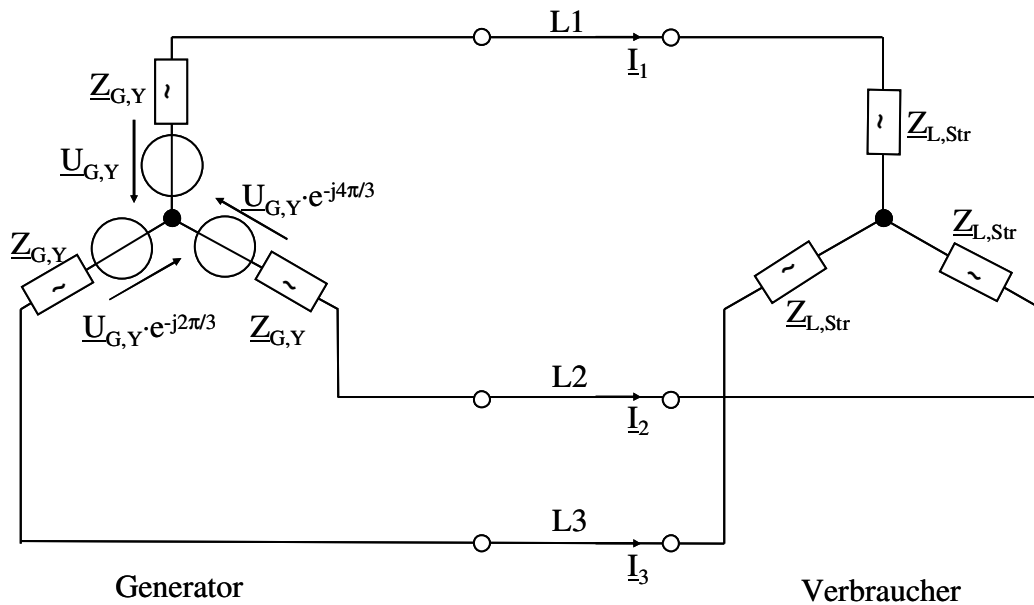


# Musterlösung

## Aufgabe 1

a)

Lösung durch Umrechnung des Generators auf Stern-Ersatzschaltbild:



$$U_{G,Y} = 690 \text{ V} / \sqrt{3} = 398 \text{ V}$$

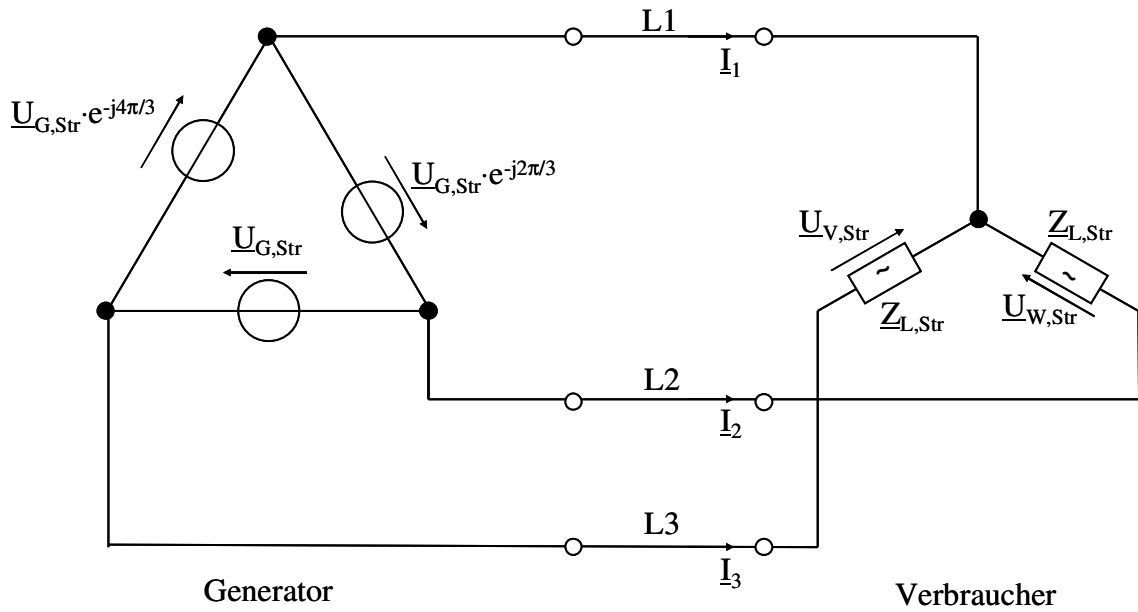
$$\underline{Z}_{G,Y} = \underline{Z}_{G,Str} / 3 = 0,333 \text{ } \Omega \cdot e^{j20^\circ} = (0,3132 + j0,1140) \text{ } \Omega$$

