Lösning till till tentamen i EIEF10 Elmaskiner och drivsystem 2014-05-30

1. Likströmsmaskinen, stationär drift

En elektriskt magnetiserad likströmsmotor har följande data angivna på märkskylten:

P_n = 2000 W, n_n = 5000 rpm, U_{an} = 220 V, I_{an} = 10 A och I_{fn} = 0.5 A.

Resistansen i rotorlindningen är R_a = 1.06 Ω och induktansen i rotorlindningen är L_a = 5.0 mH och det magnetiska sammanlänkade flödet genom rotorn är ψ_m = 0.4 V/rad/s vid nominell fältström (I_{fn}). De mekaniska förlusterna är varvtalsoberoende och fältkretsen är linjär (dvs uppvisar ej mättningsfenomen).

a. Beräkna inducerad emk, varvtal och vridmoment vid märkström och halv märkström när $U_a = U_{an}$.

$U_a = U_{an},\ \ I_a = I_{an}$

$$E_{an} = U_{an} \mathbf{I} R_a I_{an} = 220 - 1{,}06 \cdot 10 = 209{,}6V$$
$$\omega_{\downarrow}(n) = E_{\downarrow}(an)/(_{\downarrow}m = 209{,}6/0{,}4 = 524 rad/s$$
$$n_{\downarrow}(n) = \omega_{\downarrow}(n) \cdot 60/2\pi = E_{\downarrow}(an)/(_{\downarrow}m \cdot 60/2\pi = 209{,}6/0{,}4 \cdot 60/2\pi = 4999\ rpm$$
$$T_{\downarrow}el = T_{\downarrow}brutto = (_{\downarrow}m \cdot i_{\downarrow}a = 0{,}4 \cdot 10 = 4Nm$$
$$T_{mek} = T_{netto} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{2000}{524} = 3{,}82Nm$$
$$T_{friktion} = 4 - 3{,}82 = 0{,}18Nm$$
$$P_{friktion} = \omega \cdot T_{friktion} = 524 \cdot 0{,}18 = 94{,}3W$$

$U_a = U_{an},\ \ I_a = I_{an}/2$

$$E_{an} = U_{an} \mathbf{I} R_a I_{an} = 220 - 1{,}06 \cdot 5 = 214{,}7V$$
$$\omega_{\downarrow}(n) = E_{\downarrow}(an)/(_{\downarrow}m = 214{,}7/0{,}4 = 537 rad/s$$
$$n_{\downarrow}(n) = \omega_{\downarrow}(n) \cdot 60/2\pi = E_{\downarrow}(an)/(_{\downarrow}m \cdot 60/2\pi = 209{,}6/0{,}4 \cdot 60/2\pi = 5126\ rpm$$
$$T_{\downarrow}el = T_{\downarrow}brutto = (_{\downarrow}m \cdot i_{\downarrow}a = 0{,}4 \cdot 5 = 2Nm$$
$$T_{friktion} = \frac{P_{friktion}}{\omega} = \frac{94{,}3}{537} = 0{,}176Nm$$
$$T_{mek} = T_{netto} = T_{el} - T_{friktion} = 1{,}824Nm$$

(4 p)

b. Beräkna samma som ovan för $U_a = U_{an}/2$.

$U_a = U_{an}/2,\ I_a = I_{an}$

$$E_a = \frac{U_{an}}{2} - R_a I_{an} = 110 - 1{,}06 \cdot 10 = 99{,}4V$$
$$\omega_{\downarrow} = E_{\downarrow}(a)/(_{\downarrow}m = 99{,}4/0{,}4 = 248{,}5 rad/s$$
$$n_{\downarrow} = \omega_{\downarrow} \cdot 60/2\pi = E_{\downarrow}(a)/(_{\downarrow}m \cdot 60/2\pi = 99{,}4/0{,}4 \cdot 60/2\pi = 2373\ rpm$$
$$T_{\downarrow}el = T_{\downarrow}brutto = (_{\downarrow}m \cdot i_{\downarrow}a = 0{,}4 \cdot 10 = 4Nm$$
$$T_{fr} = \frac{P_{fr}}{\omega_{\square}} = \frac{94}{248{,}5} = 0{,}378Nm$$
$$T_{mek} = T_{brutto} - T_{fr} = 4 - 0{,}378 = 3{,}62Nm$$

