

Tentamen i ELTEKNIK för E3, EEK 141

Datum:	onsdag, den 10 januari 2024
Tid	14.00 – 18.00
Lösningar:	På hemsidan senast den 12 januari
Betygsgränser:	≥ 25 ger godkänt, 4:a ≥ 36 p och 5:a ≥ 43 p
Resultat:	Anslås senast 24 januari 2024
Granskning:	Se resultatlista
Hjälpmedel:	Typgodkänd räknare, räknetabeller (Standard Mathematical Tables, Tefyma, Elfyma, Beta) samt Physics Handbook.
Lärare:	Thomas Hammarström, tel. 772 16 49

OBS! För att få full poäng på uppgifterna krävs att använda storheter definieras. Storheter i visardiagram måste definieras i motsvarande kretsschema med utsatta referensriktningar. Beräkningar skall motiveras så att beräkningsgången framgår. Förståelse premieras. Fråga under tentan om något är oklart!

1. Effektuttaget för en planerad ny stadsdel i Göteborg beräknas till 30 MW. Stadsdelen kommer att matas med en transformator med överföringstalet 145/12 kV. En storindustri, som kommer att finnas där, beräknas att belasta nätet med 10 MW vid $\cos\varphi = 0,75$. Göteborg Energi kräver att $\cos\varphi$ inte skall vara mindre än 0,98 om inte extra debitering för reaktivt effektuttag skall behöva ske. I nätet antas 50 Hz vara frekvensen.

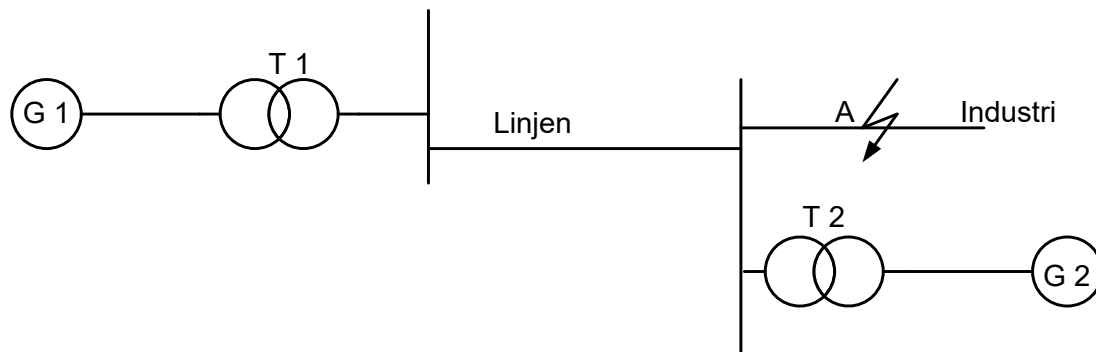
Beräkna den nödvändiga kondensatoreffekten för införd faskompensering, så att industrin uppfyller kravet. Vilket värde har dessa kondensatorer om de skall vara Delta – kopplade?

Resten av stadsdelen (bostäder, kontor, sjukhus mm) kommer att förbruka 20 MW vid $\cos\varphi = 0,9$. Dimensionera kondensatorbatteriet som Göteborg Energi behöver koppla in i ställverket för att uppfylla dessa krav? Ange batteriets effekt och kondensatorenas kapacitans om vi förutsätter att dessa y – kopplas.

