenen Leerlaufverluste betragen $P_0 = 12 \text{ kW}$. Berechnen Sie den Wirkwiderstand R_{Fe} und den Eisenverluststrom I_{Fe} . Wie groß ist der Magnetisierungsstrom $I_{\mu 1}$ und die Hauptfeldreaktanz X_H ?

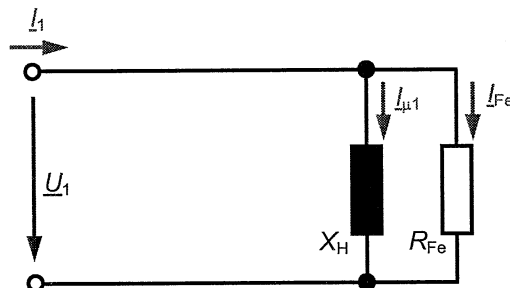


Abbildung 4: Leerlaufersatzschaltbild des Einphasentransformators

$$R_{Fe} = \frac{U_1^2}{P_0} = 32 \Omega \quad \Rightarrow \quad I_{Fe} = \frac{U_1}{R_{Fe}} = 2 \text{ A}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_1^2 - I_{Fe}^2} = 2,47 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad X_H = \frac{U_1}{I_{\mu}} = 2426,86 \Omega$$

4

- d. Auf der Oberspannungsseite des Einphasentransformators wird eine Last angeschlossen. Berechnen Sie den Strom I_1 , der auf der Unterspannungsseite in den Transformator hineinfließt, wenn die Spannung an den Klemmen der Oberspannungsseite die Nennspannung $\underline{U}_2 = (120 + j0) \text{ kV}$ erreichen soll und die Last in diesem Fall eine Scheinleistung von $\underline{S}_2 = (5,76 + j4,32) \text{ MVA}$ aufnimmt. Es gelte das in Abbildung 5 dargestellte Ersatzschaltbild. Verwenden Sie die Größen R_1 , R_2' , $X_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2}'$, R_{Fe} und X_H aus Aufgabenteil b) und c).

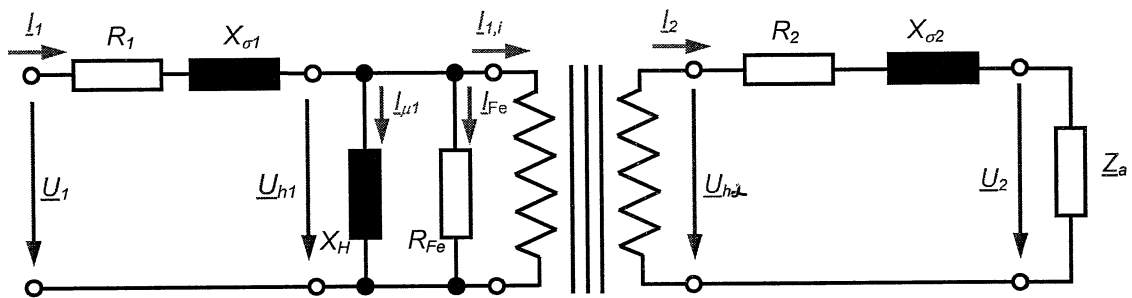


Abbildung 5: Vollständiges Ersatzschaltbild des Einphasentransformators

Sofern Sie die Größen in Teilaufgabe b) und c) nicht bestimmen konnten, rechnen Sie mit $R_1 = R_2' = 0,02 \, \Omega$, $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = 0,5 \, \Omega$, $X_H = 3 \text{ k}\Omega$ und $R_{Fe} = 3,5 \text{ k}\Omega$

$$\underline{I}_2 = \left(\frac{\underline{S}_2}{\underline{U}_2} \right)^* = (48 - j36) \text{ A}$$

$$\underline{R}_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot R_2' = 4,17 \, \Omega, \quad \underline{X}_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot X_{\sigma 2}' = 114,12 \, \Omega$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{H2} &= \underline{U}_2 + \underline{I}_2 (\underline{R}_2 + j \underline{X}_2) = 120 \text{ kV} + (4308,46 + j5327,95) \text{ V} \\ &= (124308,46 + j5327,95) \text{ V} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{H1} = \underline{U}_{H2} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = (6215,42 + j266,4) \text{ V}$$

$$\underline{I}_{1,i} = \underline{I}_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) = (960 - j720) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{XH} = \frac{\underline{U}_{H1}}{j \underline{X}_H} = (0,11 - j2,561) \text{ A}, \quad \underline{I}_{R_{Fe}} = \frac{\underline{U}_{H1}}{R_{Fe}} = (2,072 + j0,08) \text{ A}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1,i} + \underline{I}_{XH} + \underline{I}_{R_{Fe}} = (962,18 - j720,47) \text{ A}$$

(7)

alternativ

$$\underline{I}_2 = 48 - j36 \text{ A} = \left(\frac{S_2}{\underline{U}_2} \right)^*$$

$$R_2 = 8 \Omega = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot R_1' \quad X_{02} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \cdot X_1' = 200 \Omega$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{02} &= \underline{U}_2 + \underline{I}_2 (R_2 + jX_{02}) = 120 \text{ V} + (7584 + j9312) \text{ V} \\ &= (127584 + j9312) \text{ V} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{01} = \underline{U}_{02} \cdot \frac{N_1}{N_2} = (6379,2 + j465,6) \text{ V}$$

$$\underline{I}_{1i} = \underline{I}_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} = (960 - j720) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{xH} = \frac{\underline{U}_{01}}{R_{FE}} \quad \underline{I}_{xH} = \frac{\underline{U}_{01}}{jX_H} = (0,1552 - j0,1264) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{R_{FE}} = \frac{\underline{U}_{01}}{R_{FE}} = (1,823 + j0,133) \text{ A}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1i} + \underline{I}_{xH} + \underline{I}_{R_{FE}} = (961,98 - j721,99) \text{ A}$$