$U_a = U_{an}/2,\ \ I_a = I_{an}/2$

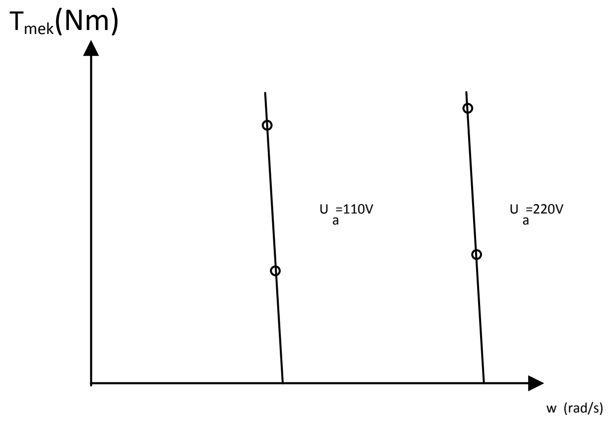
$$E_a = \frac{U_{an}}{2} - \frac{R_a I_{an}}{2} = 110 - 1{,}06 \cdot 5 = 104{,}7V$$
$$\omega_{\downarrow} = E_{\downarrow}(a)/(_{\downarrow}m = 104{,}7/0{,}4 = 261{,}7 rad/s$$
$$n_{\downarrow} = \omega_{\downarrow} \cdot 60/2\pi = E_{\downarrow}(a)/(_{\downarrow}m \cdot 60/2\pi = 104{,}7 \cdot 60/2\pi = 2499\ rpm$$
$$T_{\downarrow}el = T_{\downarrow}brutto = (_{\downarrow}m \cdot i_{\downarrow}a = 0{,}4 \cdot 5 = 2Nm$$
$$T_{friktion} = \frac{P_{friktion}}{\omega} = \frac{94{,}3}{261{,}7} = 0{,}360Nm$$

T (Nm)

$$T_{mek} = T_{netto} = T_{el} - T_{friktion} = 1{,}640Nm$$

(3 p)

c. Rita motorns moment-varvtalskarakteristik med hjälp av driftfallen ovan! (3 p)



2. Synkronmaskinen

En 4-polig, permanent magnetiserad synkronmaskin har statorresistansen $R_s = 0.15\ \Omega$ och cylindrisk rotor så att $L_{mx} = L_{my} = L_m = 3.0$ mH. Magnetiseringen är 1.0 Vs sammanlänkat flöde i en fas (toppvärde per fas). Maskinen styrs med hjälp av en s.k. vektorstyrning där spänningen till motorn uppdateras var 100:e µs, d.v.s samplingsintervallet är T_s=100 µs. Den trefasiga växelriktarens mellanledsspänning är U_{dc} =540 V. Maskinen är tvärströmsreglerad dvs styrd så att statorströmmen i *x*-led blir noll (i_{sx}=0) och statorströmmen i *y*-led används för momentbildning.

a. Hur stort moment kan maskinen bilda om fasströmmen aldrig får övergå 100 A effektivvärde? (2 p)

Antag tex effektinvariant trefas-tvåfastransformation! Vektorns längd är då √3 ggr effektivvärdet/fas.

$$\left|\vec{\Psi}_m\right| = \sqrt{3}\cdot\frac{1{,}0}{\sqrt{2}} = 1{,}225Vs \quad \left|\vec{i}_s\right| = \sqrt{3}\cdot 100A \quad T_{\max} = \Psi_{mx}\cdot i_{sy} = 1{,}225\cdot\sqrt{3}\cdot 100 = 212Nm(el)$$

b. Hur hög kan växelriktarens utspänning (dvs RMS-värdet av huvudspänningen) bli vid symmetrerade spänningsbörsvärden om övermodulation ska undvikas? För att erhålla poäng på denna uppgift måste du motivera ditt svar ordentligt! (2 p)

