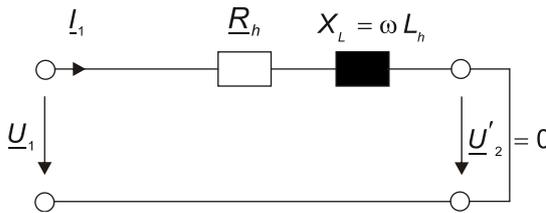


Lösung Aufgabe 1 / Übungsblatt 1

1.1

Kurzschlussversuch → ESB (auf US bezogen):



hochohmiger Querzweig kann vernachlässigt werden
Spannung so lange erhöhen, bis Nennstrom fließt!

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_k$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1N} = \underline{I}_k$$

geg.: $U_1 = 10,6 \text{ V}$; $I_1 = 23 \text{ A}$; $I_2 = 50 \text{ mA}$; $P_k = 87,5 \text{ W}$

ges.: R_k ; X_k bzw. R_1 ; R'_2 , $X_{1\sigma}$; $X'_{2\sigma}$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_1}{I_1} = 460,87 \text{ m}\Omega$$

$$P_k = R_k \cdot I_k^2 = R_k \cdot I_1^2 \quad R_k = \frac{P_k}{I_1^2} = 165,41 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 430,16 \text{ m}\Omega$$

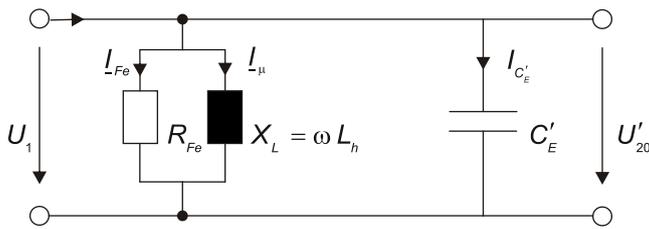
$$\rightarrow L_k = 1,369 \text{ mH}$$

R_k und X_k auf Primär- und Sekundärseite hälftig aufteilen:

$$R_1 = R'_2 = \frac{1}{2} R_k = 82,71 \text{ m}\Omega$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{1}{2} X_k = 215,08 \text{ m}\Omega \quad (L_{1\sigma} = L_{2\sigma'} = 0,685 \text{ mH})$$

Leerlaufversuch → ESB (auf US bezogen):



R_1 und R_2 können vernachlässigt werden ($R_1, R_2 \ll R_{Fe}$) genauso wie die Streuinduktivitäten
 Unterspannungsseitig mit Nennspannung
 OS im Leerlauf

$$U_1 = U_{1N} = U'_{20} = U'_{2N}$$

geg.: $U_1 = 220 \text{ V}$; $U_2 = 100 \text{ kV}$; $I_1 = 1,42 \text{ A}$; $P_L = 80 \text{ W}$

$$P_L = \frac{U_1^2}{R_{Fe}}; \quad R_{Fe} = \frac{U_1^2}{P_L} = 605 \Omega$$

$$C_E = 287 \text{ pF}$$

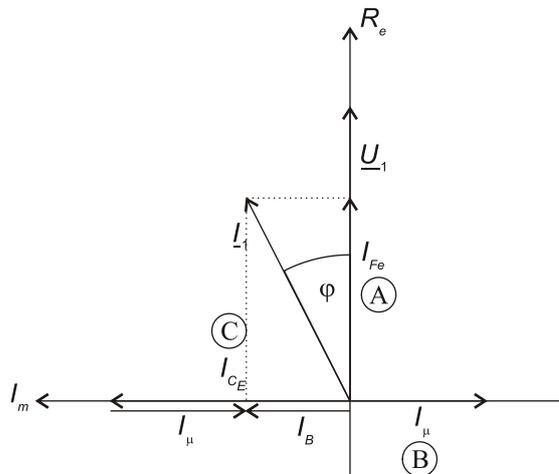
$$\text{mit } \ddot{u} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{220 \text{ V}}{100 \text{ kV}} = 2,2 \cdot 10^{-3}$$

$$C'_E = \frac{C_E}{\ddot{u}^2} = 59,30 \mu\text{F}$$

$$X_h = \frac{U_1}{I_\mu}$$

I_μ ermitteln:

$$I_{-\mu} = I_{-1} - I_{-Fe} - I_{C'_E}$$



$$I_{Fe} = \frac{U_1}{R_{Fe}} = 0,364 \text{ A (Eisenverluste)}$$

$$I_1^2 = I_{Fe}^2 + I_B^2; \quad I_B = \sqrt{I_1^2 - I_{Fe}^2} = 1,373 \text{ A}$$

$$I_B = I_{C'_E} - I_\mu; \quad I_\mu = I_{C'_E} - I_B$$

$$I_{C'_E} = U_1 \omega C'_E = 4,099 \text{ A}$$

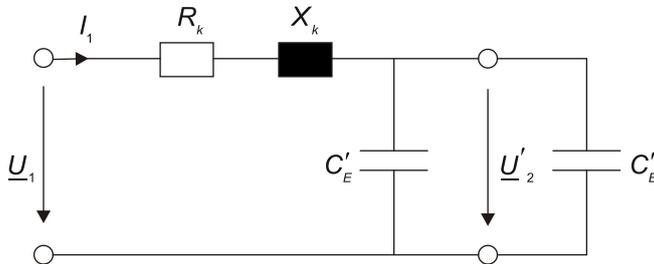
$$I_\mu = 2,73 \text{ A (Magnetisierungsstrom)}$$

$$X_h = \frac{U_1}{I_\mu} = 80,7 \Omega \quad (L_h = 256,51 \text{ mH})$$

1.2

Im Betrieb kann der hochohmige Querzweig vernachlässigt werden
 → Kurzschlusersatzschaltbild

ESB (auf US bezogen):



aus 1.1: $R_k = 165,4 \text{ m}\Omega$; $X_k = 430,2 \text{ m}\Omega$; $C'_E = 59,3 \text{ }\mu\text{F}$

$$C_B = 10 \text{ nF}; \quad C'_B = \frac{10 \text{ nF}}{\dot{u}^2} = 2,066 \text{ mF}$$

$$C'_{\text{ges}} = C'_E + C'_B = 2,125 \text{ mF}$$

$$X'_C = \frac{1}{\omega C'_{\text{ges}}} = 1,498 \text{ }\Omega$$

Spannungsteiler:

$$\frac{|U'_2|}{|U_1|} = \frac{|jX'_C|}{|R_k + j(X_k - X'_C)|} \quad \frac{U'_2}{U_1} = \frac{X'_C}{\sqrt{R_k^2 + (X_k - X'_C)^2}}$$

$$U'_2 = \frac{X'_C}{\sqrt{R_k^2 + (X_k - X'_C)^2}} U_1$$

mit $U_1 = U_{1N}$ folgt $U'_2 = 305,0 \text{ V}$

$$\underline{\underline{U_2 = \frac{U'_2}{\dot{u}} = 138,6 \text{ kV}}}$$

D.h. bei primärseitiger Erregung mit Nennspannung liegt HS von 138,6 kV an
 (ca. 40% höher als Nennspannung)!!



Spannung immer auf HS-Seite messen!