(5p)

2. Effekten från ett kraftverk matas ut på transmissionsnätet via en 400 kV luftledning med en serieinduktans på 0,25 H/fas (resistansen försummas). Spänningen vid båda ändar av ledningen hålls konstanta på 405 kV och 135 MVAR reaktiv effekt matas in på ledningen från kraftverksidan. Frekvensen är 50 Hz.
- a) Hur stor är den reaktiva effektkonsumtionen i luftledningen? Hur mycket reaktiv effekt överförs? Beräkna strömmens amplitud i ledningen. (2p)
 - b) Rita ett visardiagram över spänningar och strömmen, för en ekvivalent Y-fas. (2p)
 - c) Hur stor är överföringsvinkeln och effektvinkeln? Hur stor aktiv effekt överförs via ledningen? (3p)
3. En trefas asynkronmaskin (AM) är märkt: $U_n = 690$ V, $P_n = 4$ kW, $n_n = 955$ rpm, 50 Hz
- a) Hur många poler och vilket märkmoment har asynkronmaskinen? (1p)
Vid tomgång drar motorn en tomgångsström på $9 \angle -88.85^\circ$ A, och vid start blir startströmmen $70 \angle -61.57^\circ$ A. I båda fallen är fasspänningen använd som referens.
 - b) Rita det ekvivalenta schemat för AM som gäller vid tomgång och det ekvivalenta schemat som gäller vid start. (2p)
 - c) Bestäm parametervärdena i det ekvivalenta schemat för resistanserna [Ω /fas] och induktanserna [H/fas]. I schemat är magnetiseringsinduktansen 18 gånger större än statorns läckinduktans. R_{Fe} kan försummas. Andra förenklande antaganden kan göras om det är lämpligt, med det krävs att det då motiveras. (3p)
 - d) Startströmmen som beräknas med hjälp av det ekvivalenta schemat är lägre än startströmmen som blir vid direktinkoppling mot nätet, vad beror denna skillnad på? (2p)

4. Beräkna kortslutningseffekt, kortslutningsström och dimensionerade stötström vid trefasig kortslutning i punkt A i figuren nedan för ett 50 Hz system. Använd metoden med delkortslutningseffekter. Industrin levererar ingen effekt till kortslutningsstället. Ledningen till industrin är av samma typ som "Linjen" men belägen 3 km efter skensystemet (där linjen och transformator T 2 är anslutna).



Följande data gäller för generatorerna, transformatorerna och linjen:

Generator G1	48 MVA, 10 kV	$x_d = 12 \%$
Generator G2	50 MVA, 20 kV	$x_d = 20 \%$
Transformator T1 d/YN	48 MVA, 10/130 kV	$z_k = 8 \%$
Transformator T2 d/YN	50 MVA, 20/130 kV	$z_k = 10 \%$
Linjen (luftledning)	40 km $L = 1.3 \text{ mH/fas,km}$	$r = 0,15 \text{ } \Omega/\text{fas,km}$

(8p)

5. En enfastransformator är märkt 400/230V, 800VA. På transformatorn görs ett kortslutningsprov och ett tomgångsprov. Vid kortslutningsprovet matas lindningen (vilken av dem?) med 15V. Transformatorn drar då 1.5A och 12W aktiv effekt. Vid tomgångsprovet matas transformatorn på (ja vilken sida då och med vilken spänning?). Den drar då en aktiv effekt på 30W samt en skenbar effekt på 65VA.

a) Beräkna X_k och R_k i det förenklade schemat, hänfödda till den sida som görs enligt standardproceduren. (2)

Transformatorn ansluts till 400V och belastas med en ren resistans på 200Ω .

b) Beräkna klämspänningen på nedspänningssidan och strömmen till lasten (2)

c) Vad är verkningsgraden för transformatorn med denna last? (2)

6. En en-kvadrant LS-omriktare är ansluten till en trefasig helvågslodliktare matad från ett äldre 380 V trefasnät. Dock har en säkring borttagits i en av faserna så LS-omriktaren matas endast av två faser. Men vi antar att glättningen är utförd så DC-spänning ändå kan erhållas. LS-omriktaren ger därför en stabil likspänning till provning av 120-volts-apparater som drar 6 A. Switchfrekvensen i omriktaren är 100 kHz.

a) Rita kopplingen. (1p)

b) Hur lång tid under varje modulationsperiod leder transistoren? (2p)

c) Hur ser spänningen över induktansen i LS-omriktaren ut under två modulationsperioder? Gradera axlarna på diagrammet. (2p)

