

Tentamen Elektriska drivsystem och fält för Z2 (EEN155). 2024-03-11, 8:30-12:30.

Ansvariga lärare:

Emma Grunditz, ankn. 6010 (031-772 60 10), besöker tentamen ca. 09:30 och 11:00

Arto Heikkilä, ankn. 5723 (073 0284378), besöker tentamen ca. 09:30 och 11:00

Examinator: Emma Grunditz

Tillåtna hjälpmedel:

(indexeringar och markeringar är tillåtna i Formelsamling samt tabellverk):

- Chalmersgodkänd räknare
- Tabellverk: Physics Handbook, Mathematics Handbook
- Formelsamling: endast den som bifogas denna tentamenstes

Betygsgränser (av maximalt 50 poäng):

Betyg 3: 20 poäng

Betyg 4: 30 poäng

Betyg 5: 40 poäng

Granskning: Tid och plats anslås på Canvas.

Kom ihåg! Rita tydliga figurer med referensriktningar och beteckningar.

Glöm ej: enhet, dimensionskontroll, antaganden, motiveringar.

Om uppgifter saknas i problemtexten, gör då själv rimliga antaganden.

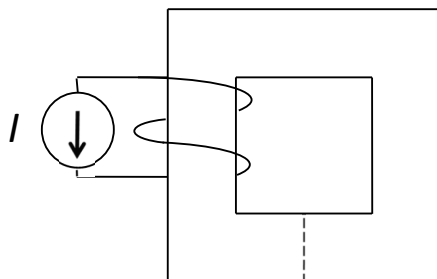
Uppgift 1 (4p)

En likströmkälla, en lindning (400 varv) och en kvadratisk järnkärna med ett luftgap utgör en magnetisk krets, se figuren nedan. Järnkärnan har medelsidlängden 6,0 cm, tvärsnittsarean 4,5 cm² och relativa permeabiliteten 2200. Ett luftgap (vidd 1,5 mm) är placerat vid den streckade linjen.

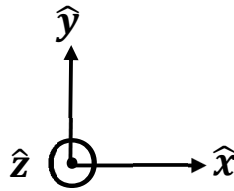
Bestäm strömstyrkan så magnetiska flödestätheten i luftgapet blir 0,4 T.

Beräkna magnetiska fältstyrkan (riktning och storlek) i järnkärnan.

(4p)



I uppgift 2 och 3 används ett koordinatsystem orienterat enligt figuren nedan. Enhetsvektorerna för de tre koordinataxlarna betecknas $\hat{x}$, $\hat{y}$, $\hat{z}$.



Uppgift 2 (6p)

Delfrågorna i denna uppgift är oberoende av varandra:

- a) Ett sfäriskt rumsområde centrerat i origo innehåller två laddningar $Q_1 = +4 \text{ nC}$ respektive $Q_2 = -7 \text{ nC}$. Området genomkorsas dessutom av två samriktade konstanta strömmar på 2 A respektive 3 A (båda riktade $+\hat{z}$). **Hur** stort är det sammanlagda elektriska flödet genom områdets begränsningsyta? **Är** flödet riktat ut ur eller in i området? (2p)

- b) En likströmskälla driver strömmen 2,0 A medurs i en ledande slinga (100 varv, kvadratisk form, sidans längd 0,15 m), som placeras i första kvadranten i xy-planet med ett av hörnen i origo. Vid tiden $t = 0$ släpps greppet om slingan, så att den är fri att röra sig. I området finns ett magnetfält:

$$\mathbf{B} = B_y \hat{y} + B_z \hat{z} \quad \text{där } B_y = 0,30 \text{ T och } B_z = 0,50 \text{ T}$$

Beräkna totala kraften och vridmomentet på slingan. **Hur** rör sig slingan precis efter $t = 0$? (2p)

- c) Två cirkulära (radie 0,05 m) metallplattor är anslutna till en tidsvarierande spänningskälla. Plattorna är placerade så att x-axeln går vinkelrätt genom deras centrum. Resultande elektriska fältet i området mellan plattorna är

$$\mathbf{E}(t) = E(t) \hat{x} \quad \text{där } E(t) = E_0 \frac{t}{\tau} \quad \text{med } E_0 = 10^5 \text{ V/m och } \tau = 2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Materialet i mellan plattorna har relativa permittiviteten 10.

Beräkna förskjutningsströmmen (storlek och riktning) i detta område. (2p)

Uppgift 3 (5p)

En rektangulär ledande slinga (med arean $0,03 \text{ m}^2$) placerad i xy-planet är ansluten till en resistiv 50Ω last. I området finns även magnetfältet

$$\mathbf{B}(t) = B_x(t) \hat{x} + B_z(t) \hat{z} \quad \text{där } B_x(t) = B_0 \cos^2(\omega t) \text{ och } B_z(t) = B_0 \sin^2(\omega t)$$

med $B_0 = 0,2 \text{ T}$ och $\omega = 10^3 \text{ rad/s}$

Antag att slingan är fixerad (d.v.s. kan inte röra på sig). **Bestäm** högsta värdet för den i slingan inducerade strömmens styrka (d.v.s. absolutbeloppet).

Bestäm strömriktningen vid tiden då strömstyrkan antar sitt maxvärde för första gången efter tiden noll. (5p)

Uppgift 4 (10p)

En separat magnetiserad likströmsmaskin har följande märkdata: $v_{T,m} = 220 \text{ V}$, $i_{a,m} = 18 \text{ A}$, $v_{f,m} = 200 \text{ V}$, $n_{r,m} = 1400 \text{ rpm}$ och följande kända parametrar $R_f = 180 \Omega$, $L_a = 1.5 \text{ mH}$, $J = 0.006 \text{ kgm}^2$ maskinens interna friktionsmoment är linjärt proportionellt mot varvtalet enligt: $T_{L,frikt} = b\omega_r = 0.005\omega_r \text{ Nm}$. Maskinen driver en last vars moment är linjärt proportionellt mot vinkelhastigheten enligt: $T_{L,ext} = B\omega_r = 0.08\omega_r \text{ Nm}$. Ankarkretsen och fältkretsen matas med varsin omriktare som kan ge mellan 0–250 V på utgången. Vid ett tillfälle då maskinen matas med märkspänning fastnar rotorn en kort stund och ankarströmmen når 130 A.

- a) **Bestäm** R_a och det länkade flödet, λ vid märkspänning. (2p)

(Om inte a) löses, antag $R_a = 1.5 \Omega$, och $\lambda = 1.5 \text{ Wb}$.)

- b) Vid märkdrift, **beräkna**: (4p)

- motEMKn
- utvecklat vridmoment och moment ut på axeln
- förluster i ankarlindningen och i fältlindningen
- rotationsförluster på grund av friktion i maskinen
- verkningsgraden (inkluderat ankar- och fältkrets, ovan beräknade förluster)

- c) Med märkspänning i fältkretsen, **beräkna** det högsta tillåtna varvtalet vid vilket maskinen kan driva den externa lasten utan att överskrida märkdata i ankarkretsen, och **beräkna** den levererade effekten till lasten. (2p)

- d) För en given maskin av den aktuella maskintypen finns tre olika sätt att påverka motorns moment-varvtalskaraktäristik. **Nämn** och **skissa** approximativt den generella påverkan på motorns moment-varvtals-karaktäristik för **två** av dem. (2p)

Uppgift 5 (6p)

Maskinen i drivsystemet beskrivet i uppgift 4 skall ström(moment) och varvtalsstyras genom en inre ström(moment)-regulator och en yttre varvtalsregulator. ström(moment)regleringsloopen ska ha en stigtid på 18 ms.