Zeigerdiagramm zu 1.2

$25 \hat{=} 1cm$

$50 A \hat{=} 1cm$

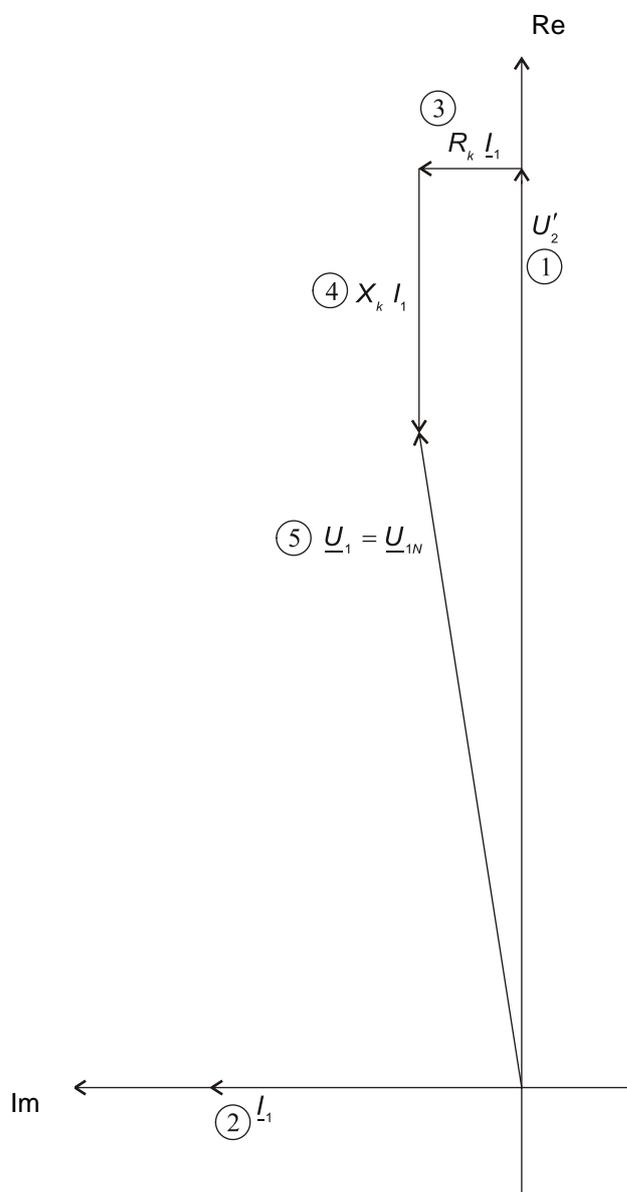
1 $U'_2 = 305,0V \hat{=} 12,2cm$

2 $I_1 = \frac{U_{1N}}{Z_{ges}} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{R_k^2 + (X_k - X'_C)^2}} = 203,6 A \hat{=} 4,1cm$

3 $R_k I_1 = 33,7V \hat{=} 1,35cm$

4 $X_k I_1 = 87,6V \hat{=} 3,5cm$

5 $U_1 = U_{1N} = 220V \hat{=} 8,8cm$



1.3

geg.: $U'_2 = 220\text{ V}$

ges.: U_1

$$|U_1| = \frac{\sqrt{R_k^2 + (X_k - X'_C)^2}}{|j X'_C|} |U'_2| = 158,69\text{ V}$$

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{\text{ges}}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_k^2 + (X_k - X'_C)^2}} = 146,9\text{ A}$$

mit $1,3 I_{1N} = 29,51\text{ A}$ folgt $I_1 > 1,3 I_{1N}$

⇒ Prüftransformator ist thermisch überlastet

Lösung Aufgabe 2 / Übungsblatt 1

2.1

$$S_N = 6 \text{ MVA} \quad U_{1N} = 5 \text{ kV} \quad U_{2N} = 100 \text{ kV}$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = 1,2 \text{ kA}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = 60 \text{ A}$$

$$\ddot{u} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = 5 \cdot 10^{-2}$$

2.2

$$u = N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{induzierte Spannung}$$

$$\phi = B \cdot A \quad \text{magnetischer Fluss}$$

Annahme: Cosinus-förmige Wechselspannung $u(t) = \hat{u} \cos \omega t = \sqrt{2}U \cos \omega t$

$$\phi = \frac{1}{N} \int u(t) dt = \frac{1}{N} \frac{\sqrt{2}U}{\omega} \sin \omega t = \hat{\phi} \sin \omega t, \quad \hat{\phi} = \frac{1}{N} \frac{\sqrt{2}U}{\omega}$$

$$\rightarrow N = \frac{1}{\hat{\phi}} \frac{\sqrt{2}U}{\omega} \quad \text{mit } u(t) = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$n = \frac{1}{\hat{\phi}} \frac{\sqrt{2}U}{\omega} \frac{d\phi}{dt} \quad U = \frac{n\hat{\phi}\omega}{\sqrt{2}} \frac{dt}{d\phi} \quad \text{mit } n = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$U = \frac{N\hat{\phi}\omega}{\sqrt{2}} \quad U \sim N \quad \hat{\phi} = B_{\max} \cdot A_{Fe}$$