7. Teoriuppgifter

- a) Varje luftledning och varje kabelledning kännetecknas av en viss resistans, induktans och kapacitans. Förklara kort vad det är som bestämmer storleken av L och C. Förklara vad menas med längs- och tvärspanningsfall i en kort ledning. (2p)
- b) Om du ska använda högspänning (> 10 kV) och endast behöver en mycket låg switchfrekvens, vilken komponenttyp skulle du välja? Om istället spänningskravet är mindre men krav på switchfrekvensen mycket hög, vilken typ väljer du lämpligen då? (2p)
- c) Beskriv synkronmaskinens funktion. Varför är den svårare att få i rotation än asynkronmaskinen? (2p)
- d) Beskriv i princip (Gärna med ett enkelt schema) hur elsystemet bör utformas i elcentralen om du endast har ett 4-ledarsystem men ändå vill ha möjlighet att ansluta en 3-fas jordfelsbrytare (ledtråd jmf 4 och 5 ledarsystem)? (2p)
- e. Rita momentkurvor, $T = f(n)$, för en separatmagnetiserad likströmsmotor vid tre följande driftsfall: 1) $U_a = U_n$ och $I_f = I_{fn}$ 2) $U_a = 0,5 U_n$ och $I_f = I_{fn}$ 3) $U_a = U_n$ och $I_f = 0,5 I_{fn}$. Markera märkmomentet T_n för alla driftsfall (i princip). (3p)

Formelblad i Elteknik

Trefassystem:

$$U = \sqrt{3}U_f$$

$$\underline{Z}_Y = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3} \qquad I = \sqrt{3}I_\Delta$$

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi = 3U_f I \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi = 3U_f I \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3}UI = 3U_f I \qquad \underline{S} = 3\underline{U}_f \underline{I}^* = P + jQ$$

Spänningsfall:

$$U_{längsf} = a = R_l I \cos \varphi_2 + X_l I \sin \varphi_2$$

$$U_{tvärf} = b = X_l I \cos \varphi_2 - R_l I \sin \varphi_2$$

Transformatorn:

$$E = 4,44 f N A \hat{B}$$

$$\frac{U_1}{U_2} \cong \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{I_2}{I_1} \quad Z'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2$$

$$\Delta U = \sqrt{3} I (R_k \cos \varphi + X_k \sin \varphi)$$

Formelblad i Elteknik

Synkronmaskin:

$$P = 3 \frac{E_f U_f}{X_d} \sin \delta$$

Likströmsmaskin:

$$U_a = E_a \pm R_a I_a$$

$$T = k \cdot I_f \cdot I_a$$

Kraftelektronik:

Likriktare:
$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_{ab}(\omega t) d(\omega t)$$

$$P = 30 \times 10^6 \text{ W} - \text{generellt}$$

$$145/12 \text{ kV}$$

$$P_{\text{ind}} = 10 \text{ MW} \quad \cos \varphi = 0,75 \Rightarrow \varphi = 41,9$$

ind antos

$$\Rightarrow Q = P \cdot \tan \varphi = \underline{8,82 \text{ MVAr}}$$

$$\text{Om } \varphi \text{ varit } 0,98 \Rightarrow \varphi_2 = 11,5$$

$$\text{s\u00e5: } Q_2 = P \cdot \tan \varphi_2 = 2,03 \text{ MVAr}$$

$$\text{s\u00e5: } Q_{\Delta} = 8,82 - 2,03 \approx 6,8 \text{ MVAr}$$

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot W \cdot C U_c^2$$

$$U_c = 12 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\frac{Q_{\Delta}}{3 \cdot 2\pi f \cdot U_c^2} = \frac{6,8 \times 10^6}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot (12 \times 10^3)^2} = 50 \mu\text{F} / f_0 - \text{or kapacit\u00e4t}$$

belastning 2 $P_2 = 20 \times 10^6$

$$Q = P_2 \cdot \tan \varphi = 20 \times 10^6 \cdot \tan(25,8) = 9,6 \text{ MVAr}$$

$$\cos \varphi = 0,9 \Rightarrow \varphi = 25,8$$

minst vi beh\u00f6ver:

$$\varphi_2 = 11,5 \quad Q' = P_2 \cdot \tan \varphi_2 = 20 \times 10^6 \cdot \tan(11,5) \approx 1,97 \text{ MVAr}$$