$$\underline{Z}_{L,Str} = 50 \text{ } \Omega \cdot e^{j40^\circ} = (38,30 + j32,14) \text{ } \Omega$$

$$I_1 = \frac{U_{G,Y}}{|\underline{Z}_{G,Str} + \underline{Z}_{L,Str}|} = \frac{398 \text{ V}}{|(0,3132 + j0,1140) \text{ } \Omega + (38,30 + j32,14) \text{ } \Omega|} = 7,92 \text{ A}$$

$$I_{U,G} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = 4,57 \text{ A}$$

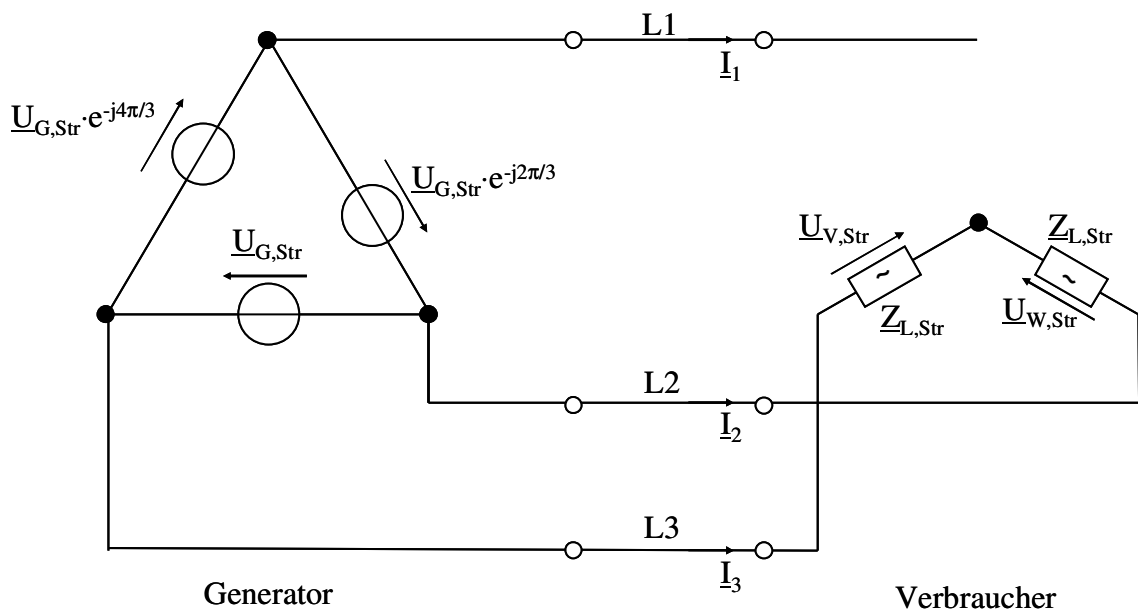
b)  $U_{U,Str} = 0$  (Aufgabenstellung)



Also liegt an den Strängen V und W jeweils die Leiterspannung:

$$U_{V,Str} = U_{W,Str} = 690 \text{ V}$$

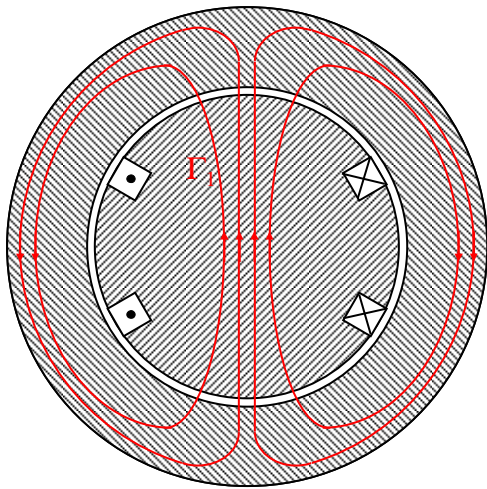
c) Der Strang U des Verbrauchers ist nicht mit dem Netz verbunden. Also teilt sich die Leiterspannung  $U_{23}$  symmetrisch auf die Stränge V und W auf:



$$U_{V,Str} = U_{W,Str} = 345 \text{ V}$$

Aufgabe 2:

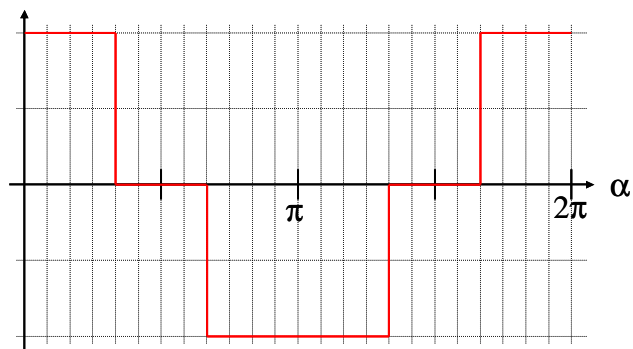
a)



Punktabzug

- wenn die Linien im Luftspalt offensichtlich nicht radial verlaufen
- wenn die Pfeilung nicht stimmt

b)



c)

Durchflutungsgesetz entlang der Kurve  $\Gamma_1$ :  $H_\delta \cdot 2 \cdot \delta = w_f \cdot I_f$

mit  $B_\delta = \mu_0 \cdot H_\delta$  folgt: 
$$I_f = \frac{B_\delta \cdot 2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot w_f} = 4,8 \text{ A}$$

### Aufgabe 3:

a)

$$Z_L = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = 1,54 \, \Omega$$

$$\varphi_L = \arccos \frac{P_{el,N}}{S_N} = \arccos \frac{P_{el,N}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N} = 39,66^\circ$$

$$\underline{Z}_L = Z_L \cdot e^{j\varphi_L} = 1,54 \, \Omega \cdot e^{j39,66^\circ}$$

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{30 \, \text{kV}}{420 \, \text{V}} = 71,43$$

$$\underline{Z}_L' = \underline{Z}_L \cdot \ddot{u}^2 = 7860 \, \Omega \cdot e^{j39,66^\circ}$$

b)

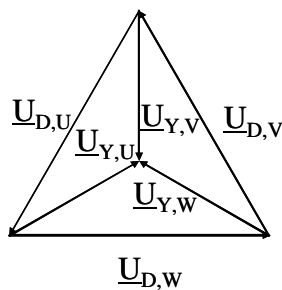
Berechnung des Primärstroms.

$$\underline{Z}_L' = 7860 \, \Omega \cdot e^{j39,66^\circ} = (6051 + j5016) \, \Omega$$

$$I_1 = I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_L' + \underline{Z}_T|} = \frac{30 \, \text{kV}}{\sqrt{3} \cdot |6051 + 25 + j5016 + j30| \, \Omega} = 2,19 \, \text{A}$$

$$I_2 = \ddot{u} \cdot I_2' = 156 \, \text{A}$$

c)



Der Transformator habe primär eine Sternschaltung. In einer sekundären Sternschaltung können durch Vertauschen der Phasenfolge und/oder der Polarität der Sekundärwicklung die Phasenlagen  $0^\circ$ ,  $+60^\circ$ ,  $+120^\circ$ ,  $+180^\circ$ ,  $+240^\circ$  und  $+300^\circ$  erreicht werden. Also sind Yy0, Yy2, Yy4, Yy6, Yy8 und Yy10 möglich.

Bei einer primären Dreieckschaltung können mit einer sekundären Sternschaltung die Phasenlagen  $+30^\circ$ ,  $+90^\circ$ ,  $+150^\circ$ ,  $+210^\circ$ ,  $+270^\circ$  und  $+330^\circ$  erreicht werden. Also sind Dy1, Dy3, Dy5, Dy7, Dy9 und Dy11 möglich

Dy- und Yy-Transformatoren können daher niemals die gleiche Schaltgruppe aufweisen.