- a) **Bestäm** lämplig stigtid för varvtalsregulatorn och **motivera** ditt val. (1p)

(Om inte a) löses, antag valfri stigtid för varvtalsregulatorn.)

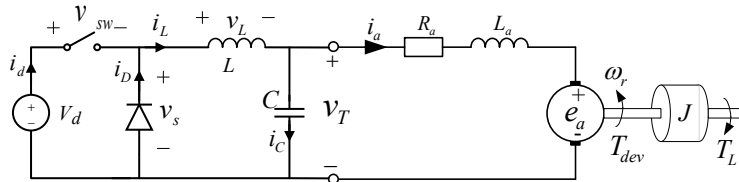
- b) **Härled** lämplig ström(moment)regulator och varvtalsregulator, samt **bestäm** numeriska värden för samtliga regulatorparametrar. **Redogör** för relevanta antaganden. (3p)

- c) Vid tiden $t=0$, sätts varvtals-referensen till märkvarvtalet. (2p)

- Rita** som funktion av tid under lämpligt tidsintervall (t.ex. tills stationärtillstånd nås); varvtalsreferensen och maskinens resulterande reglerade varvtal.
- Markera** varvtalsregleringens tidskonstant i grafen.
- Just efter $t=0$, **uppskatta** värdet på strömreferensen, **och** på strömregulatorns utsignal, dvs. spänningsreferensen till den kraftelektroniska omriktaren.

Uppgift 6 (7p)

Ankarkretsen i maskinen från uppgift 4, matas med en nedspänningsomriktare enligt nedan figur. Omriktarens inspänning V_d är 250 V, dess induktans är $L=40\mu\text{H}$, och dess switchfrekvens är 80 kHz. Kondensatorn C kan betraktas som mycket stor.



- Bestäm** värdet på duty cyclen för att ge märkspänning till ankarkretsen. Eventuell härledning behöver inte redovisas. (0.5p)
(Om inte a) löses, antag valfri duty cycle.)
- Härled** och **skissa** vågformen för $v_s(t)$, och $v_L(t)$, samt för strömmarna $i_L(t)$, och $i_c(t)$, över två switchperioder. Ange storheter på axlarna, men inte numeriska värden. (4p)
- Vid märkdrift av likströmsmaskinen, **avgör** om omriktaren arbetar i CCM. (1.5p)
- För att både kunna driva och bromsa lasten matas motorn nu istället med en 2-kvadrant-omriktare. Vid ett bromsande driftfall, **rita** strömmens väg och riktning i omriktaren för tillstånden switch-On respektive switch-OFF. (1p)

Uppgift 7 (8p)

En asynkronmotor skall köpas för att kunna driva en last på varvtal mellan ca. 900-1000 rpm då den matas via Y-koppling från ett elnät med 50 Hz, 400 V rms huvudspänning.

- Ange** ett lämpligt paltal för motorn och **motivera** ditt val. (1p)
- Inom 900-1000 rpm, **skissa** approximativt motorns väntade vridmoment som funktion av varvtal, **ange** numeriska värden på varvtals-axeln, och **markera** tomgångsvarvtalet och det synkrona varvtalet. (1.5p)
- En motor köps in, märkt 400 V rms. För att bestämma maskinparametrarna till ekvivalenta schemat görs tre test, bland annat ett tomgångsprov. **Rita** ett ekvivalent kretsschema för motorn vid tomgångsdrift, och **ange** vilka motorparametrar som kan uppskattas med testresultatet. **Förklara/motivera** ditt svar. (2p)
- Maskinparametrarna bestäms till: $R_s=0.19\ \Omega$, $X_s=0.63\ \Omega$, $R'_r=0.18\ \Omega$, $X'_r=0.63\ \Omega$ och $X_m=11\ \Omega$. Maskinens eftersläpning vid märkdrift är 4%. Vid märkdrift, **beräkna**: (3.5p)
 - fasströmmen in i statorn
 - utvecklad axel-effekt
 - märkvarvtalet
 - utvecklat vridmoment

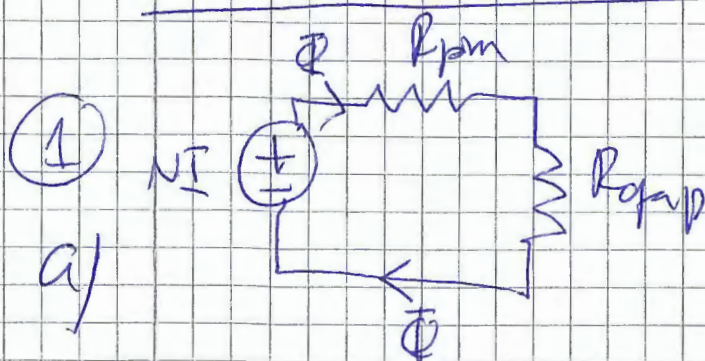
Uppgift 8 (4p)

En 100 kW 3-fasig permanent magnet synkronmaskin (PMSM) har följande parametrar i en dq -modell: $P=8$, $R_s=3\ \text{m}\Omega$, $L_{sd}=2\ \text{mH}$, $L_{sq}=6\ \text{mH}$, $\Psi_m=120\ \text{mWb}$. Dess märkvarvtal är $n_r=4000\ \text{rpm}$ och dess märk-ström är 85 A rms.

- Vid märkdrift, **beräkna** MTPA-strömvinkeln, i_{sd} , i_{sq} , u_{sd} och u_{sq} . (3p)
- Vid märk-ström och MTPA-strömvinkeln, **bestäm** hur stor andel av det utvecklade momentet som beror på reluktans-fenomenet. (1p)

EEEN 155 tentamen V/S 2024

Kortfattade lösningar



Samma flöde i
pgm & gap:

$$\Phi = B_{pgm} \cdot A + B_{gap} \cdot A$$

(Samma area A omtal)

$$\Rightarrow B_{pgm} = B_{gap} = B$$

$$NI = R_{total} \cdot \Phi = (R_{pgm} + R_{gap}) B \cdot A$$

seriekopplade
reluktanser

med $R_{total} = \frac{4 \cdot s - \delta}{\mu_{pgm} \mu_0 A} + \frac{\delta}{\mu_0 A}$

(s = medelsid längd = 0,06 m, δ = gapets vidd = 0,005 m)

$$\Rightarrow I \approx \underline{\underline{1,3 \text{ ampere}}}$$

uppg. kan även lösas
genom tillämpning av
Amperes lag & bairds lag
& sambandet $B = \mu H$

b) $H_{pgm} = \frac{B}{\mu_{pgm} \cdot \mu_0} \approx \underline{\underline{145 \text{ ampere/meter}}}$

Riktning: cirk. lag $\Rightarrow$ fäkt kringströmmen
an orienterad motus i
kretsen