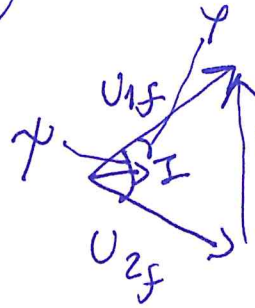
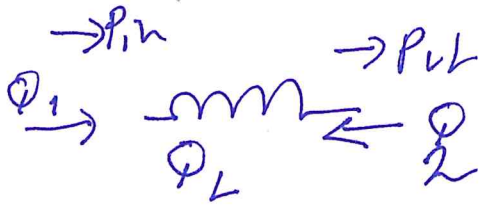
$$Q_{\text{cap}} = Q - Q' = 7,72 \text{ MVAr}$$

$$Q_{\text{cap}} = 3 \cdot W \cdot C U_c^2 = [x] = W C U_c^2$$

$$\frac{Q_{\text{cap}}}{2\pi f \cdot U_c^2} = \frac{7,72 \times 10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot (12 \times 10^3)^2} \approx 171 \mu\text{F} / f_0$$

2. $L = 0,25 \text{ H/fas}$ $Q_1 = 135 \text{ MVAr}$

$U_{1f} = U_{2f} = \frac{405 \text{ kV}}{\sqrt{3}}$



$Q_1 = -Q_2$
 $Q_1 - Q_1 = Q_L$
 $Q_1 = \frac{Q_L}{2}$

a) 1 ledningarnas $Q_L = 2 \cdot Q_1 = 270 \text{ MVAr}$

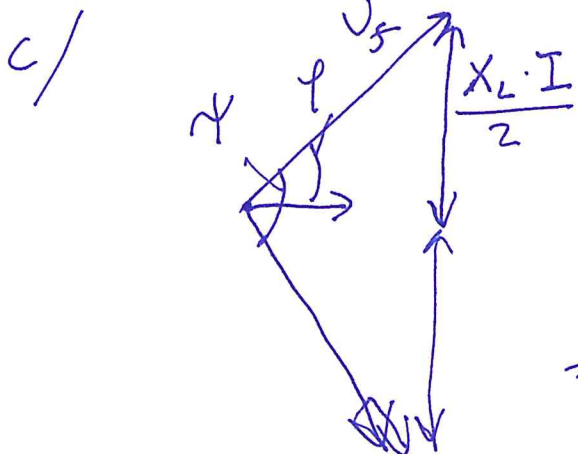
Då $U_{1f} = U_{2f} \Rightarrow$ ingen reaktiveffekt förs över

strömens amplitud $Q_L = 3 \cdot 2\pi f L \cdot I^2$

$$I = \sqrt{\frac{Q_L}{3 \cdot 2\pi f \cdot L}} = \sqrt{\frac{270 \cdot 10^6}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,25}} \approx 1070 \text{ A}$$

b) se ovan

$$\sin \varphi = \frac{X_L \cdot I}{2 \cdot U_f} = \frac{\pi \cdot f \cdot L \cdot I}{\pi \cdot U_f}$$



$$\sin \varphi = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 0,25 \cdot 1070 \cdot \sqrt{3}}{405 \cdot 10^3} =$$

$= 0,18 \Rightarrow \varphi = 10,36^\circ$

$\psi = 2 \cdot \varphi = 20,7^\circ$

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi = \frac{3 \cdot 405 \cdot 10^3 \cdot 1070 \cdot \cos(10,36)}{\sqrt{3}} = 739 \text{ MW överför}$$