#### Aufgabe 4:

a)

$$\text{ Bemessungsstrom: } \underline{I}_{1N} = 44 \text{ A} \cdot e^{-j \arccos(0,88)} = (38,72 - j20,90) \text{ A} = (3,872 - j2,090) \text{ cm} \cdot 10 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$\text{ Bemessungs-Drehmoment: } M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} = 143 \text{ Nm}$$

$$\text{ Wirkstrom im Kipp-Punkt (Kreisradius): } I_{w,Kipp} = \frac{M_{Kipp}}{M_N} \cdot \Re\{\underline{I}_{1N}\} = 94,77 \text{ A} = 9,477 \text{ cm} \cdot 10 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

b)

Lösung mit Kloss'scher Formel (genauer):

$$\text{ Schlupf im Bemessungspunkt: } s_N = \frac{1500 \text{ min}^{-1} - 1470 \text{ min}^{-1}}{1500 \text{ min}^{-1}} = 2 \%$$

$$\text{ Kloss'sche Formel: } \frac{M_N}{M_{Kipp}} = \frac{2}{\frac{s_{Kipp}}{s_N} + \frac{s_N}{s_{Kipp}}} \Rightarrow s_{Kipp} = \left( \frac{M_{Kipp}}{M_N} \pm \sqrt{\left( \frac{M_{Kipp}}{M_N} \right)^2 - 1} \right) \cdot s_N$$

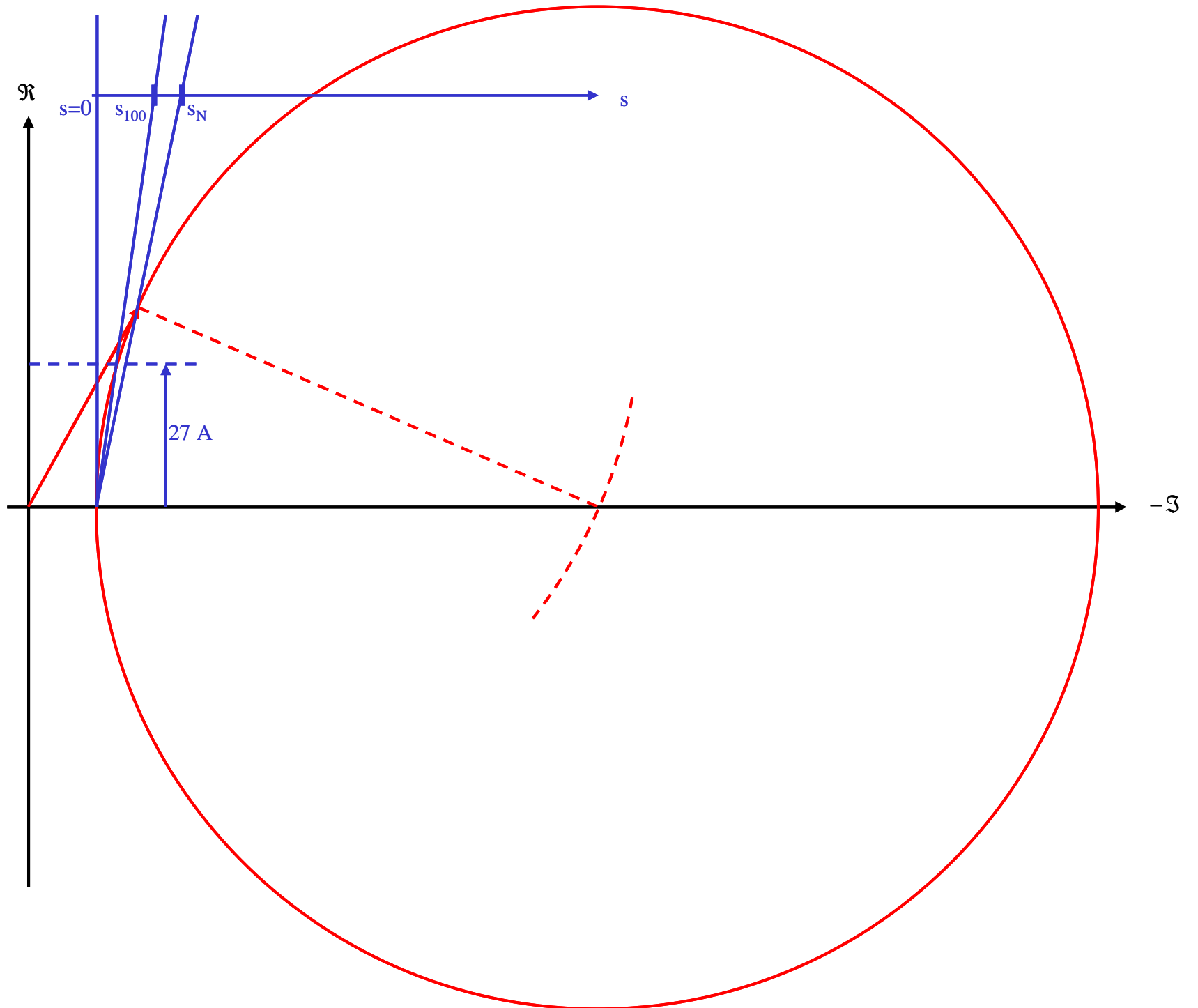
$$\text{ Da } s_{Kipp} > s_N \text{ ist nur positive Wurzel relevant: } s_{Kipp} = \left( 2,45 \pm \sqrt{(2,45)^2 - 1} \right) \cdot s_N = 4,67 \cdot s_N = 9,4 \%$$