② a) Gauss lag for elektriska flödet:

$$\Phi_E = Q_{\text{inneslutet}} = Q_1 + Q_2 = \underline{-3 \text{ nC}}$$

Negativt flöde $\Rightarrow$ riktat IN i området.

b) $\vec{F}_{\text{total}} = 0$ (sluten strömslinga i homogent
 B-fält: krafter på motsatta
 sidor lika stora men motriktade)

Mer formell motivering:

$$\vec{F} = \int_{\text{ledaren}} I d\vec{l} \times \vec{B} = I \underbrace{\left[\oint d\vec{l} \right]}_{=0} \times \vec{B} = 0$$

↑
konstant
ström & B,
sluten slinga

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B} = NIA \hat{n} \times \vec{B}$$

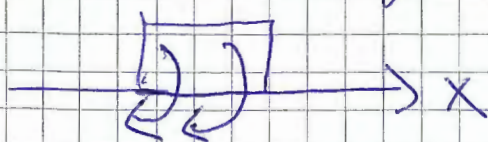
$\hat{n} = -\hat{z}$ (strömslinga i xy-planet, medans
 strömrikt $\Rightarrow$ strömmens eget fält
 riktat $-\hat{z}$ $\vec{B}$ i $\hat{z}$
 $\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$)

$$\boxed{-\hat{z} \times \hat{y} = \hat{x}, \quad -\hat{z} \times \hat{z} = 0}$$

$\Rightarrow$ Endast B:s y-komponent bidrar

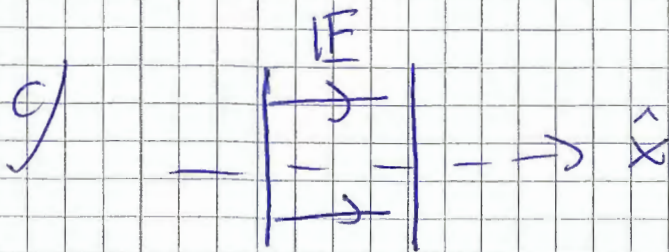
$$\Rightarrow \vec{\tau} = NIA B_y \hat{x} = \underline{1,35 \hat{x} \text{ Nm}}$$

strax efter $t=0$: Slingan vrids kring x-axeln.



eller v_y
 längs $\hat{x}$





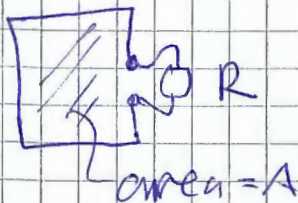
$$i_{\text{förskytning}} = A \cdot E \cdot \frac{dE}{dt} = A E \frac{E_0}{\tau} \quad \text{riktat } +\hat{x} \quad \left(\text{samtidigt } \frac{d(E)}{dt} \right)$$

$$A = \pi r^2, \quad E = E_n E_0$$

$$\Rightarrow i_{\text{förskytning}} \approx \underline{\underline{3,5 \cdot 10^{-3} \text{ ampere}}}, \quad \text{riktning } \rightarrow (\hat{x})$$

3

⊗
z



Ströme i xy-planet

$$B = B_x \hat{x} + B_z \hat{z}$$

Endast B:s $\hat{z}$ -komponent $B_z \hat{z}$ bidrar till induction (genomkuttad area)

$$|i_{\text{ind}}| = \frac{|U_{\text{ind}}|}{R} = \frac{1}{R} N \left| - \frac{d\Phi}{dt} \right| \underset{\substack{N=1 \\ \Phi = B \cdot A}}{=} \frac{A}{R} \left| - \frac{dB_z}{dt} \right| =$$

$$= \frac{A}{R} \left| - B_0 \cdot \omega \cdot 2 \sin \omega t \cos \omega t \right| =$$

$$= \frac{2 \omega A B_0}{R} \left| - \sin(2\omega t) \right|$$

$$\Rightarrow \text{Maxvärdet} = \frac{\omega A B_0}{R} = \underline{\underline{0,12 \text{ ampere}}}$$

t: strax efter noll $\Rightarrow \Phi$ värdet $\odot$ och ökar ($A B_0 \sin^2 \omega t$)

Lenz lag & cirk.lag $\Rightarrow$ ind. $\curvearrowright$ MEOURE

4a) sökt: R_a, λ

Ankarkretsens spänningsekvation: $V_T = R_a \dot{I}_a + \lambda \omega_r$

Två obekanta parametrar: R_a, λ

Uppgiften ger information om två driftfall: - märkdrift
- stilla rotor

Driftfallet stilla rotor:

$$V_T = V_{T,m} = 220 \text{ V}, \quad \dot{I}_a = 130 \text{ A}, \quad n_r = 0 \text{ rpm}$$

$$V_T = R_a \dot{I}_a + \lambda \cdot 0 \Rightarrow \boxed{R_a = \frac{V_T}{\dot{I}_a} = \frac{220 \text{ V}}{130 \text{ A}} = 1.6923... \approx 1.69 \, \Omega}$$

Driftfallet märkdrift:

$$V_T = V_{T,m} = 220 \text{ V}, \quad \dot{I}_a = \dot{I}_{a,m} = 18 \text{ A}, \quad n_r = n_{r,m} = 1400 \text{ rpm}$$

$$V_T = R_a \dot{I}_a + \lambda \omega_r \Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{V_T - R_a \dot{I}_a}{\omega_r} = \frac{220 - 1.69 \cdot 18}{1400 \cdot \frac{\pi}{30}} = 1.2931... \approx 1.29 \text{ Wb}}$$

Svar: $R_a = 1.69 \, \Omega, \quad \lambda = 1.29 \text{ Wb}$

4b) märkdrift: $V_T = V_{T,m} = 220 \text{ V}, \quad \dot{I}_a = \dot{I}_{a,m} = 18 \text{ A}, \quad n_r = n_{r,m} = 1400 \text{ rpm}$
 $V_f = 200 \text{ V} \Rightarrow \omega_r = \omega_{r,m} = n_{r,m} \cdot \frac{\pi}{30}$

i) motEMK $\boxed{e_a = \lambda \omega_r = \lambda \cdot n_{r,m} \cdot \frac{\pi}{30} = 1.29 \cdot 1400 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 189.1 \text{ V}}$

ii) utvecklat vridmoment: $\boxed{T_e = \lambda \dot{I}_a = \lambda \cdot \dot{I}_{a,m} = 1.29 \cdot 18 \approx 23.2 \text{ Nm}}$

moment ut på axeln: $T_{axel} = T_e - T_{L, \text{frikt}}$

$$T_{L, \text{frikt}} = b \cdot \omega_r = 0.005 \cdot 1400 \cdot \frac{\pi}{30} = 0.733... \text{ Nm}$$

$$\boxed{T_{axel} = 23.22 - 0.733 = 22.487 \text{ Nm} \approx 22.5 \text{ Nm}}$$

iii) Förluster i ankarlindningen:

$$\boxed{P_{firl_a} = R_a \dot{I}_a^2 = R_a \cdot \dot{I}_{a,m}^2 = 1.69 \cdot 18^2 = 547.56 \text{ W}}$$

