

Tentamen i ELTEKNIK för E3, EEK 140

Datum:	tisdag, den 12 april 2022
Tid	14.00 – 18.00
Lösningar:	På hemsidan den 13 april
Betygsgränser:	≥ 25 ger godkänt, 4:a ≥ 36 p och 5:a ≥ 43 p
Resultat:	Anslås senast 4 maj 2022
Granskning:	Se resultatlista
Hjälpmedel:	Typgodkänd räknare, räknatabeller (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. Fråga under tentan om något är oklart!

- En belastning bestående av tre lika impedanser $\underline{Z}_1 = (15 + j9) \Omega$ kopplade i Delta ansluts till en trefasgenerator (Y-kopplad) som i tomgång lämnar en spänning 400 V. Dess inre impedans är: $\underline{Z}_i = (0,5 + j3) \Omega/\text{fas}$. Parallellt med belastningen ansluts nu ett kondensatorbatteri bestående av tre lika kondensatorer med kapacitansen $C = 950 \mu\text{F}$. Kondensatorerna är kopplade i Y.
 - Bestäm fasström och generatorns klämspänning innan kondensatorbatteriet kopplas in. (2p)
 - Bestäm fasström och generatorns klämspänning efter inkopplingen av kondensatorbatteriet. Med hur stor skenbar effekt (uttryckt i komplex form) belastas generatormed? (5p)
 - Jämför och kommentera resultat i a) och b) (1p)
- För en 6-polig 15 kW asynkronmaskin har ABB angivit följande värden på parametrarna i det ekvivalenta Y-fas-schemat. Varvtalet vid fullast är 960 rpm vid 50 Hz.
$$\begin{aligned} R_s &= 0,25 \Omega/\text{fas} & X_{\sigma s} &= 0,8 \Omega/\text{fas} & R'_r &= 0,2 \Omega/\text{fas} \\ X'_{\sigma r} &= 0,65 \Omega/\text{fas} & R_{Fe} &= \text{försummas} & X_m &= 13,4 \Omega/\text{fas} \end{aligned}$$
Beräkna fasströmmen vid fullast när maskinen är kopplad till ett 230 V nät. (5p)

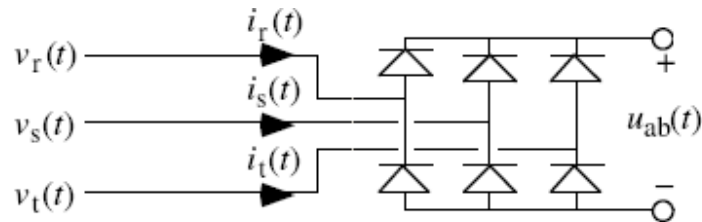
3. Effekten från ett kraftverk matas ut på transmissionsnätet via en 400 kV luftledning med en serieinduktans på 0,25 H/fas (resistansen försummas). Spänningen i båda ändrar av ledningen hålls konstanta på 405 kV och 750 MVA skenbar effekt matas in på ledningen från kraftverksidan.

a) Rita ett visardiagram, för en ekvivalent Y-fas, över spänningarna i båda ändarna, strömmen på ledningen och spänningsfallen på ledningen. (2p)

b) Beräkna strömmen i ledningen. Hur stor är överföringsvinkeln? (3p)

c) Hur skapas den reaktiva effekten som luftledningen konsumerar? Hur stor är den? Med hur stor aktiv effekt belastas ledningen? (3p)

4. En trefas diodlikriktare matas med 400 V, 50 Hz.



a) Rita likledsspänningen $u_{ab}(t)$ under två perioder. Gradera axlarna på diagrammet. (1p)

b) Spänningen $u_{ab}(t)$ är inte en ren likspänning. Föreslå och motivera hur utspänningen från likriktaren kan förbättras. (2p)

c) En separatmagnetiserad likströmsmaskin, med konstant fältström och en ankarresistans på 1Ω , går med ett tomgångsvarvtal på 2000 rpm då den matas med 440 V. Likströmsmaskinen kopplas nu till trefaslikriktaren i uppgift b) där utspänningen kan antas vara konstant. Vilket tomgångsvarvtal kommer motorn att gå vid i detta fall? (4p)

d) Likströmsmaskinen kopplas nu tillbaka till spänningen 440 V och kopplas till en last som sänker varvtalet till 1900 rpm, (fältströmmen är fortfarande konstant enligt uppgift c)). Beräkna vridmomentet och uteffekten från maskinen i detta driftfall. (2p)