$$\frac{M_{100}}{M_{Kipp}} = \frac{2}{\frac{s_{Kipp}}{s_{100}} + \frac{s_{100}}{s_{Kipp}}} \Rightarrow s_{100} = \left( \frac{M_{Kipp}}{M_{100}} \pm \sqrt{\left( \frac{M_{Kipp}}{M_{100}} \right)^2 - 1} \right) \cdot s_{Kipp}$$

Da  $s_{100} > s_{Kipp}$  ist nur negative Wurzel relevant:

$$s_{100} = \left( 3,5 \pm \sqrt{(3,5)^2 - 1} \right) \cdot s_{Kipp} = 0,146 \cdot s_{Kipp} = 1,37 \%$$

$$n_{100} = (1 - 1,37 \%) \cdot n_0 = 1479 \text{ min}^{-1}$$



Graphische Lösung (schneller):

$$\text{Wirkstrom im Betriebspunkt: } I_{W,100} = \Re\{I_{1N}\} \cdot \frac{100 \text{ Nm}}{M_N} = 27 \text{ A} = 2,7 \text{ cm} \cdot 10 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$\text{Schlupf im Bemessungspunkt: } s_N = \frac{1500 \text{ min}^{-1} - 1470 \text{ min}^{-1}}{1500 \text{ min}^{-1}} = 2 \%$$

$$\text{Abgelesener Schlupf bei 100 Nm: } s_{100} = \frac{1,1 \text{ cm}}{1,6 \text{ cm}} \cdot 2 \% = 1,37 \%$$

$$\text{Drehzahl: } n_{100} = (1 - 1,37 \%) \cdot n_0 = 1479 \text{ min}^{-1}$$

c)

$$M_{\text{Kipp,Y}} = \frac{M_{\text{Kipp},\Delta}}{3} = 117 \text{ Nm}$$

Aufgabe 5:

a)

$$\text{Drehzahl: } n_0 = \frac{f_N}{p} = 750 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{Scheinleistung: } S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = 17,7 \text{ MVA}$$

Bestimmung der Polradspannung aus  $\underline{U}_{PN} = \underline{U}_1 - j X_1 \cdot \underline{I}_1$ :

rechnerische Lösung:

$$\text{Statorstrom: } I_N = (-722,5 + j447,8) \text{ A}$$

$$\text{Synchronreaktanzen: } X_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot \frac{1}{K_C} = 13,58 \ \Omega$$

Polradspannung:

$$U_{PN} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} + X_1 \cdot \Im\{I_N\}\right)^2 + \left(X_1 \cdot \Re\{I_N\}\right)^2} = 17,81 \text{ kV}$$