Förluster i fältlindningen:

$$\boxed{P_{firl_f} = R_f \dot{I}_f^2 = R_f \left(\frac{V_f}{R_f} \right)^2 = \frac{V_f^2}{R_f} = \frac{200^2}{180} = 222.22 \text{ W}}$$

$$\dot{I}_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{200}{180} = 1.111 \text{ A}$$

4b iv) Rotationsförluster p.g.a. friktion i maskinen

$$\boxed{P_{\text{förl.fritt}}} = \omega_r \cdot T_{L,\text{fritt}} = \omega_r \cdot b \omega_r = b \omega_r^2 = 0,005 \cdot \left(1400 \cdot \frac{\pi}{30}\right)^2 = \\ = 107,469 \dots \text{ W} \approx \boxed{107,5 \text{ W}}$$

v) verkningsgraden inkl. ankar- och fältbrets, ovan förluster

$$\boxed{\eta} = \frac{P_{\text{ut}}}{P_{\text{in}}} = \frac{\omega_r \cdot T_{\text{axel}}}{V_{\text{fa}} I_{\text{a}} + V_{\text{ff}} I_{\text{f}}} = \frac{\overbrace{1400 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 22,5}^{3298,67\dots}}{\underbrace{220 \cdot 18 + 200 \cdot 1,11}_{4182\dots}} = 0,78877\dots \approx \boxed{78,9\%}$$

Svar: i) $E_a = 189,1 \text{ V}$

ii) $T_e = 23,2 \text{ Nm}$, $T_{\text{axel}} = 22,5 \text{ Nm}$

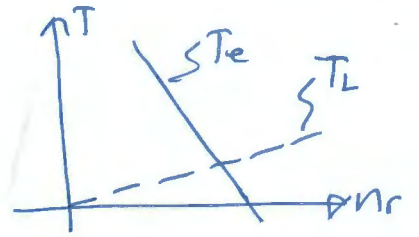
iii) $P_{\text{förl.a}} = 547,6 \text{ W}$, $P_{\text{förl.f}} = 222,2 \text{ W}$

iv) $P_{\text{förl.fritt}} = 107,5 \text{ W}$

v) $\eta = 78,9\%$

4c) . märkspänning i fältkretsen $V_f = V_{f,m} = 200 \text{ V}$

- Sökes: högsta tillåtna varvtalet att driva lasten inom märkdata
- Totalt lastande vridmoment: $T_L = T_{L,\text{frikt}} + T_{L,\text{ext}} = b\omega_r + B\omega_r = \omega_r(b+B)$
- Utan fältförsvagning, eftersom $V_f = V_{f,m}$, ges högsta varvtalet som maskinen kan driva lasten på, vid märkspänning i ankar kretsen.



$$V_T = V_{T,m} = 220 \text{ V}$$

- Men vi vet inte vad för ström som krävs i stationärt tillstånd, då maskinen driver lasten.

$$\text{Stationärt tillstånd} \Rightarrow \frac{d\omega_r}{dt} = 0 \Rightarrow \int \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L = 0$$

$$\Rightarrow T_e = T_L = T_{L,\text{frikt}} + T_{L,\text{ext}}$$

$$\lambda \dot{I}_a = (b+B)\omega_r \Rightarrow \dot{I}_a = \frac{(b+B)\omega_r}{\lambda}$$

- Byt ut $\dot{I}_a$ i spänningsekvationen för att få fram varvtalet

$$V_T = R_a \dot{I}_a + \lambda \omega_r = R_a \frac{(b+B)\omega_r}{\lambda} + \lambda \omega_r = \omega_r \left(\frac{R_a(b+B)}{\lambda} + \lambda \right)$$

$$\omega_r = \frac{V_T}{\frac{R_a(b+B)}{\lambda} + \lambda} = \frac{220}{\frac{1.69(0.005+0.08)}{1.29} + 1.29} = 156.99 \dots \text{ rad/s}$$

$$\boxed{n_r = \omega_r \cdot \frac{30}{\pi} = 156.99 \cdot \frac{30}{\pi} = 1499.1 \text{ rpm}}$$

$$\boxed{P_{L,\text{ext}} = \omega_r \cdot T_{L,\text{ext}} = 156.99 \cdot 0.08 \cdot 156.99 = 1971.67 \text{ W}}$$

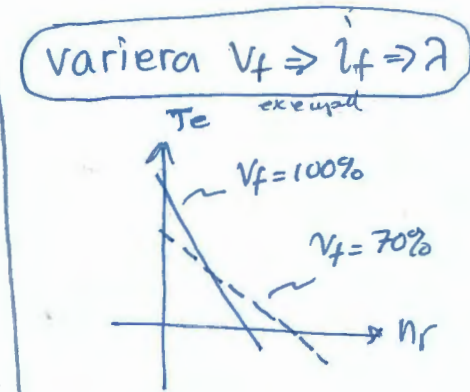
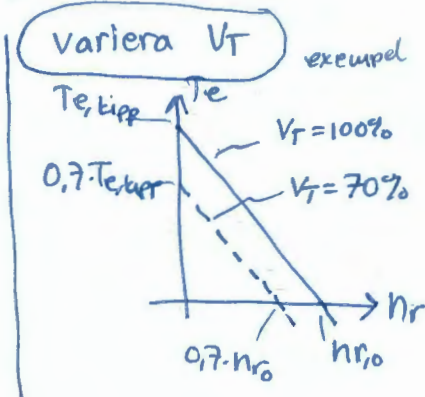
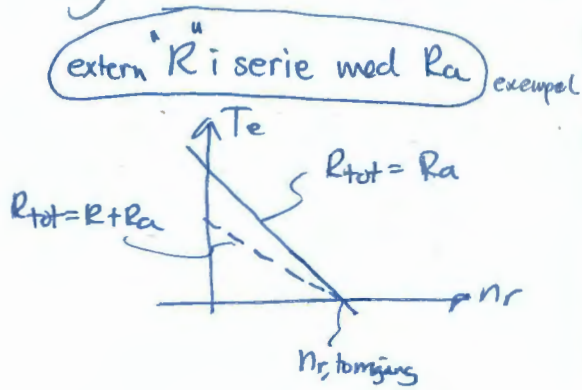
Alternativt: $T_{\text{axel}} = T_e - T_{L,\text{frikt}} = \lambda \dot{I}_a - b\omega_r = \lambda \cdot \frac{(b+B)\omega_r}{\lambda} - b\omega_r = (b+B-b)\omega_r = B\omega_r$
 $= 0.08 \cdot 156.99 \text{ Nm}$

$$P_{\text{axel}} = \omega_r \cdot T_{\text{axel}} = B\omega_r^2 = 0.08 \cdot 156.99^2 = 1971.67 \text{ W}$$

Svar: $n_r = 1499 \text{ rpm}$

$$P_{L,\text{ext}} = 1971.7 \text{ W}$$

4d) De tre sätten är:



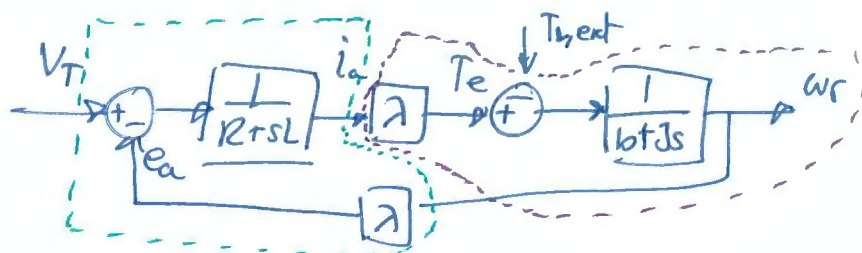
- 5a)
- Tidskonstanten för el-maskinens "elektriska del" är mycket mindre jämfört med den för den "mekaniska delen".
 - Det gör att vi bör välja en stigtid för varvtalsregleringen som är längre än den för strömregleringen.
 - För att ha god marginal kan man välja en stigtid för varvtalsregleringen som är ca. 10 ggr längre än den för strömregleringen; som en tum-regel.
- Vi väljer därför $t_{rw} = 10 \cdot t_{ri} = 10 \cdot 18 \text{ ms} = 180 \text{ ms}$

Svar: Varvtalsregulatorns stigtid väljs till 180 ms

5b) Utgångspunkt.

Processen = likströmsmaskinens 'elektriska' respektive 'mekaniska' del.

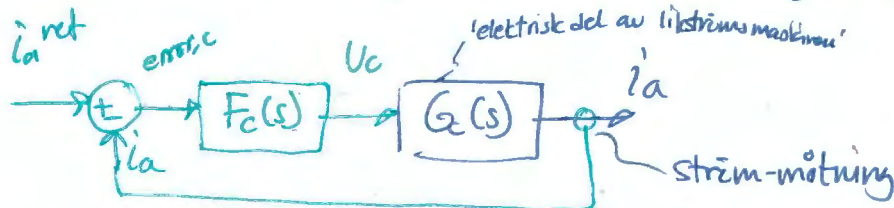
- Eftersom den 'elektriska delen' är mycket snabbare än den mekaniska delen kan vi betrakta varvtaket konstant när vi härleder strömregulatorn



- Alltså kan vi även betrakta e_a som konstant under härledning av strömregulatorn
- Vi betraktar även e_a som en störning under härledningen av strömregulatorn, dvs. en insignal som vi inte reglerar.
- Detta ger att den inre-reglerloopen, dvs. strömregleringsloopen kan skrivas som $G_c(s) = \text{motorns 'elektriska del'} = \frac{1}{R + sL_a}$
 $F_c(s) = \text{strömregulatorn} = ?$

- Blockdiagrammet för strömregleringen med återkopplad styrning blir:

- likströmsmaskin
- strömreglering



- Strömregleringens överföringsfunktion $\frac{i_a}{i_a^{\text{ref}}} = \frac{F_c(s) G_c(s)}{1 + F_c(s) G_c(s)}$

- Vi vill att $\frac{i_a}{i_a^{\text{ref}}} = \frac{\alpha_c}{\alpha_c + s} = \frac{\alpha_c/s}{1 + \alpha_c/s}$ dvs. ett första ordningens lågpåss filter
 $\Rightarrow$ ingen översväng vid stegsvar
 $\Rightarrow$ valbar bandbredd: α_c

$$\Rightarrow F_c(s) G_c(s) = \frac{\alpha_c}{s} \Rightarrow$$

$$F_c(s) = \frac{\alpha_c}{s} \cdot G_c^{-1}(s) = \frac{\alpha_c}{s} \left(\hat{R}_a + s \hat{L}_a \right) = \alpha_c \hat{L}_a + \frac{\alpha_c \hat{R}_a}{s} = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s}$$

$\hat{L}_a$ uppskattad ankarinduktans

$\hat{R}_a$ uppskattad ankarresistans

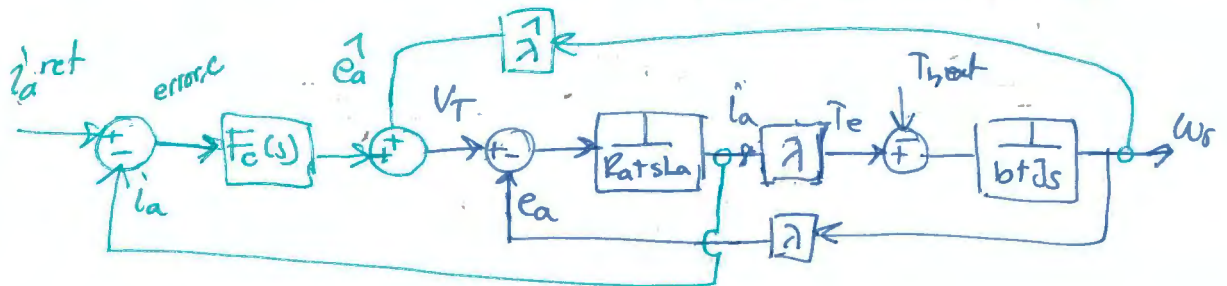
$$K_{pc} = \alpha_c \hat{L}_a = \frac{\ln 9}{t_{ri}} \cdot \hat{L}_a = \frac{\ln 9}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,183$$

$$K_{ic} = \alpha_c \hat{R}_a = \frac{\ln 9}{t_{ri}} \cdot \hat{R}_a = \frac{\ln 9}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,69 = 206,295$$

5b forts

- ström-regulator
- likströms-maskin

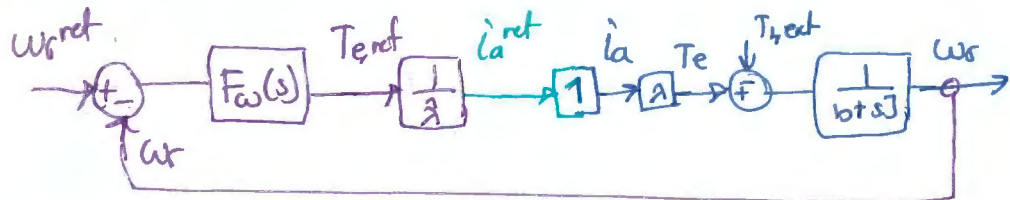
För fullständig ström-reglering krävs nu att motEMF:n hanteras. Detta görs genom att e_a uppställas via det uppmätta varvtal och det uppställda länkade flödet $\hat{\lambda}$. Då kan vi fram-koppla den uppställda e_a , enligt



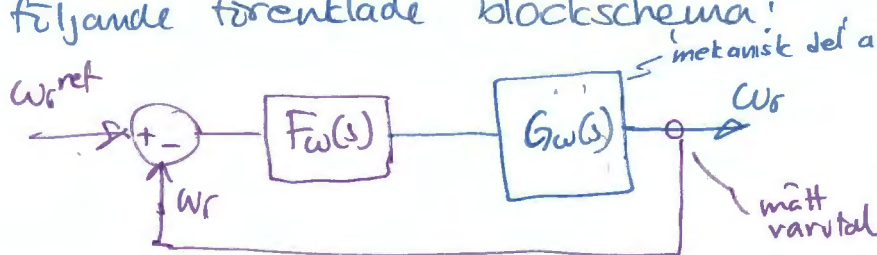
Varvtalsreglering

- Under härledning av varvtalsregulatorn kan vi gott och väl anta att strömmen har nått sitt referensvärde 'omedelbart'