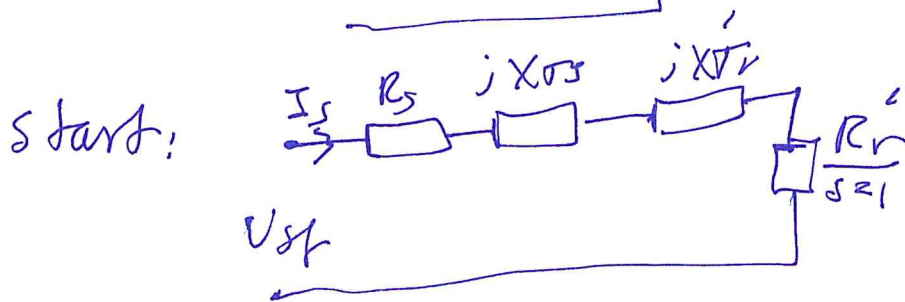
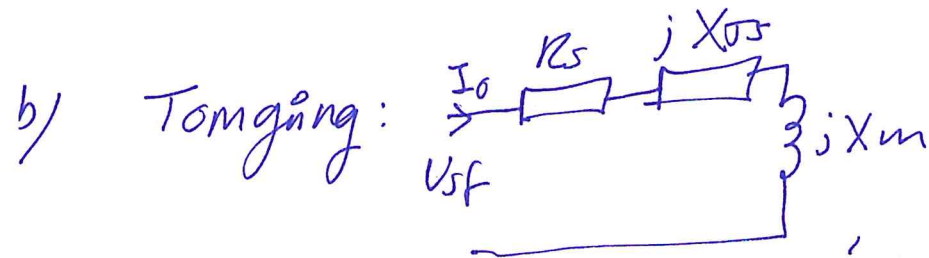
2. a) 3 polpar

$$T_n = \frac{P_N}{\omega_n} = \frac{P_N \cdot 60}{2\pi n} = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 60}{2\pi \cdot 955} = 40 \text{ Nm}$$

$$I_0 = 9 \angle -88.85^\circ \text{ A}$$

$$I_s = 70 \angle -64.57^\circ$$

$$U_{sf} = \frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} \text{ - ref}$$



c) vid tomgång

$$\underline{I}_0 = \frac{U_{sf}}{\underline{Z}_0} = \frac{U_{sf}}{R_s + j(X_{\sigma s} + X_m)}$$

$$\rightarrow \underline{Z}_0 = \frac{U_{sf}}{\underline{I}_0} = \frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 9 \angle -88.85^\circ} = 44.26 \angle 88.5^\circ \Omega$$

$$= 1.16 + j \cdot 44.25 = R_s + j(X_{\sigma s} + X_m) \Rightarrow \underline{R_s} = 1.16 \Omega$$

$$\text{vidare: } X_m = 18 \cdot X_{\sigma s}$$

$$\text{så: } (18 \cdot X_{\sigma s} + X_{\sigma s}) = 44.25$$

$$X_{\sigma s} = \frac{44.25}{19} = 2.33 \Omega$$

$$X_m = 42 \Omega$$

$$L_{\sigma_s} = \frac{2,33}{2\pi f} = \frac{2,33}{2\pi \cdot 50} = 7,4 \text{ mH} / \text{fas}$$

$$L_m = \frac{42}{2\pi f} = \frac{42}{2\pi \cdot 50} = 133 \text{ mH}$$

Nu hittar vi på starten

$$Z_{\text{start}} = (R_s + R_r') + j(X_{\sigma_s} + X_{\sigma_r}')$$

$$Z_{\text{start}} = \frac{U_{sf}}{I_s} = \frac{690 \angle 0}{\sqrt{3} \cdot 70 \angle -61,57} = 5,69 \angle 61,57$$