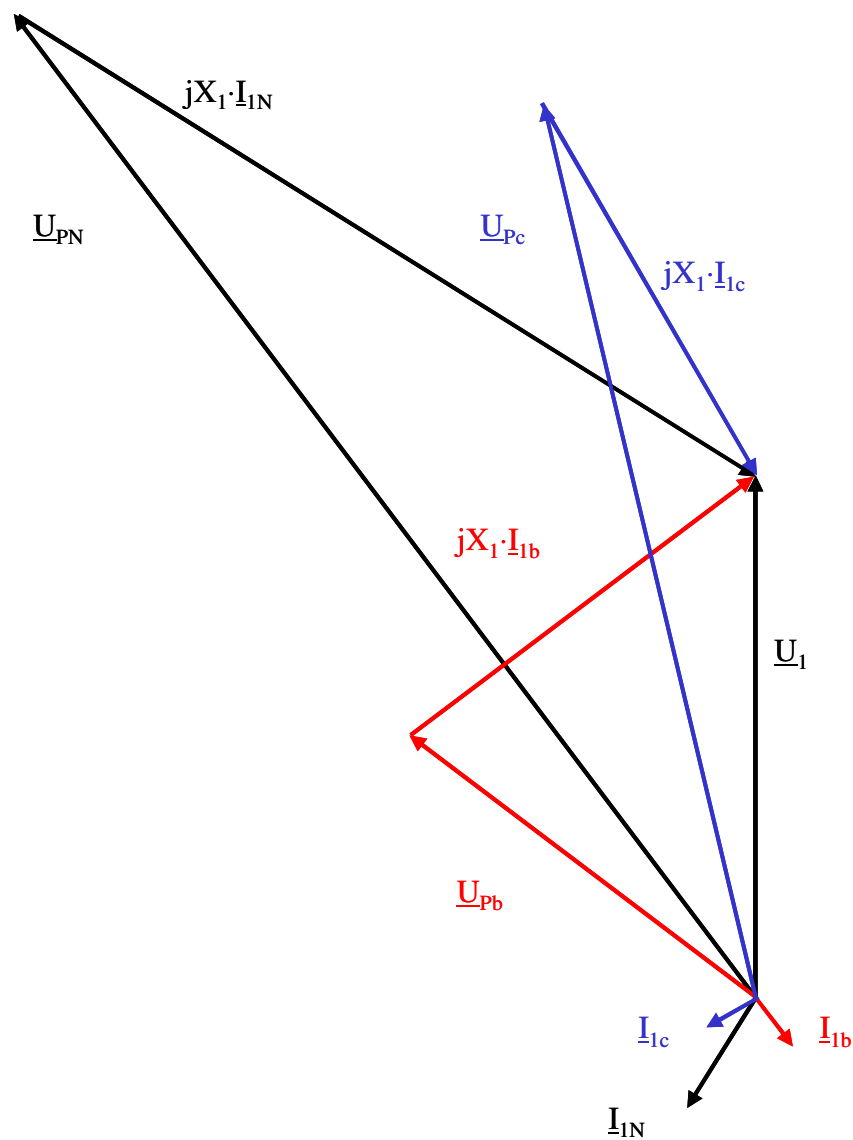
Graphische Lösung:

$$U_1 = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 6,9 \text{ kV} = 6,9 \text{ cm} \cdot 1 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$\underline{I}_N = I_N \cdot e^{j(180^\circ - \arccos \varphi_N)} = 850 \text{ A} \cdot e^{j148,22^\circ} = 1,7 \text{ cm} \cdot 500 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$X_1 \cdot I_N = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{K_C} = 11,54 \text{ kV} = 11,54 \text{ cm} \cdot 1 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$U_{PN} = 17,8 \text{ kV (abgelesen)}$$



b)

$$\text{Statorstrom: } \underline{I}_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_N} \cdot \left( -\cos \varphi_b - j\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_b} \right) = (-384,9 - j288,7) \text{ A}$$

$$\text{Polradspannung: } U_{pb} = \sqrt{\left( U_N / \sqrt{3} + X_1 \cdot \Im\{\underline{I}_b\} \right)^2 + \left( X_1 \cdot \Re\{\underline{I}_b\} \right)^2} = 6,03 \text{ kV}$$

$$\text{Erregerstrom: } I_{fb} = \frac{U_{pb}}{U_{PN}} \cdot I_{fN} = 33,9 \text{ A}$$

Graphische Lösung:

$$\underline{I}_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_N} \cdot e^{j(180^\circ - \arccos \varphi_b)} = 418 \text{ A} \cdot e^{j143,13^\circ} = 0,84 \text{ cm} \cdot 100 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$X_1 \cdot I_b = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{K_C} \cdot \frac{I_b}{I_N} = 5,68 \text{ kV} = 5,68 \text{ cm} \cdot 1 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$U_{pb} = 6 \text{ kV (abgelesen)}$$