Symmetrerade börvärden innebär att max huvudspänning är $U_{DC}/2-(-U_{DC}/2)= U_{DC}$ och huvudspänningens effektivvärde är alltså $U_{DC}/\sqrt{2}$=381,1V

c. Hur högt kan synkronmaskinens varvtal (eller vinkelhastighet) som högst vara om $i_{sx} = i_{sy} = 0$? (2 p)

Statorekvationen i xy-koordinater:

$$\vec{u}_s^{xy} = R_s\vec{i}_s^{xy} + L_s\frac{d\vec{i}_s^{xy}}{dt} + j\omega L_s\vec{i}_s^{xy} + j\omega\vec{\Psi}_m^{xy} = R_s\vec{i}_s^{xy} + j\omega\left(L_s\vec{i}_s^{xy} + \vec{\Psi}_m^{xy}\right) \approx R_s\vec{i}_s^{xy} + j\omega\left(L_m\vec{i}_s^{xy} + \vec{\Psi}_m^{xy}\right) = 0 + j\omega\left(0 + \vec{\Psi}_m^{xy}\right)$$

$$\left|\vec{u}_s^{xy}\right| = \left|j\omega\vec{\Psi}_m^{xy}\right| = \left|\omega\vec{\Psi}_m^{xy}\right| \Rightarrow \omega_{el} = \frac{\left|\vec{u}_s^{xy}\right|}{\left|\vec{\Psi}_m^{xy}\right|} = \frac{381{,}8}{1{,}225}rad/s = 311rad/s = 2977rpm \quad \omega_{mek} = \frac{\omega_{el}}{p/2} = 1489rpm,\ p = antal\ poler$$

d. Antag att motoraxeln roterar med 500 rpm och vridmomentet 50 Nm. Motorn drivs med $i_{sx} = 0$. Beräkna spänningsvektorns komponenter i rotorkoordinater (dvs *xy*-koordinater). (4 p)

$$n_{mek} = 500rpm \quad n_{el} = \frac{p}{2} n_{mek} = 1000rpm \quad \omega_{el} = 104{,}7 rad/s \quad T_{mek} = 50Nm \quad T_{el} = \frac{2}{p} T_{mek} = 25Nm$$

$$i_{sy} = \frac{T_{el}}{\Psi_m} = \frac{25}{1{,}225} A = 20{,}41A \quad Uppdelning\ i\ x-och\ y-komponenter:$$

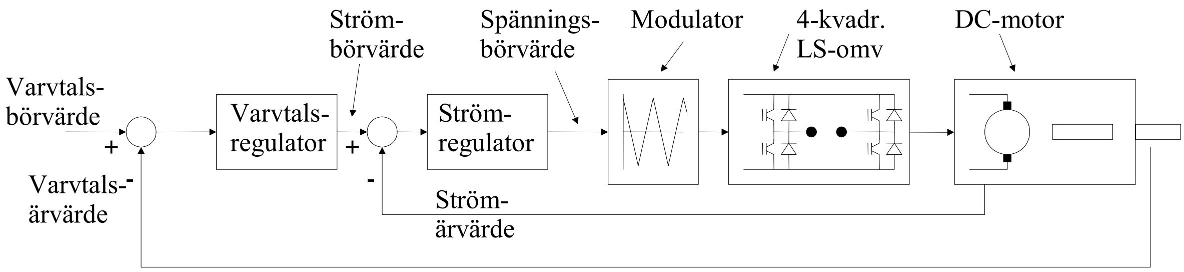
$$u_{sx} = R_s i_{sx} - \omega L_m i_{sy} - \omega \Psi_{my} = 0{,}15 \cdot 0 - 104{,}7 \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 20{,}41 - \omega \cdot 0 = -6{,}41V$$

$$u_{sy} = R_s i_{sy} + \omega L_m i_{sx} + \omega \Psi_{mx} = 0{,}15 \cdot 20{,}41 + 104{,}7 \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 104{,}7 \cdot 1{,}225 = 131{,}3V$$