$$= 2,71 + j \cdot 5 \quad \text{så:}$$

$$2,71 = R_s + R_r' = 1,16 + R_r'$$

$$R_r' = 2,71 - 1,16 = 1,55 \Omega / \text{fas}$$

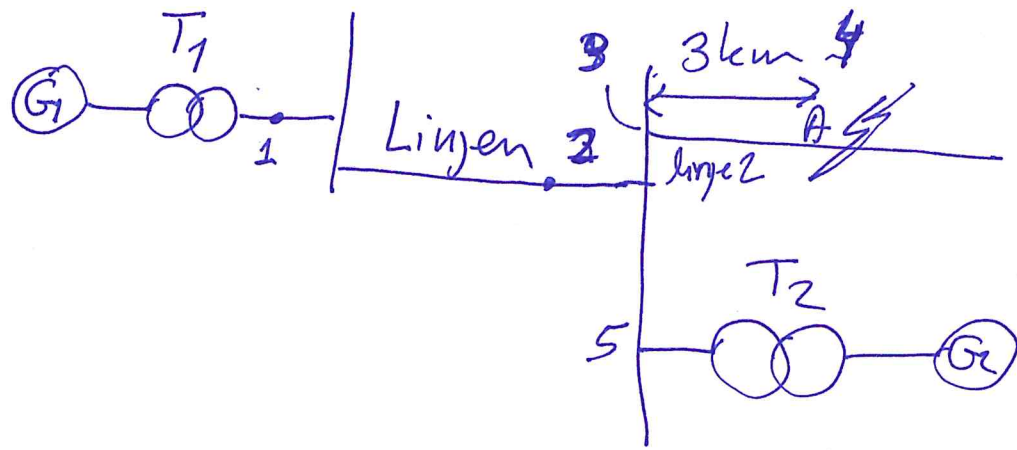
P.S.S

$$5 = X_{\sigma_s} + X_{\sigma_r}' = 2,33 + X_{\sigma_r}'$$

$$X_{\sigma_r}' = 5 - 2,33 = 2,67 \mu / \text{C}$$

$$L_{\sigma_r}' = \frac{2,67}{2\pi f} = \frac{2,67}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 8,5 \text{ mH} / \text{fas}$$

4.



$$S_{K G_1} = \frac{S_n}{z_d} = \frac{S_n}{x_d} = \frac{48 \times 10^6}{0,12} = 400 \text{ MVA}$$

$$S_{K G_2} = \frac{S_n}{z_d} = \frac{S_n}{x_d} = \frac{50 \times 10^6}{0,20} = 250 \text{ MVA}$$

$$S_{K T_1} = \frac{S_n}{z_k} = \frac{48 \times 10^6}{0,08} = 600 \text{ MVA}$$

$$S_{K T_2} = \frac{S_n}{z_k} = \frac{50 \times 10^6}{0,10} = 500 \text{ MVA}$$

$l = 40 \text{ km}$

impedans linjen: $X_1 = L \cdot 2 \pi f \cdot l = 1,3 \times 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \times 40$
 $= 16,4 \Omega$

$l_2 = 3 \text{ km}$

impedans 3 km: $X_2 = L \cdot 2 \cdot \pi f \cdot l_2 = 1,23 \Omega$

$$S_{K \text{ linje 1}} = \frac{U^2}{X_1} = \frac{(130 \times 10^3)^2}{16,4} = 1030 \text{ MVA}$$

$$\text{linje 2} \quad S_{K} = \frac{U^2}{X_2} = \frac{(130 \times 10^3)^2}{1,23} = 13,74 \text{ GVA}$$

4.