Erregerstrom:  $I_{fb} = \frac{U_{Pb}}{U_{PN}} \cdot I_{fN} = 33,9 \text{ A}$

c)

zusätzlicher Statorstrom:  $\underline{I}_c = 481,1 \text{ A } e^{-j60^\circ}$

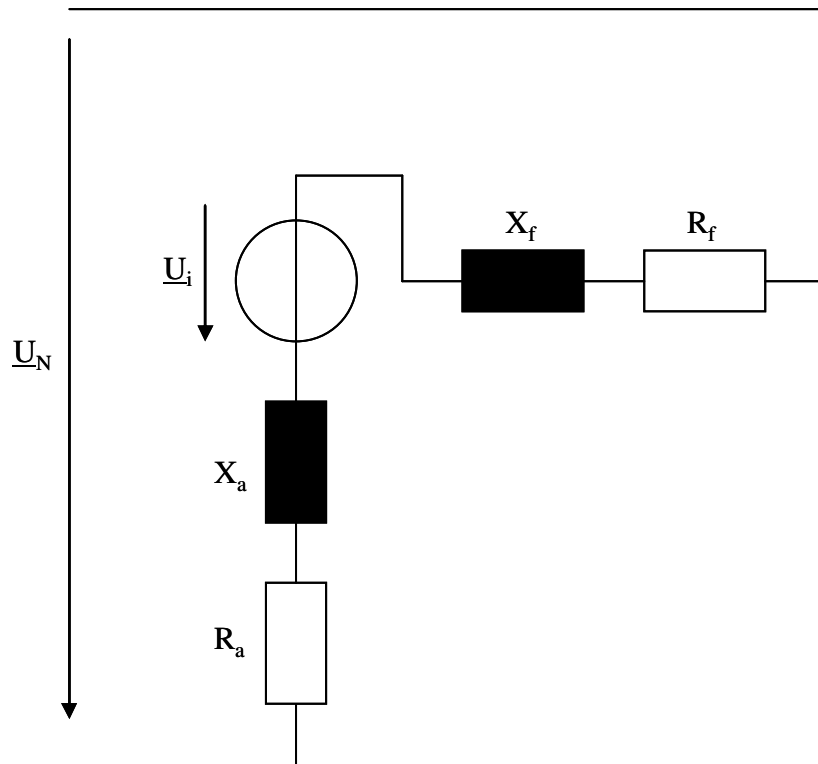
$|\vartheta|$  steigt bzw.  $\vartheta$  wird kleiner

n bleibt konstant

Der Erregerstrom muss erhöht werden, da die Blindleistung im Netz ansteigt.

Aufgabe 6:

a)



Elektrisch aufgenommene Leistung:  $P_{N,el} = \frac{P_{N,mech}}{\eta_N} = 833,3 \text{ W}$

Reibleistung:  $P_{RN} = 2\pi n_N \cdot M_R = 62,8 \text{ W}$

Elektrische Verlustleistung:  $P_{V,el} = P_{N,el} - P_{RN} - P_N = 270,5 \text{ W}$

Aufgenommene Scheinleistung:  $S_N = \frac{P_{N,el}}{\cos \varphi_N} = 1042 \text{ VA}$

Blindleistung:  $Q_N = S_{N,el} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N} = 625 \text{ W}$

Strom: 
$$I_N = \frac{S_N}{U_N} = 4,53 \text{ A}$$

Anker- u. Erregerwiderstand: 
$$R_a + R_f = \frac{P_{V,el}}{I_N^2} = 13,18 \text{ } \Omega$$

Anker- und Erregerreaktanz: 
$$X_a + X_f = \frac{Q_N}{I_N^2} = 30,47 \text{ } \Omega$$

Induzierte Spannung: 
$$U_{iN} = \sqrt{U_N^2 - (X_a + X_f)^2 \cdot I_N^2} - (R_a + R_f) \cdot I_N = 124,3 \text{ V}$$

Spannungskonstante (Effektivwert): 
$$k\phi_N = \frac{U_N}{n_N} = 2,49 \text{ Vs}$$

b)

$$I_K = \frac{U_N}{\sqrt{(R_a + R_f)^2 + (X_a + X_f)^2}} = 6,93 \text{ A}$$

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} = 1,59 \text{ Nm}$$

$$M_K = \left(\frac{I_K}{I_N}\right)^2 \cdot M_N = 3,72 \text{ Nm}$$

c)

$$I_0 = \sqrt{\frac{M_R}{M_N}} \cdot I_N = 1,61 \text{ A}$$

$$k\Phi_0 = \frac{I_0}{I_N} \cdot k\phi_N = 0,885 \text{ Vs}$$

$$U_{i0} = \sqrt{U_N^2 - (X_a + X_f)^2 \cdot I_0^2} - (R_a + R_f) \cdot I_0 = 203,5 \text{ V}$$

$$n_0 = \frac{U_{i0}}{k\phi_0} = 13.800 \text{ min}^{-1} < 14.000 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \text{keine Überwachung notwendig}$$