- likströmsmaskin
- ström-regulator
- varvtals-regulator



- Vi kan även anta att det uppställda länkade flödet $\hat{\lambda}$ är helt korrekt
- Vi betraktar det externa lastmomentet $T_{L,ext}$ som en störning vi ej reglerar för.
- Detta ger följande förenklade blockschema:



- Överföringsfunktion för hela systemet: $\frac{\omega_r}{\omega_r^ref} = \frac{F_w(s) G_w(s)}{1 + F_w(s) G_w(s)}$

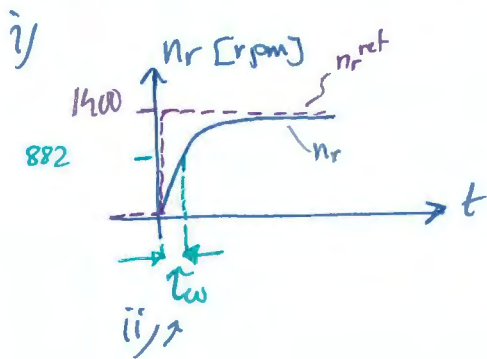
- vi vill att $\frac{\omega_r}{\omega_r^ref} = \frac{\alpha_\omega}{s + \alpha_\omega} = \frac{\alpha_\omega/s}{1 + \alpha_\omega/s}$ dvs. ett första ordningens lågpåsl filter

$$\Rightarrow F_w(s) G_w(s) = \frac{\alpha_\omega}{s} \Rightarrow F_w(s) = \frac{\alpha_\omega}{s} G_w^{-1}(s) = \frac{\alpha_\omega}{s} (\hat{b} + s\hat{J}) \Rightarrow$$

$$K_{pw} = \alpha_\omega \hat{J} = \frac{\ln 9}{10 \cdot \text{tri}} \cdot \hat{J} = \frac{\ln 9}{10 \cdot 18 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.006 = 0.0732 \dots$$

$$K_{iw} = \alpha_\omega \hat{b} = \frac{\ln 9}{10 \cdot 18 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.005 = 0.061 \dots$$

5c) $t=0$ s $\omega_r^{\text{ref}} = n_{r,m} \cdot \frac{\pi}{30} = 1400 \cdot \frac{\pi}{30} = 146.6 \dots \text{rad/s}$



ii) $63\% \text{ av } 1400 = 882 \text{ rpm}$

$\tau_w = \text{tiden att nå } 63\% \text{ av slutvärdet}$
 $= \frac{1}{\alpha_w} = \frac{10 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{\ln 4} = 0.082 \text{ s.}$

iii) Just efter $t=0$

$$i_a^{\text{ref}} = \left[K_{pw} \cdot (\underbrace{\omega_r^{\text{ref}} - \omega_r}_{\approx 0}) + K_{iw} \cdot \underbrace{\int_{t=0}^{t=0+} (\omega_r^{\text{ref}} - \omega_r) dt}_{\approx 0 \text{ just efter } t=0} \right] \cdot \frac{1}{\lambda} \Rightarrow$$

$$\boxed{i_a^{\text{ref}} = K_{pw} \cdot \omega_r^{\text{ref}} \cdot \frac{1}{\lambda} =}$$

$$= 0.0732 \cdot 146.6 \cdot \frac{1}{1.29} = \boxed{8.32 \text{ A}}$$

$$v_T^{\text{ref}} = (\underbrace{i_a^{\text{ref}} - i_a}_{\approx 0 \text{ just efter } t=0}) \cdot K_{pc} + K_{pi} \underbrace{\int_{t=0}^{t=0+} (i_a^{\text{ref}} - i_a) dt}_{\approx 0 \text{ just efter } t=0} + \underbrace{\lambda \cdot \omega_r}_{\approx 0 \text{ just efter } t=0}$$

$$\boxed{v_T^{\text{ref}} = i_a^{\text{ref}} \cdot K_{pc} = 8.32 \cdot 0.183 = 1.52 \text{ V}}$$

Svar: $i_a^{\text{ref}} = 8.32 \text{ A}$

$v_T^{\text{ref}} = 1.52 \text{ V}$

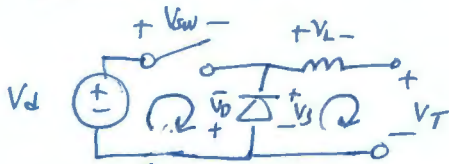
6a) • För nedspänningsomvandlaren är $V_{ot} = D \cdot V_{in}$

• För den aktuella omvandlaren är $V_T = D \cdot V_d \Rightarrow D = \frac{V_T}{V_d}$

• vid $V_d = 250V$ och $V_T = V_{T,m} = 220V \Rightarrow \boxed{D = \frac{220}{250} = 0,88}$

Svar $D = 0,88$

6b) Antag: stationär tillstånd $\Rightarrow e_a = \text{konstant}$, förlustfri omvandlare, CCM



KVL:

$$-V_d + V_{sw} + V_s = 0$$

$$V_s = V_d - V_{sw}$$

KVL: $-V_s + V_L + V_T = 0$

$$V_L = V_s - V_T$$

• börjar med spänningarna V_s, V_L

SW ON! $V_{sw} = 0$

$$\Rightarrow V_s = V_d$$

$$V_d = -V_s = -V_d$$

$\Rightarrow$ dioden backspänd;
blockerar

$$\Rightarrow V_L = V_d - V_T$$

$V_d > V_T$ ty nedspänningsomvandlare

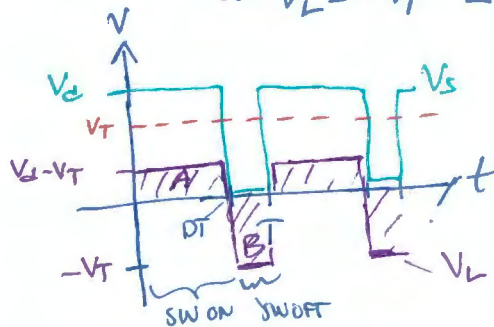
$$\Rightarrow V_L > 0$$

spölen laddas upp

SW OFF:

• spölen laddas ur, dioden leder $\Rightarrow V_s = 0$

$$\Rightarrow V_L = -V_T < 0$$



$$V_{L,ave} = 0 \Rightarrow A = B$$

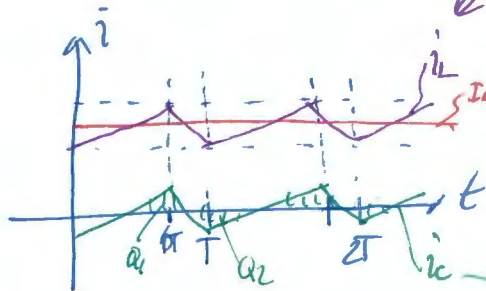
Strömmar:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$V_L > 0 \Rightarrow \frac{di_L}{dt} > 0$$

$$V_L \cdot \text{konstant} \Rightarrow \frac{di_L}{dt} \cdot \text{konstant}$$

$$V_L \cdot \text{negativ} \Rightarrow \frac{di_L}{dt} \cdot \text{negativ}$$



$Q_1 = Q_2$ i stationärtillstånd

$$i_L = i_c + i_a \Rightarrow i_c = i_L - i_a, \text{ stationärtillstånd} = i_{c,ave} = 0$$

$$\Rightarrow \oint i_c dt = \oint i_L dt - \oint i_a dt = 0 \Rightarrow I_{c,ave} = I_{a,ave} \approx \text{dc ty stationärtillstånd}$$

$$\Rightarrow i_c = i_L - I_a$$

= en triangelväg - triangelvägens medelvärde

6c) • vid CCM: $i_L > 0 \Rightarrow \frac{\Delta i_L}{2} \leq \bar{I}_{L,ave} = I_a$