3. Strömreglering

Du ska designa ett strömreglersystem för en permanentmagnetiserad likströmsmaskin. Likströmsmaskinen styrs med hjälp av en fyrkvadrantomvandlare med mellanledsspänning U_{dc} = 100 V. Du har tillgång till motordata i form av rotorresistans R_a = 1 Ω, rotorinduktans L_a = 5 mH samt sammanlänkat flöde ψ_m = 0.5 Vs. Både ankarström i_a och rotorvarvtal ω mäts och samplas för att användas i strömregulatorn. Signalprocessorn kan betraktas som snabb, dvs utan fördröjning. Samplingsfrekvensen hos strömregulatorn är $f_s = 1/T_s$ = 3.0 kHz.

a) Rita blockschema för systemet! Markera de två variabler som mäts och samplas, strömfelet, variabler till och från modulatorn, variabler till och från fyrkvadrantomvandlaren och variabler till motorn. (3 p)



b) Härled regulatorparametrar för en tidsdiskret samplad PI-strömregulator. Strömregulatorns förstärkning ska motsvara dead-beat. Markera regulatorns P- och I-del! Antag att R_a inte kan försummas. (5 p)

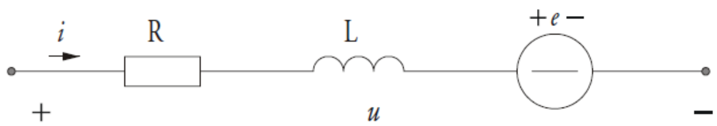


Figure 3.2: A generic 1 phase load.

Om man integrerar över ett sampelintervall [*k*..*k*+1] och delar med dess längd *Ts* erhålles en medelvärdesbildad differentialekvation:

$$\frac{\int_{kT_s}^{(k+1)T_s} u\,dt}{T_s} = \frac{\int_{kT_s}^{(k+1)T_s} R \cdot i\,dt}{T_s} + \frac{\int_{kT_s}^{(k+1)T_s} L \cdot \frac{di}{dt}\,dt}{T_s} + \frac{\int_{kT_s}^{(k+1)T_s} e\,dt}{T_s}$$

$$\bar{u}(k,k+1) = R \cdot \bar{i}(k,k+1) + L \cdot \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} + \bar{e}(k,k+1)$$

streck över en storhet betecknar medelvärde över intervallet. Med diskreta sampelvärden vid k·T_s och (k+1)·T_s kan detta skrivas

$$\bar{u}(k,k+1) = R \cdot \frac{i(k+1) + i(k)}{2} + L \cdot \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} + \bar{e}(k,k+1)$$

$$\bar{u}(k,k+1) = \left(\frac{L}{T_s} + \frac{R}{2}\right) \cdot \left(i(k+1) - i(k)\right) + R \cdot i(k) + \bar{e}(k,k+1)$$

Klämspänningens medelvärde motsvarar ju medelspänningen som modulatorn styr ut vilket förhoppningsvis motsvarar börvärdet vid intervallets början. Alltså:

Vidare så antar vi att strömregulatorn är implementerad som dead-beat dvs att:

Vi antar också att *e*, emk:n (dvs varvtalet) eller utspänningen om denna storhet motsvarar filterkondensatorspänningen hos en SMPS, inte ändras under ett samplingsintervall:

Strömmens aktuella värde vid sampel k är summan av alla **tidigare** reglerfel (och bildar därför en tidsdiskret I-del):

$$\begin{cases} \overline{u}(k,k+1) = u^*(k) \\ i(k+1) = i^*(k) \\ \overline{e}(k,k+1) = e(k) \\ i(k) = \sum_{n=0}^{n=k-1} \left(i^*(n) - i(n)\right) \end{cases}$$

$$u^*(k) = \left(\frac{L}{T_s} + \frac{R}{2}\right) \cdot \left(i^*(k) - i(k)\right) + R \cdot \sum_{n=0}^{n=k-1} \left(i^*(n) - i(n)\right) + e(k) =$$