5. En ny trefas transformator med märkeffekt 50 MVA, YN/yn, 145/11,5 kV tänker man belasta med maximalt 80 % av märkströmmen vid effektfaktor $\cos\phi = 0,7$. Transformatorn kommer att anslutas till ett 145 kV nät. Beräkna transformatorns klämspänning samt av lasten uttagen aktiv och reaktiv effekt.
- Tillverkaren genomförde kortslutningsprov innan leveransen. Man fick följande resultat:
 $Z_k = 40 \Omega/\text{fas}$ och $R_k = 6,7 \Omega/\text{fas}$ (hänfödda till den sida från vilken man utför kortslutningsprov på transformator enligt standardförfarandet). (6p)

6. Teoriuppgifter

- a) Varje luftledning och varje kabelledning kännetecknas av en viss resistans, induktans och kapacitans. Förklara vad det är som bestämmer storleken av L och C. Rita ett ekvivalent schema för en ledning. Rita ett visardiagram för en ledning som överför både aktiv och reaktiv effekt (reaktiv effekt av induktiv karaktär). Förklara vad menas med längs- och tvärsänningsfall. (5p)
- b) Till vilka konsekvenser leder överkompensering av den reaktiva effekten som en induktiv last förbrukar? Förklara det kortfattat. (2p)
- c) Nämn två metoder att minska startströmmen som en asynkronmaskin med kortsluten rotor drar från nätet. Beskriv hur högt startmoment är, för de två metoderna, relativt momentet vid direktstart. (4p)
- d) Beskriv funktionssätt för en frekvensomriktare med pulsbreddsmodulering. (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:

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

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

Transformatorn:

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

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

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

Formelblad i Elteknik

Synkronmaskin:

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

Likströmsmaskin:

$$U_a = E_a \pm R_a I_a$$

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

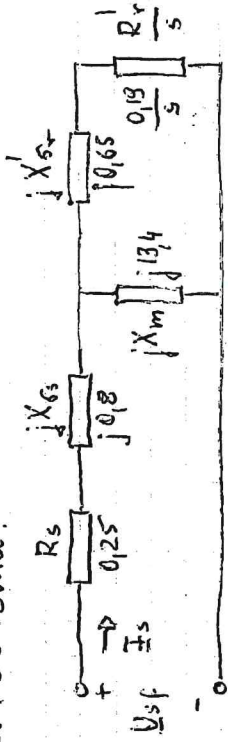
Kraftelektronik:

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

2

3-fas AM, $P_n = 15 \text{ kW}$; 6 poler; $n_n = 960 \text{ rpm}$; $U_s = 230 \text{ V}$
 $I_s = ?$ vid fullast

Ekv. schema:



$$s = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04; \quad \frac{R_r'}{s} = 4,75 \text{ Ohm/fas}$$

$$Z = (R_s + jX_{G_s}) + \frac{jX_m \left(\frac{R_r'}{s} + jX_{G_r} \right)}{\frac{R_r'}{s} + j(X_m + X_{G_r})} =$$

$$= (0,25 + j0,8) + \frac{j13,4 (4,75 + j0,65)}{4,75 + j(13,4 + 0,65)} = 4,13 + j2,73 = 4,95 \angle 33,8^\circ \text{ [Ohm/fas]}$$

$$\underline{I_s} = \frac{U_{sf}}{Z} = \frac{230 \angle 0^\circ}{4,95 \angle 33,8^\circ} = 26,8 \angle -33,8^\circ \text{ [A]}$$