• vid märkdrift: $\boxed{I_{L,ave} = I_a = 18A}$

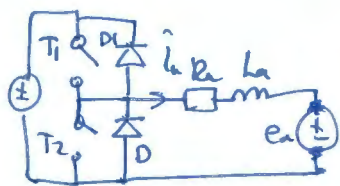
• Δi_L ? $v_L = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \Rightarrow \Delta i_L = \frac{V_L \cdot \Delta t}{L}$

$$\text{SW ON: } \begin{cases} v_L = (V_d - V_T) \\ \Delta t = (DT - 0) = DT \\ T = \frac{1}{f_{sw}} \end{cases} \Rightarrow \boxed{\Delta i_L = \frac{(V_d - V_T) D}{f_{sw} \cdot L} = \frac{(250 - 220) 0.88}{80 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 8.25 A}$$

• $\frac{\Delta i_L}{2} = 4.125 A < I_{L,ave} = 18 A \Rightarrow \text{CCM}$

• Svar: omriktaren arbetar i CCM

6d) En 2-kvadrant
Omriktare

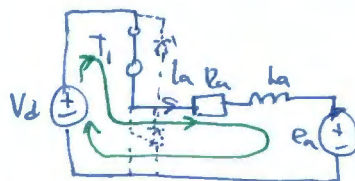


För fallet $i_a > 0$

T1 och D2 används
omväxlande

• SW ON: T1 leder

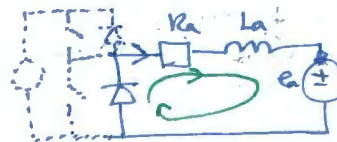
→ strömväg



La-laddas upp

• SW OFF: D2 leder

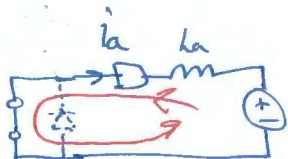
La-laddas ur



För fallet $i_a < 0$

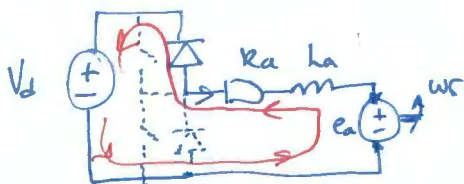
• T2 och D1 används omväxlande

• SW ON:
T2 leder



La laddas upp

• SW OFF D1 leder



La laddas ur

7a) . Motorn skall driva lasten mellan ca. 900 - 1000 rpm ...
...och matas med 50 Hz spänning.

$$n_s = \frac{120 f_s}{P}$$

om $P=2 \Rightarrow n_s = \frac{120 \cdot 50}{2} = 60 \cdot 50 = 3000 \text{ rpm}$
för högt varvtal

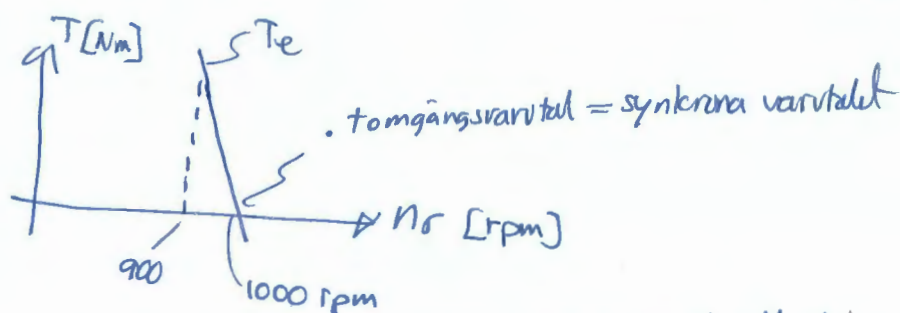
$P=4 \Rightarrow n_s = \frac{120 \cdot 50}{4} = 30 \cdot 50 = 1500 \text{ rpm}$
för högt varvtal

$P=6 \Rightarrow n_s = \frac{120 \cdot 50}{6} = 20 \cdot 50 = 1000 \text{ rpm}$

passar mycket bra då högsta önskade varvtal är 1000 rpm.

Svar: Motorn bör ha
6 poler

7b) . I normalt arbetsområde är $T_e \sim n_r \Rightarrow$



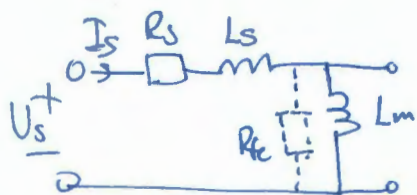
• vid tomgång har motoraxeln ingen extern last att driva.

7c) • Vid tomgång roterar rotorn lika snabbt som luftgapställdet som statorns lindningars skapar, dvs. vid synkrona varvtal: $n_r = n_s$

• Då är eftersläpningen $s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{n_s - n_s}{n_s} = 0$

• det induceras ingen spänning, ström i rotorn och skapas inget vridmoment.

• Detta representeras i ekvivalenta schemat med att $\frac{R'_r}{s} \rightarrow \infty$
då $s \rightarrow 0 \Rightarrow I'_r \rightarrow 0$ och kan därför illustreras som en öppen krets för rotorn.



• Detta gäller idealt sett, fast i praktiken finns alltid lite friktion i motorns kullager $\Rightarrow$ lite eftersläpning $\Rightarrow$ lite rotorström.

• Vid mätning av stator spänning och stator ström i detta driftfall kan

magnetiserings induktansen, L_m , och eventuellt representationen av förlusterna i järnkärnan, R_{fe} , uppställas. Vanligen försummas bidragen från R_s och L_s under testet.