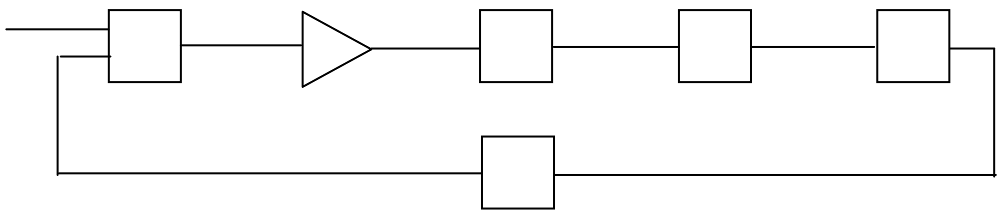
$$= \left(\frac{L}{T_s} + \frac{R}{2}\right) \cdot \left(\left(i^*(k) - i(k)\right) + \frac{T_s}{\left(\frac{L}{R} + \frac{T_s}{2}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{n=k-1} \left(i^*(n) - i(n)\right) \right) + e(k)$$

c) Med vald switchfrekvens är ljudet från motorn tämligen irriterande. Vad beror detta på? Hur kan man minska irritationen? (2p)

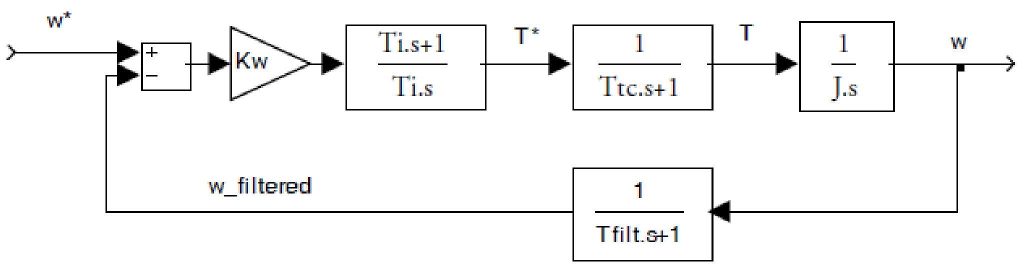
3 kHz ligger i ett frekvensband, där det mänskliga örat är som känsligast. Motorn fungerar som en högtalare och förstärker switchfrekvensen. Man kan höja switchfrekvensen och/eller variera den slumpmässigt för att minska irritationen.

4. Varvtalsreglering

Ett elektriskt drivsystem är varvtalsreglerat. Elmaskinen är momentreglerad med en hög samplingsfrekvens. Det verkliga varvtalet (ärvärdet) mäts med en ideal varvtalsgivare. Reglersystemet kan beskrivas med figuren nedan.



a. Fyll i figuren ovan och rita varvtalsreglersystemet på blockschemaform med PI-regulator, modell för momentkällan (första ordningens system med tidskonstant τ_{tc}), variablerna *T* och ω samt deras referensvärden, tröghetsmoment *J* och en filterfunktion för varvtalssignalen. (6 p)



b. Härled överföringsfunktionen för det slutna systemet om: 1) momentregleringen kan betraktas som momentan, 2) regulatorn är en P-regulator, 3) filtret utesluts. (2 p)

Open loop: $G(s) = K_{\omega} \cdot \dfrac{1}{Js}$

Slutet system: $\dfrac{G(s)}{1+G(s)} = \dfrac{K_{\omega} \cdot \dfrac{1}{Js}}{1+K_{\omega} \cdot \dfrac{1}{Js}} = \dfrac{\dfrac{K_{\omega}}{J}}{s+\dfrac{K_{\omega}}{J}}$

Alternativt: $\omega = (\omega^* - \omega) \cdot K_{\omega} \cdot \dfrac{1}{Js}$ *Överföringsfunktionen* $\dfrac{\omega}{\omega^*} = \dfrac{\dfrac{K_{\omega}}{Js}}{1+\dfrac{K_{\omega}}{Js}} = \dfrac{\dfrac{K_{\omega}}{J}}{s+\dfrac{K_{\omega}}{J}}$

c. Föreslå lämplig förstärkning för P-regulatorn baserat på lastens dynamik så att det slutna systemet får en pol i s=-ω_0 i fallet då momentregleringen kan betraktas som momentan. (2 p)