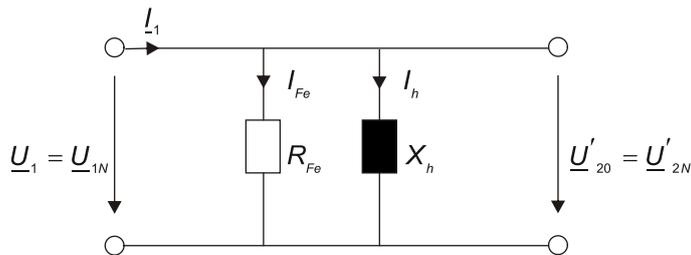
$$U = N\omega \frac{B_{\max} \cdot A_{Fe}}{\sqrt{2}}; \quad N_1 = \frac{\sqrt{2}U_{1N}}{\omega \cdot B_{\max} \cdot A_{Fe}} = 80$$

mit $U \sim N$ folgt $\underline{\ddot{u}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{N_1}{N_2}$

d.h. $N_2 = \frac{N_1}{\underline{\ddot{u}}} = \underline{\underline{1600}}$

2.3

Leerlauf ESB:



geg.: $U_1 = 5 \text{ kV}; \quad P_L = 8,8 \text{ kW}; \quad I_1 = 2,6 \text{ A}$

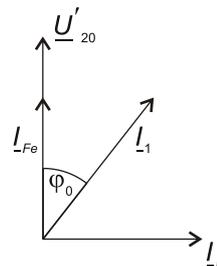
Eisenverluste: $P_{Fe} = P_0 = 8,8 \text{ kW}$

Berechnung der Ströme:

$$I_1 = I_{Fe} + I_h$$

$$I_1 \cos \varphi_0 = I_{Fe} = I_\omega$$

$$I_1 \sin \varphi_0 = I_h$$



mit $\cos \varphi_0 = \frac{P_L}{U_{1N} \cdot I_1} = 0,677$

$$\varphi_0 = 47,4^\circ$$

$$I_{Fe} = 1,76 \text{ A}$$

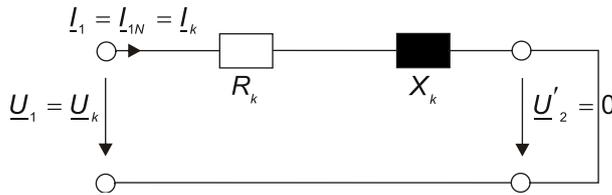
$$I_h = 1,91 \text{ A}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{Fe}} = 2,84 \text{ k}\Omega$$

$$X_h = 2,62 \text{ k}\Omega \quad (L_h = 8,33 \text{ H})$$

2.4

Kurzschluss ESB:



geg.: $\underline{U}_1 = 571V$ $P_k = 30kW$ $\underline{I}_{1N} = 1,2kA$ (aus 2.1 oder $\frac{S_{1N}}{U_{1N}}$)

$$P = U \cdot I \quad U = R \cdot I$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} \quad \underline{\underline{R_k = 20,83 m\Omega}} \rightarrow R_1 = R'_2 = 10,42 m\Omega$$

$$R_2 = \frac{R'_2}{\ddot{u}^2} = 4,2\Omega$$

$$S_k = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_{1N} = 685,2 kVA$$

$$\cos \varphi = \frac{P_k}{S_k} \quad \rightarrow \cos \varphi = 0,044 \quad \rightarrow \varphi = 87,49^\circ$$

$$Q_k = S_k \cdot \sin \varphi \quad Q_k = 684,54 kvar$$

$$X_k = \frac{Q_k}{I_k^2} \quad \underline{\underline{X_k = 0,475\Omega}} \quad (L_k = 1,51mH)$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 237,5 m\Omega$$