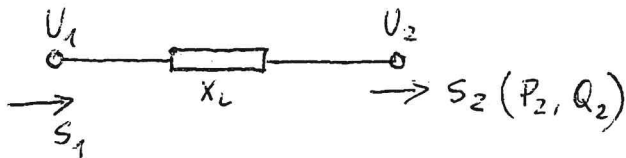
$$\cos \varphi = 0,825$$

③

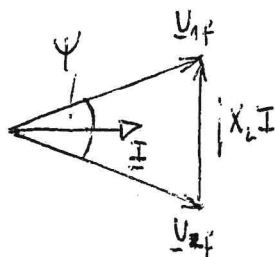
$$U_1 = U_2 = 405 \text{ kV} ; S_1 = 750 \text{ MVA}$$

$$L = 0,25 \text{ H/fas} ; R - \text{försummas}$$

$$X_L = 2\pi f L = 100\pi \cdot 0,25 = 78,54 \text{ } \Omega/\text{fas}$$



a)



b) $I = ? ; \Psi = ?$

$$I = \frac{S_1}{\sqrt{3} U_1} = \frac{750 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 405 \cdot 10^3} = \underline{\underline{1069 \text{ A}}}$$

$$\sin \frac{\Psi}{2} = \frac{\frac{X_L I}{2}}{U_f} = \frac{78,54 \cdot 1069}{2 \cdot \frac{405}{\sqrt{3}} \cdot 10^3} = 0,1795$$

$$\frac{\Psi}{2} = 10,34^\circ$$

$$\underline{\underline{\Psi = 20,68^\circ}}$$

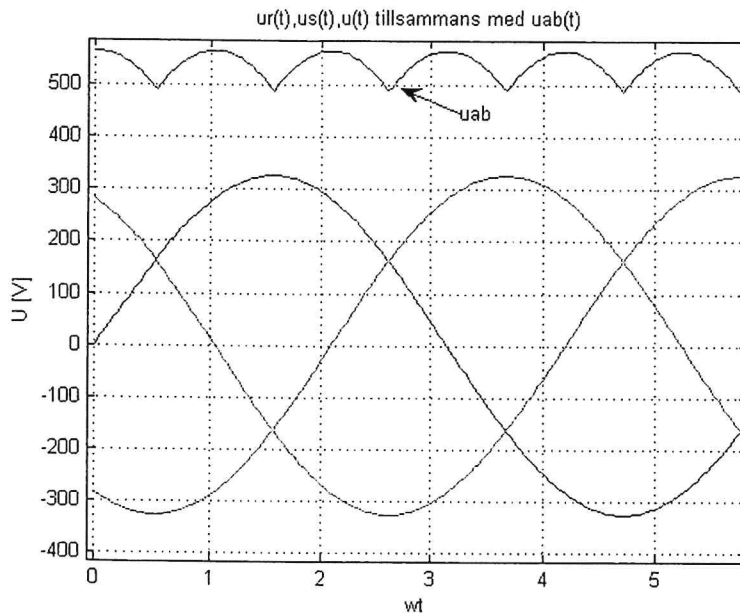
c) $\underline{\underline{Q_L = 3 X_L I^2 = 3 \cdot 78,54 \cdot 1069^2 = 269,26 \text{ MVAR}}}$

$\frac{Q_L}{2}$ skapas av generatorn och $\frac{Q_L}{2}$ av kondensatorbatteri i mottagaränden

$$\underline{\underline{P_1 = P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \Psi = \frac{405^2}{78,54} \cdot \sin 20,68^\circ = 737,52 \text{ MW}}}$$

Uppgift 4

Spänningen u_{ab} följer potentialen av den högsta huvudspänningen på nätet. Eftersom det finns sex huvudspänningar så kommer u_{ab} vara lika med dessa under en sjättedels period $2\pi/6 = \pi/3$. u_{ab} kan nu ritas och kan ses i figuren nedan



b) Spänningen kan göras bättre genom att seriekoppla en glättningsinduktans på utgången (eller parallellkoppla en kondensator). Eftersom en spole är strömtrög kommer denna minska variationerna hos strömmen och på så sätt minska spänningsripplet.