$\omega_0 = \dfrac{K_{\omega}}{J}$ $K_{\omega} = \omega_0 \cdot J$

5. Asynkronmaskinen

En fyrpolig asynkronmaskin med märkvarvtal har följande parametrar (i det förenklade ekvivalenta schemat för en ekvivalent Y-fas): R_s = 22.5 mΩ, R_r = 26.6 mΩ, L_k = 0.606 mH, R_m = 94.3 Ω och L_m = 10.5 mH. Maskinen ansluts till ett trefasnät med huvudspänningen U_h = 400 V (RMS) och f_1 = 50 Hz och belastas så att varvtalet blir lika med märkvarvtal n_n = 1476 rpm.

a. Rita (förenklat) ekvivalent schema för asynkronmaskinen. (2 p)

b. Beskriv tomgångsprovet och beräkningen av de parametrar som man kan bestämma med detta! (2 p)

c. Beskriv kortslutningsprovet och beräkningen av de parametrar som man kan bestämma med detta! (2 p)

d. Beräkna rotorströmmen vid märkdrift. (2 p)

e. Beräkna momentet vid märkdrift. (2 p)

6. Vektorer

En trefasig växelriktare som driver en 2-polig synkronmaskin arbetar i ett drifttillstånd så att övermodulation ej uppstår. Switch-tillståndet för de tre benen i växelriktaren beskrivs av [s_u, s_v, s_w] där switch-tillståndet för varje ben kan vara 0 eller 1 där 0 betyder att spänningen ut är $-U_{dc}/2$ och 1 betyder att spänningen ut är $U_{dc}/2$. Växelriktarens mellanledsspänning är U_{dc}=540 V.

a. Beräkna de 8 möjliga spänningsvektorerna med effektinvariant trefas-tvåfastransformation. (3 p)

$$\vec{u}(100)=\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{DC}\left(1 \cdot 1 + 0 \cdot \left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 0 \cdot \left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{DC} \cdot e^{j0}$$

$$\vec{u}(110)=\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{DC}\left(1 \cdot 1 + 1 \cdot \left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 0 \cdot \left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{DC} \cdot e^{j60}$$

$$\vec{u}(010)=\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{DC}\left(1 \cdot 1 + 0 \cdot \left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 1 \cdot \left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{DC} \cdot e^{j120}$$

$\vec{u}(011)=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot U_{DC}\left(0\cdot 1+1\cdot\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)+1\cdot\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right)=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot U_{DC}\cdot e^{j180}$

$\vec{u}(001)=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot U_{DC}\left(0\cdot 1+0\cdot\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)+1\cdot\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right)=\sqrt{\frac{2}{3}\cdot U_{DC}}\cdot e^{j240}$

$\vec{u}(101)=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot U_{DC}\left(0\cdot 1+1\cdot\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)+0\cdot\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right)=\sqrt{\frac{2}{3}\cdot U_{DC}}\cdot e^{j300}$

$\vec{u}(000)=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot U_{DC}\left(0\cdot 1+0\cdot\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)+0\cdot\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right)=0$

$\vec{u}(111)=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot U_{DC}\left(1\cdot 1+1\cdot\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)+1\cdot\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right)=0$

b. Antag att växelriktaren styrs så att flödesvektorns spets beskriver en hexagon (sexhörning med sex lika långa sidor). Säg att vid tiden t=0 ska flödesvektorns längd vara 0,87 Vs och dess riktning samma som β-axelns. Vilka av utspänningsvektorerna beräknade under a-uppgiften ska i tur och ordning användas för att driva flödesvektorn ett varv? (2 p)

$\vec{u}(011)$, $\vec{u}(001)$, $\vec{u}(101)$, $\vec{u}(100)$, $\vec{u}(110)$, $\vec{u}(010)$, $\vec{u}(011)$

c. Mellan vilka värden varierar flödesvektorns längd? (1 p)