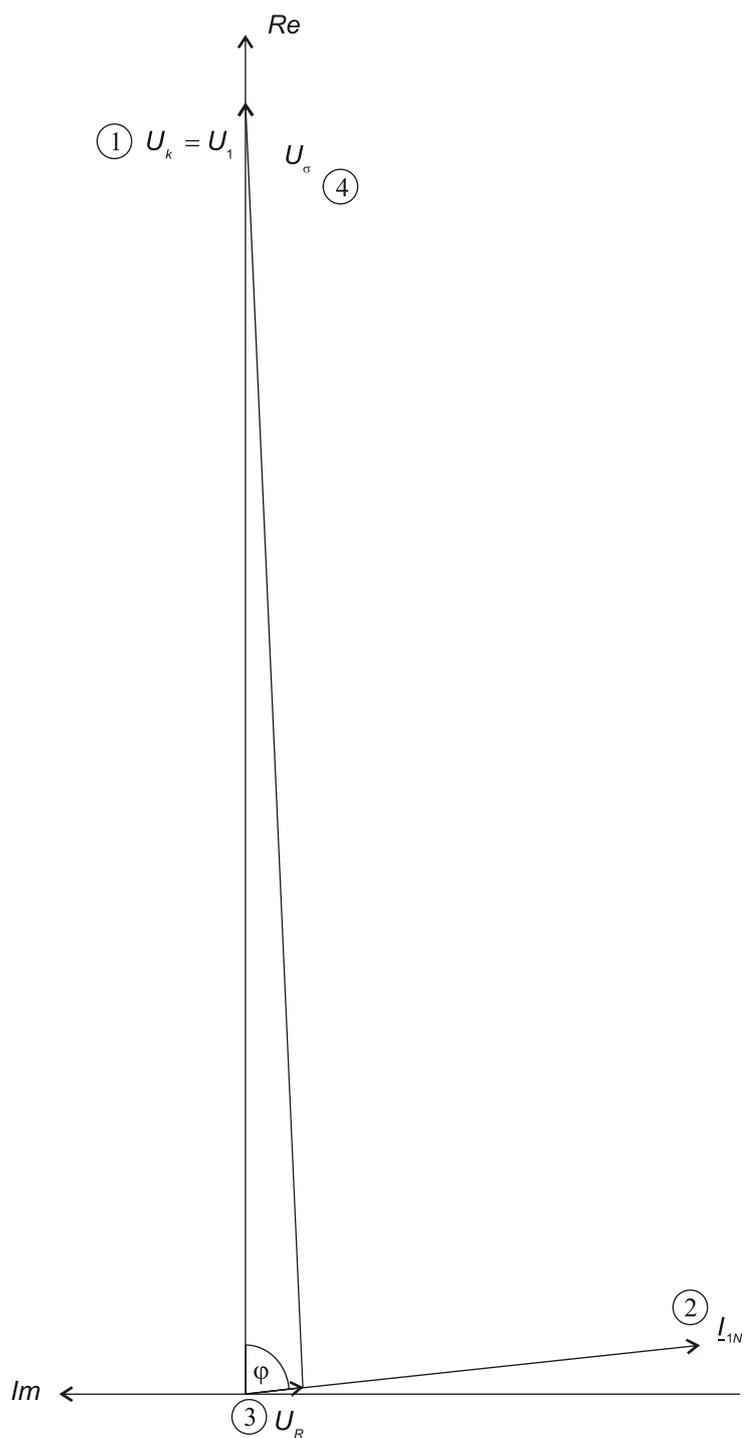
$$X_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{\ddot{u}^2} = 95\Omega$$