$$S_{K1} = \frac{S_{KG1} \cdot S_{KT1}}{S_{KG1} + S_{KT1}} = \underline{240 \text{ MVA}}$$

$$S_{K2} = \frac{S_{K1} \cdot S_{Klye}}{S_{K1} + S_{Klye}} = \frac{240 \cdot 1030}{240 + 1030} \approx 195 \text{ MVA}$$

$$S_{K5} = \frac{S_{KG2} \cdot S_{KT2}}{S_{KG2} + S_{KT2}} = \frac{250 \cdot 500}{750} = 167 \text{ MVA}$$

$$S_{K3} = S_{K5} + S_{K2} = 362 \text{ MVA}$$

$$S_{K4} = \frac{S_{K3} \cdot S_{Klye2}}{S_{K3} + S_{Klye2}} = \frac{362 \cdot 13,74 \cdot 10^3}{362 + 13,74 \cdot 10^3} \approx$$

$$\approx 352 \text{ MVA}$$

$$I_k = \frac{U_f}{3}$$

$$I_k = \frac{S_{K4}}{3 \cdot U_f} = \frac{352 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot 130 \cdot 10^3} = 1,565 \text{ kA}$$

$$I_{stot} = 2,55 \cdot I_k \approx 3,99 \text{ kA}$$

$$U_k = 15 \text{ V}$$

$$I_k = 1.5 \text{ A}$$

$$P_k = 12 \text{ W}$$

korrektur av - på oppsp-siden
- best parameterna der!

$$P_k = R_k \cdot I_k^2$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{12}{1.5^2} = 5.33 \Omega$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{15}{1.5} = 10 \Omega$$

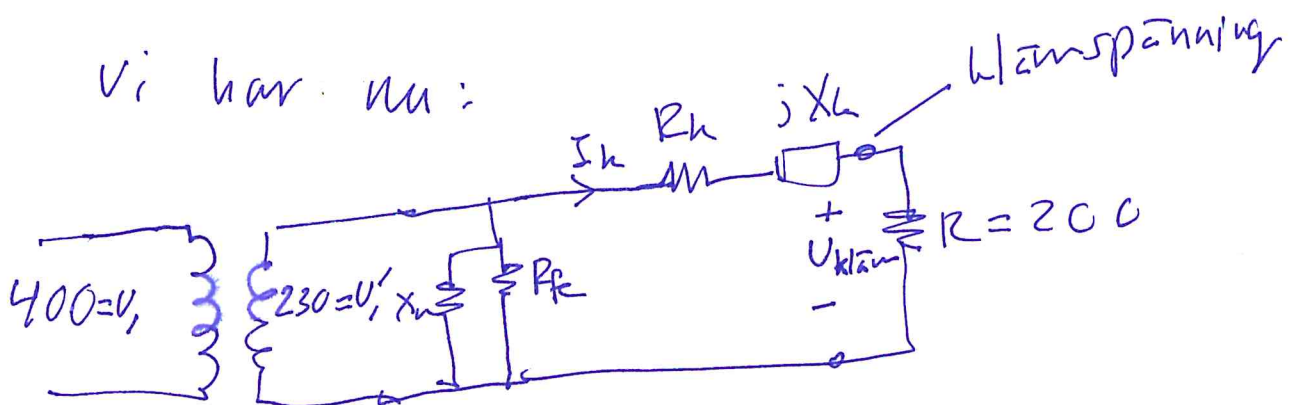
$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{10^2 - 5.33^2} = 8.45 \Omega$$

b) Transformera:

$$R_k' = \frac{R_k \cdot U_2^2}{U_1^2} = \frac{5.33 \cdot (230)^2}{400^2} = 1.76 \Omega$$

$$X_k' = \frac{X_k \cdot U_2^2}{U_1^2} = \frac{8.45 \cdot (230)^2}{400^2} = 2.8 \Omega$$