Enligt figuren är flödesvektorn = min =0,87Vs för tiden $t=0+k\cdot\frac{T}{6}$ och

max=1Vs för tiden $t=\frac{T}{12}+k\cdot\frac{T}{6}$

d. Hur långa är hexagonens sidor? (1 p)

Hexagonsidorna är lika långa som max flödesvektor, 1Vs.

d. Vi vill driva synkronmaskinen med 3000 rpm. Hur lång tid ska de olika utspänningsvektorerna som du beräknade under b-uppgiften läggas ut? Ange också om och i så fall hur länge nollspänningsvektorerna ska användas! (3 p)

3000rpm för en tvåpolig maskin motsvarar den elektriska frekvensen f=50Hz. Tiden för ett varv för flödesvektorn är alltså 20ms.

För 0<t<T/12:

$\vec{u}(011)$+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(011)=0{,}5\cdot e^{j180°}=>\Delta t=\frac{0{,}5}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=1{,}131ms$

$\frac{T}{12}=\frac{20}{12}=1{,}667ms$. Vi ska alltså ha $\vec{u}(011)$ i 1,13ms och $\vec{u}(111)$ i 0,54ms

För T/12<t<3T/12=T/4:

$\vec{u}(001)$+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(001)=1{,}0\cdot e^{j240°}=>\Delta t=\frac{1{,}0}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=2{,}267ms$

$\frac{T}{6}=\frac{20}{6}=3{,}333ms$. Vi ska ha $\vec{u}$(011) i 2,27ms och $\vec{u}$(111) i 1,06ms

För T/4<t<5T/12:

$\vec{u}$(101)+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(101)=1{,}0\cdot e^{j300°}$ $=> \Delta t=\frac{1{,}0}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=2{,}267ms$

$\frac{T}{6}=\frac{20}{6}=3{,}333ms$. Vi ska ha $\vec{u}$(101) i 2,27ms och $\vec{u}$(111) i 1,06ms

För 5T/12<t<7T/12:

$\vec{u}$(100)+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(100)=1{,}0\cdot e^{j0°}$ $=> \Delta t=\frac{1{,}0}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=2{,}267ms$

$\frac{T}{6}=\frac{20}{6}=3{,}333ms$. Vi ska ha $\vec{u}$(100) i 2,27ms och $\vec{u}$(000) i 1,06ms

För 7T/12<t<9T/12=3T/4:

$\vec{u}$(110)+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(110)=1{,}0\cdot e^{j60°}$ $=> \Delta t=\frac{1{,}0}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=2{,}267ms$

$\frac{T}{6}=\frac{20}{6}=3{,}333ms$. Vi ska ha $\vec{u}$(110) i 2,27ms och $\vec{u}$(111) i 1,06ms

För 3T/4<t<11T/12:

$\vec{u}$(010)+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(010)=1{,}0\cdot e^{j120°}$ $=> \Delta t=\frac{1{,}0}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=2{,}267ms$

$\frac{T}{6}=\frac{20}{6}=3{,}333ms$. Vi ska ha $\vec{u}$(010) i 2,27ms och $\vec{u}$(000) i 1,06ms

För 3T/4<t<11T/12:

$\vec{u}$(010)+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(010)=1{,}0\cdot e^{j120°}$ $=> \Delta t=\frac{1{,}0}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=2{,}267ms$

$\frac{T}{6}=\frac{20}{6}=3{,}333ms$. Vi ska ha $\vec{u}$(010) i 2,27ms och $\vec{u}$(000) i 1,06ms

För 11T/12<t<12T/12=T:

$\vec{u}$(011)+ ev. nollspänningsvektor ska ge $\Delta\ \Psi$ $=\Delta t\cdot\vec{u}(011)=0{,}5\cdot e^{j180°}$ $=> \Delta t=\frac{0{,}5}{\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot 540}=1{,}131ms$

$\frac{T}{12} = \frac{20}{12} = 1{,}667ms$. Vi ska alltså ha $\vec{u}$(011) i 1,13ms och $\vec{u}$(111) i 0,54ms