7d) $R_s = 0,19 \Omega$ $X_s = 0,63 \Omega$ $X_m = 11 \Omega$
 $R'_r = 0,18 \Omega$ $X'_r = 0,63 \Omega$ $s_m = 4\%$

i) fasström in istatom $i_s = ?$ $I_s = \frac{U_s}{Z_{tot}}$

$U_s = \text{fasspänning}_{rms} = \frac{\text{huvudspänning}_{rms}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V.}$

$Z_{tot} = Z_s + Z_r // Z_m$

$Z_s = R_s + jX_s$

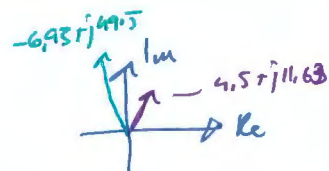
$Z_r = \frac{R'_r}{s} + jX_r$

$Z_m = jX_m$

$Z_r // Z_m = \frac{Z_r \cdot Z_m}{Z_r + Z_m} =$

$= \frac{\left(\frac{R'_r}{s} + jX_r\right) jX_m}{\frac{R'_r}{s} + jX_r + jX_m} = \frac{-X_r X_m + j \frac{R'_r}{s} X_m}{\frac{R'_r}{s} + j(X_r + X_m)} = \frac{-0,63 \cdot 11 + j \frac{0,18}{0,04} \cdot 11}{\frac{0,18}{0,04} + j(11,63)} =$

$= \frac{-6,93 + j49,5}{4,5 + j11,63} = \frac{49,9827... \angle 97,9696...^\circ}{12,4702... \angle 68,847...^\circ}$



$= 4,00817... \angle 29,1226^\circ = 3,50146... + j1,9507...$

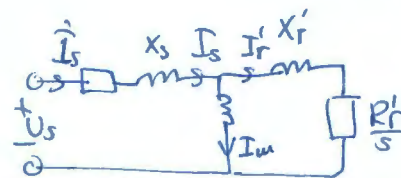
$Z_{tot} = Z_s + Z_r // Z_m = 0,19 + j0,63 + 3,50146 + j1,9507 = 3,69146 + j2,5807$

$I_s = \frac{U_s}{Z_{tot}} = \frac{230,94}{4,504 \angle 34,9574...^\circ} = 51,27... \angle -34,96^\circ$ $= 4,504... \angle 34,952...^\circ$

ii) $P_e = ?$ $P_e = 3 \cdot \frac{1-s}{s} R'_r |I'_r|^2$

man kan använda strömgrening $\Rightarrow$

$I'_r = \left(\frac{jX_m}{\frac{R'_r}{s} + jX_r + jX_m} \right) \cdot I_s = \frac{j11}{\frac{0,18}{0,04} + j11,63} \cdot I_s =$



$= \frac{11 \angle 90^\circ}{12,4702... \angle 68,847^\circ} \cdot 51,27 \angle -34,96^\circ = \frac{11 \cdot 51,27}{12,4702} \angle 90^\circ - 34,96^\circ - 68,847^\circ$

$= 45,225... \angle -13,807^\circ \Rightarrow |I'_r| = 45,225 \text{ A}$

$P_e = 3 \cdot \frac{1-0,04}{0,04} \cdot 0,18 \cdot (45,225)^2 = 26.5071 \text{ kW} \approx 26,5 \text{ kW}$

7d forts. iii) märkvarvtal = ?

effersläpning vid märkdriift $s_m = 0,04$

$$s_m = \frac{n_s - n_{r,m}}{n_s} = 1 - \frac{n_{r,m}}{n_s} \Rightarrow \frac{n_{r,m}}{n_s} = 1 - s \Rightarrow$$

$$\boxed{n_{r,m} = n_s (1 - s) = 1000 \cdot (1 - 0,04) = 960 \text{ rpm}}$$

iv) utvecklat vridmoment $T_e = ?$

$$\boxed{T_e = \frac{P_e}{\Omega_r} = \frac{P_e}{n_{r,m} \cdot \frac{\pi}{30}} = \frac{26\,507,1}{960 \cdot \frac{\pi}{30}} = 263,67 \text{ Nm}}$$

Svar i) $I_s = 51,3 \angle -35,0^\circ$

ii) $P_e = 26,5 \text{ kW}$

iii) $n_{r,m} = 960 \text{ rpm}$

iv) $T_e = 263,7 \text{ Nm}$

8 g) $\frac{G_{ind}}{P} = 8$, $R_s = 3 \text{ m}\Omega$, $L_{sd} = 2 \text{ mH}$, $n_{r,m} = 4000 \text{ rpm}$
 $\Psi_m = 120 \text{ mWb}$, $L_{sq} = 6 \text{ mH}$, $I_{s,m} = 85 \text{ A rms}$

- vid märtdrift:
 MTPA strömvinkeln β ? i_{sd} , i_{sq} ? u_{sd} , u_{sq} ?

- Strömvinkeln för MTPA vid märtdrift.

$$\cos \beta = f(I_{s, \text{mag}})$$

$$I_{s, \text{mag}} = \sqrt{2} \cdot I_{s, \text{rms}} = \sqrt{2} \cdot 85 = 120,21 \text{ A}$$

$$\cos \beta = -\frac{\Psi_m}{4(L_{sd} - L_{sq}) I_{s, \text{mag}}} - \sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{\Psi_m}{4(L_{sd} - L_{sq}) I_{s, \text{mag}}}\right)^2} =$$

$$= -\frac{0,120}{4(2-6) \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2} \cdot 85} - \sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{0,120}{4(2-6) \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2} \cdot 85}\right)^2} =$$

$$= 0,062391774 - 0,709854022 = -0,647462248$$

$$\Rightarrow \beta = \arccos(-0,647462248) = 130,35^\circ$$

$$i_{sd} = I_{s, \text{mag}} \cos \beta = \sqrt{2} \cdot 85 \cdot \cos(130,35^\circ) = -77,83 \text{ A}$$

$$i_{sq} = I_{s, \text{mag}} \sin \beta = \sqrt{2} \cdot 85 \cdot \sin(130,35^\circ) = 91,61 \text{ A}$$

$$\omega_r = \omega_s = \Omega_r \cdot n_p = n_{r,m} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{P}{2} = 4000 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{8}{2} = 1675,516 \text{ rad/s}$$

$$u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_r L_{sq} i_{sq} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot (-77,83) - 1675,516 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 91,61 = -921,20 \text{ V}$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_r L_{sd} i_{sd} + \Psi_m \omega_r = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 91,61 + 1675,516 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot (-77,83) + 0,120 \cdot 1675,516 = -59,47 \text{ V}$$

Svar: $\beta_{\text{MTPA}} = 130,4^\circ$

$$i_{sd} = -77,83 \text{ A}$$

$$i_{sq} = 91,61 \text{ A}$$

$$u_{sd} = -921,2 \text{ V}$$

$$u_{sq} = -59,5 \text{ V}$$

$$8b) \quad T_e = \frac{3n_p}{2} \left(\psi_m \dot{i}_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) \dot{i}_{sd} \dot{i}_{sq} \right) \quad \text{Det utvecklade vridmomentet}$$

$$T_{e,ht} = \frac{3 \cdot 8/2}{2} \left(0,120 \cdot 91,61 + (2,6) \cdot 10^{-3} \cdot (-77,83) \cdot 91,61 \right) =$$

$$= 237,0793 \dots \text{ Nm}$$

$$T_{e,rel} = \frac{3n_p}{2} (L_{sd} - L_{sq}) \cdot \dot{i}_{sd} \dot{i}_{sq} = \text{vridmomentet som beror p\aa reluktans-fenomenet}$$

$$= \frac{3 \cdot 8/2}{2} (2,6) \cdot 10^{-3} (77,83) 91,61 = 171,12 \text{ Nm}$$

$$\boxed{\frac{T_{e,rel}}{T_{e,ht}}} = \frac{171,12}{237,0793 \dots} = 0,7218 \dots \quad \boxed{72,2\%}$$

Svar: Vid m\arkeffekt utg\or reluktansfenomenet 72,2% av totala vridmomentet f\or den aktuella motorn.