c) Då motorn går i tomgång kan ankarströmmen antas vara 0A och därmed är den inducerade emk:n, E_a , och ankarspänningen, U_a , lika. E_a kan skrivas som:

$$E_a = I_f k \omega \Rightarrow I_f k = \frac{E_a}{\omega}$$

Från uppgiften var det givet att fältströmmen hölls konstant. Vidare gick motorn på 2000rpm vid en ankarspänning på 440V. konstanten $I_f k$ kan således beräknas

$$I_f k = \frac{440}{(2000/60)2\pi} = 2.1$$

Då LM kopplas till likriktaren kommer matningsspänningen att ändras. Spänningen ut ifrån en trefas diodlikriktare kan beräknas som:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}U \cos(\omega t) d(\omega t) = 1.35U$$

Alltså medelvärde på spänningen utifrån en diodlikriktare är 1.35ggr effektivvärdet av nätets huvudspänning. Spänningen kan antas vara konstant enligt uppgiften och kan beräknas som:

$$U_d = 1.35 \cdot 400 = 540V$$

Åter till Likströmsmaskinen som nu matas med en spänning på 540V. I_f antas hålla samma värde och varvtalet kan således beräknas som

$$\omega = \frac{E_a}{I_f k} = 257.14 \text{ rad/s} \Rightarrow n = 2455.5 \text{ rpm}$$

Svar: $n=2455.5$ rpm

d) LM kopplas till 440V och har ett varvtal på 1900 rpm. Strömmen I_a kan nu beräknas på följande sätt:

$$U_a - I_a R_a - E_a = 0$$

$$E_a = I_f k \omega$$

\Rightarrow

$$I_a = \frac{U_a - I_f k \omega}{R_a} = \frac{440 - 2.1 \cdot (1900 / 60) 2\pi}{1} = 22.2 A$$

Axel momentet kan beräknas som:

$$T = I_f k I_a = 46.55 \text{ Nm}$$

Slutligen kan uteffekten beräknas som

$$P = T \omega = 46.55 \cdot 2\pi 1900 / 60 = 9.2 \text{ kW}$$

Svar: $T=46.55$ Nm och $P=9.2$ kW

⑤ 3-fas trafo: $S_n = 50 \text{ MVA}$; $145/11,5 \text{ kV}$; YN/yn
 $U_1 = 145 \text{ kV}$; belastning 80% av I_{n2} vid $\cos \varphi_2 = 0,75$

$Z_k = 40 \text{ } \Omega/\text{fas}$; $R_k = 6,7 \text{ } \Omega/\text{fas}$ - kslprov utfördes
från 145 kV-sidan

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{40^2 - 6,7^2} = 39,44 \text{ } \Omega/\text{fas}$$

$$U_2 = ?; \quad P_2 = ?; \quad Q_2 = ?$$

Beräkning från 145 kV-sidan:

$$I_{n2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{n2}} = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 11,5 \cdot 10^3} = 2510 \text{ A}$$

$$I_2 = 0,8 \cdot I_{n2} = 2008 \text{ A}$$

$$I_2' = 2008 \cdot \frac{11,5}{145} = 159,2 \text{ A}$$

$$\Delta U = \sqrt{3} I_2' (R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2) = \sqrt{3} \cdot 159,2 (6,7 \cdot 0,75 + 39,44 \cdot 0,66) = 8566 \text{ V}$$

$$U_2' = 145000 - 8566 = 136433 \text{ V}$$

$$\underline{U_2} = U_2' \cdot \frac{11,5}{145} = \underline{10821 \text{ V}}$$

$$\underline{P_2} = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 10821 \cdot 2008 \cdot 0,75 = \underline{28,2 \text{ MW}}$$

$$\underline{Q_2} = \sqrt{3} U_2 I_2 \sin \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 10821 \cdot 2008 \cdot 0,66 = \underline{24,8 \text{ MVA}}$$