U_1 har nu:



$$I_k = \frac{U_1'}{R_k' + R + jX_k} = \frac{230}{(1.76 + 200) + j \cdot 2.8}$$

$$\underline{I_k} = \frac{230 \angle 0^\circ}{201.8 \angle 98^\circ} = 1.14 \angle -0.8^\circ \quad \text{— Spannung nicht rausrechnen}$$

$$U_{k_{\text{Äm}}} = I_k \cdot R_{\text{Ä}} = 200 \times 1.14 \angle -0.8^\circ$$

$$\Rightarrow U_{k_{\text{Äm}}} = 228 \text{ V}$$

Verknüpfungsgraden:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{\text{Cu}}}$$

$$P_2 = U_{k_{\text{Äm}}} \cdot I_k = 228 \cdot 1.14 \approx 260 \text{ W}$$

$$P_0 = 30 \text{ W}$$

$$P_{\text{Cu}} = R_k' \cdot I_k^2 = 1.76 \cdot 1.14^2 = 2 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{260}{260 + 30 + 2} = 0.89$$

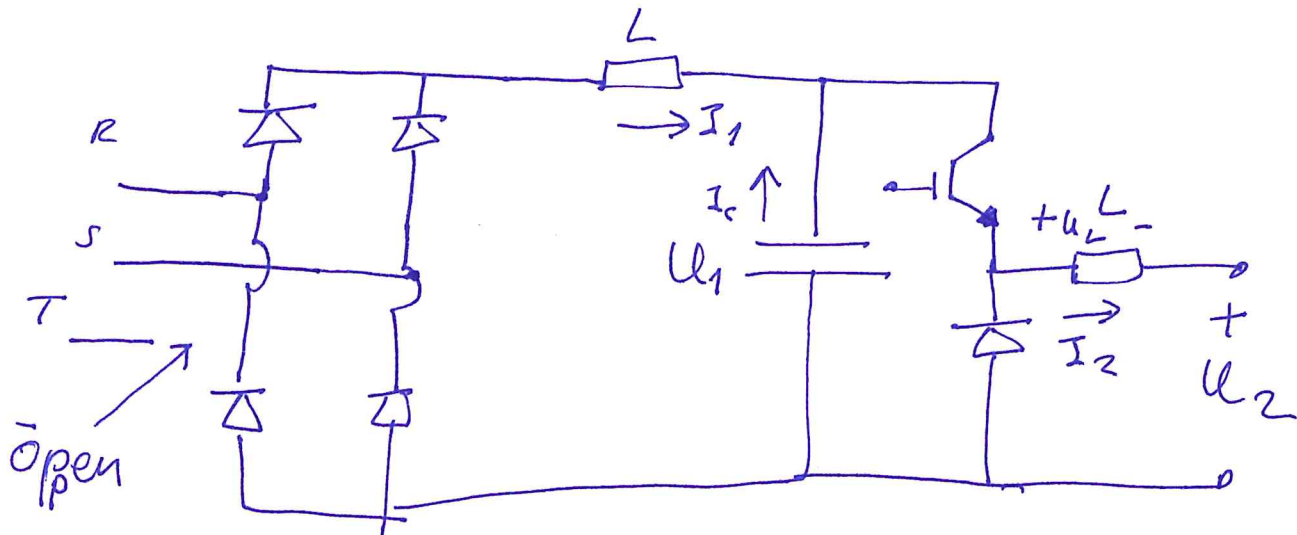
Verknüpfungsgraden 89%

U_{ac} = 380 V, Men vltan 1-fas:

$$U_1 = 0,9 \cdot U_f = 0,9 \cdot 380 = 342 \text{ V}$$

$$f_s = 100 \text{ kHz} \quad U_2 = 120 \text{ V}$$

$$T = \frac{1}{f_s} = 10 \mu\text{s}$$



$$\frac{t_p}{T} = ? \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{t_p}{T} = \frac{120}{342} = 0,35$$

$$t_p = 0,35 \cdot T = 3,5 \mu\text{s}$$

$$u_L(t) = \begin{cases} 342 - 120 = 222 \text{ under } t_p \\ 0 - 120 = -120 \text{ under } T - t_p \end{cases}$$