Zeigerdiagramm zu 2.4

$100V \hat{=} 3\text{ cm}$

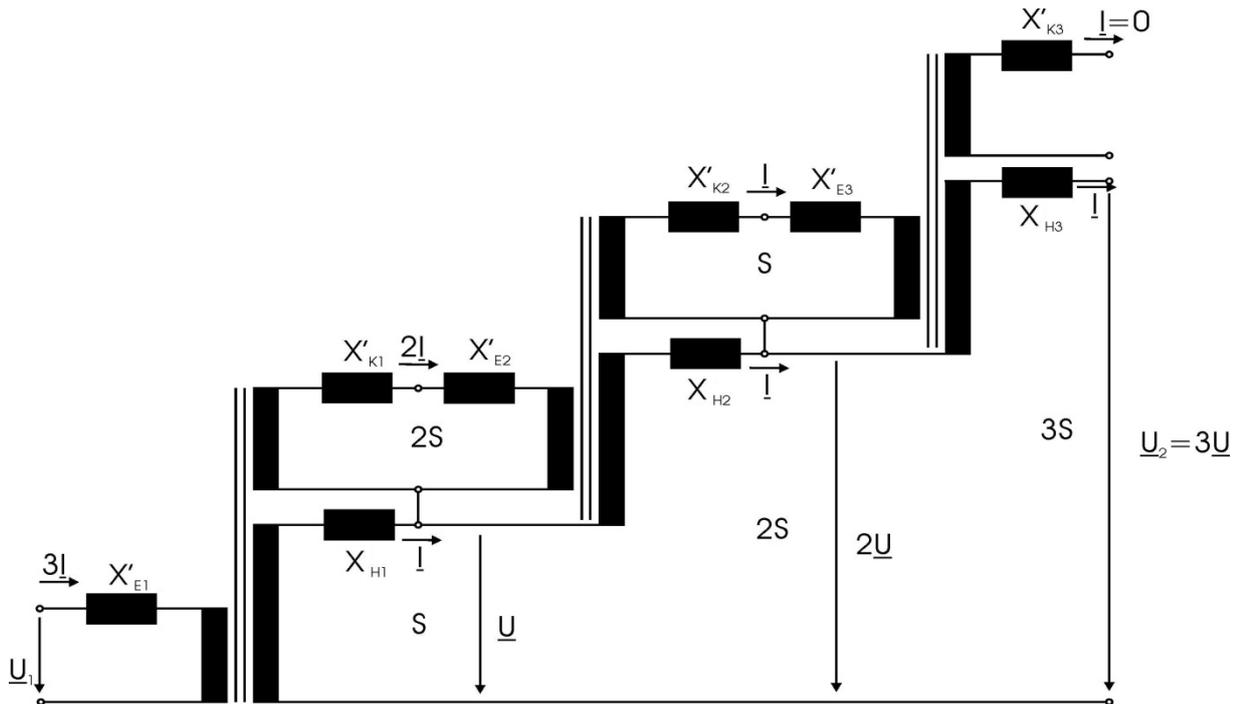
$100A \hat{=} 0,5\text{ cm}$

- 1 $U_1 = U_k = 571V \hat{=} 17,13\text{ cm}$
- 2 $I_1 = I_{1N} = 1,2\text{ kA} \hat{=} 6\text{ cm}$
- 3 $U_R = R_k \cdot I_{1N} = 25V \hat{=} 0,75\text{ cm}$
- 4 $U_\sigma = X_k \cdot I_{1N}$

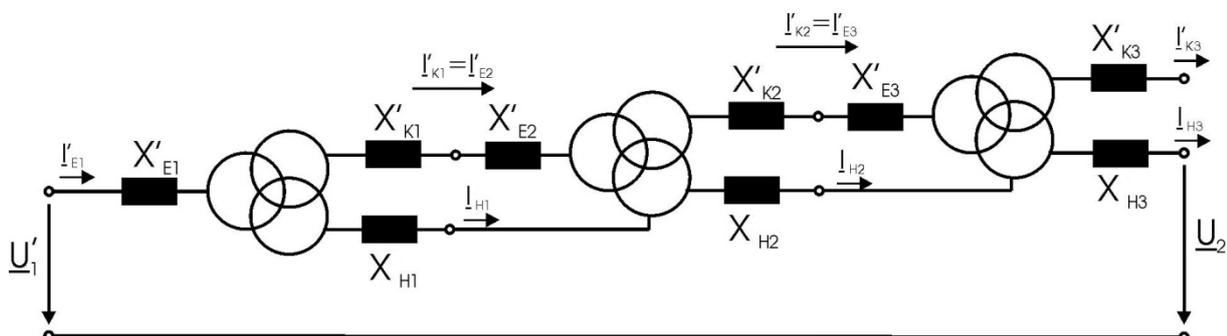


Lösung Aufgabe 3 / Übungsblatt 1

Aufgabe 3.1:



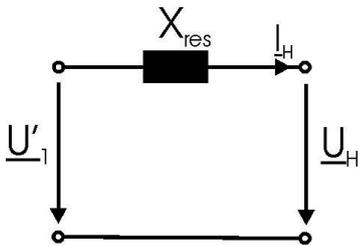
Daraus abgeleitetes Ersatzschaltbild:



E ... Erreger- bzw. Primärwicklung
K ... Übertrager- bzw. Schubwicklung
H ... Hochspannungswicklung

Werte sind auf die Hochspannungsseite umgerechnet!

Aufgabe 3.2: ESB soll auf einstufiges ESB reduziert werden!



$$\text{Es ist: } \omega_E = \omega_K \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\omega_E}{\omega_H} = \frac{\omega_K}{\omega_H}$$

Zur Berechnung von X_{res} wird die Kaskadenleistung betrachtet:

$$I_H^2 X_{\text{res}} = \sum_{v=1}^n (I_{Hv}^2 X_{Hv} + I_{Kv}^2 X'_{Kv} + I_{Ev}^2 X'_{Ev})$$

Bei drei Stufen:

$$I_H^2 X_{\text{res}} = I_{H1}^2 X_{H1} + I_{H2}^2 X_{H2} + I_{H3}^2 X_{H3} + I_{K1}^2 X'_{K1} + I_{K2}^2 X'_{K2} + I_{K3}^2 X'_{K3} + \dots \\ I_{E1}^2 X'_{E1} + I_{E2}^2 X'_{E2} + I_{E3}^2 X'_{E3}$$

Da der Leerlaufstrom (Strom durch Querzweige) vernachlässigt wird, gilt:

$$I'_E - I_H - I'_K = 0 \quad (1)$$

$$I'_{Kv} = I'_{E(v+1)} \quad (2)$$

$$I'_{Kv} = (n - v) I_H \quad (3)$$

$$I'_{Ev} = (n + 1 - v) I_H \quad (4) \quad \text{folgt unmittelbar aus (2) und (3)}$$

$$I_H = I_{Hv} \quad (5)$$

n ... Stufenzahl der Kaskade

v ... Laufvariable

Erläuterung zu (3):

Stufe 3: Koppelwicklung offen: $I'_{K3} = 0$

Stufe 2: Koppelwicklung muss $I'_{K2} = I'_{K3} + I_{H3} = I_H$ bereitstellen

Stufe 1: Koppelwicklung muss $I'_{K1} = I'_{K2} + I_H = 2 \cdot I_H$ bereitstellen

$$I_H^2 X_{\text{res}} = I_{H1}^2 X_{H1} + I_{H2}^2 X_{H2} + I_{H3}^2 X_{H3} + I_{K1}^2 X'_{K1} + I_{K2}^2 X'_{K2} + I_{K3}^2 X'_{K3} + I_{E1}^2 X'_{E1} + I_{E2}^2 X'_{E2} + I_{E3}^2 X'_{E3}$$

$$I_H^2 X_{\text{res}} = I_H^2 (X_{H1} + X_{H2} + X_{H3}) + (2I_H)^2 X'_{K1} + I_H^2 X'_{K2} + 0 + (3I_H)^2 X'_{E1} + (2I_H)^2 X'_{E2} + I_H^2 X'_{E3}$$

durch I_H^2 dividieren

$$\Rightarrow X_{\text{res}} = X_{H1} + X_{H2} + X_{H3} + 4X'_{K1} + X'_{K2} + 9X'_{E1} + 4X'_{E2} + X_{E3}$$

Bei drei identischen Stufen (Regelfall) $X_{Hv} = X_H$; $X'_{Ev} = X'_E$; $X'_{Kv} = X'_K$

$$X_{\text{res}} = 3X_H + 5X'_K + 14X'_E$$

oder allgemein für n-Stufen

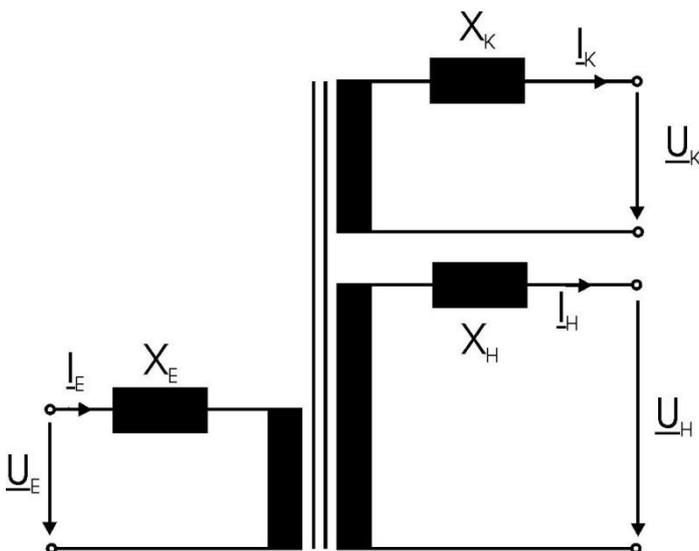
$$X_{\text{res}} = \sum_{v=1}^n [X_{Hv} + (n-v)^2 X'_{Kv} + (n+1-v)^2 X'_{Ev}]$$

\Rightarrow keine einfache lineare Addition der einzelnen Impedanzen.

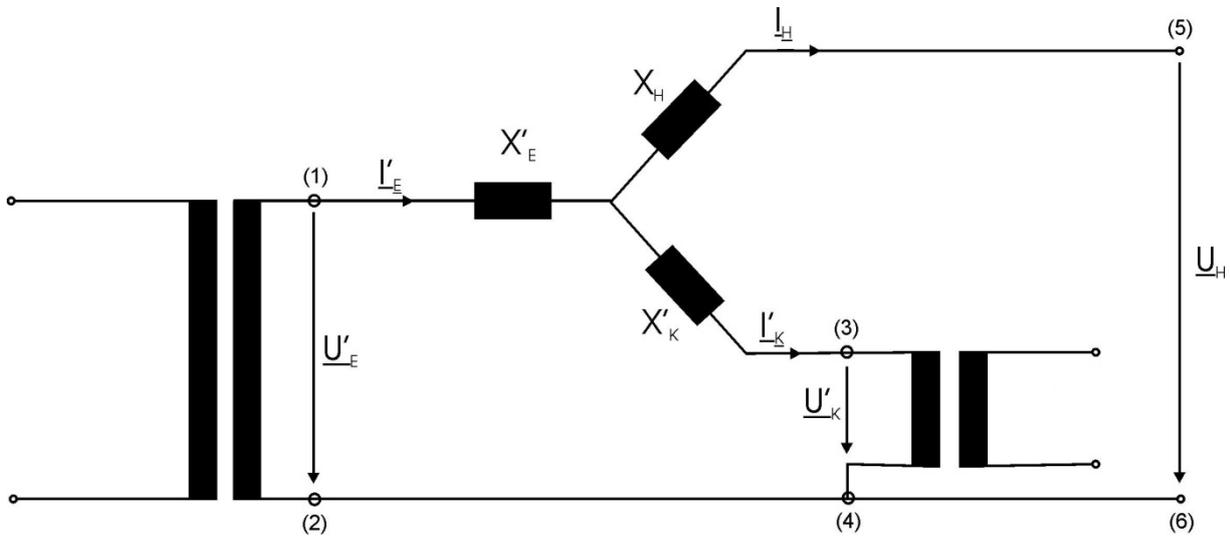
Aufgabe 3.3: Messtechnische Erfassung der Streureaktanzen einer Kaskadenstufe

Durchführung dreier Kurzschlussversuche, bei denen jeweils eine der drei Wicklungen offen bleibt. Die beiden anderen Wicklungen werden wie ein Zweiwicklungstrafo bei der Kurzschlussprüfung behandelt (Eine Seite Spannung anlegen bis Nennstrom fließt und andere Seite kurzschließen).

Schaltung einer Kaskadenstufe für den Kurzschlussversuch:



⇒ Kurzschlussersatzschaltbild eines Dreiwicklungstrafos (1 Kaskadenstufe), wenn alle Werte auf Hochspannungsseite bezogen sind:



1. Kurzschlussversuch: Kurzschluss zwischen (3) & (4) Spannung zwischen (1) & (2) anlegen ⇒ $I_H = 0$

$$\frac{U_1}{I_1} = X'_{EK} = X'_E + X'_K$$

2. Kurzschlussversuch: Kurzschluss zwischen (5) & (6) Spannung zwischen (1) & (2) anlegen ⇒ $I'_k = 0$

$$\frac{U_2}{I_2} = X'_{EH} = X'_E + X_H$$

3. Kurzschlussversuch: Kurzschluss zwischen (3) & (4) Spannung zwischen (5) & (6) anlegen ⇒ $I'_E = 0$

$$\frac{U_3}{I_3} = X'_{HK} = X_H + X'_K$$

$$\Rightarrow X'_E = \frac{1}{2} \cdot (X'_{EH} + X'_{EK} - X'_{HK})$$

$$X_H = \frac{1}{2} \cdot (X'_{EH} - X'_{EK} + X'_{HK})$$

$$X'_K = \frac{1}{2} \cdot (-X'_{EH} + X'_{EK} + X'_{HK})$$