

# CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

## Tentamen i MILJÖTEKNIK OCH ELENERGI Z2 (ENM011/ENM010)

# SVAR

den 23 oktober 2008 kl 14.00-18.00

Lärare: Eva Palmberg, tel 031 772 1571  
Johan Boman, tel 0704 834651  
Torbjörn Thiringer, tel 070 4990877

Lösningförslag: anslås på Studieportalen den 24 oktober 2008

Rättningsprotokoll: anslås på Studieportalen den 12 november 2008

Granskning: av rättning kan ske på avdelningen för elteknik den 13 november 2008 kl 12-13 i sal Fredrik Lamms rum, elteknik. Tentamina kan hämtas fr o m den 18 november 2008 på studieexp, avdelningen för elteknik, vard kl 10-12 och 13-15.

Betygslista: insändes till Centrala studieexpeditionen den 14 november 2008.

Tillåtna hjälpmedel: Physics Handbook, räknatabeller (TEFYMA eller motsvarande), typgodkänd räknare och bifogade formelblad.

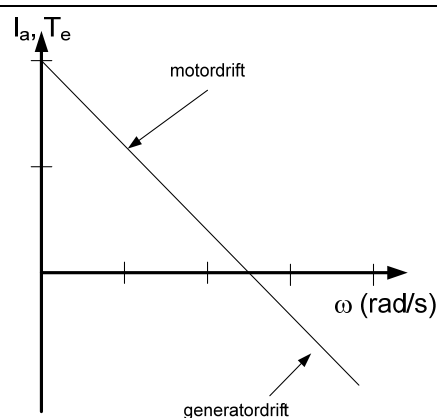
Betygsgränser: 40-60p betyg 3; 61-85p betyg 4; 86-100p betyg 5  
VG på projektuppgiften ger 5 bonuspoäng på denna tentamen.

**OBS! Motivera klart men kortfattat dina svar, t ex beräkningsmetoder och approximationer. Om uppgifter saknas i problemtexten, gör då själv rimliga antaganden.**

**OBS! Separata ENM010-eluppgifter finns efter de första 7 uppgifterna.**

1

Ni har fått ett litet vindkraftverk som skall utrustas med en likströmgenerator. En likströmgenerator är en likströmsmaskin som omvandlar mekanisk axeleffekt till eleffekt. Ekvationerna är identiska med de som gäller i motordrift (Observera för generatordrift:  $I_a$  och  $T_e$  blir negativa,  $\Psi_m$ ,  $U_a$ ,  $E_a$  förblir positiva). Likströmsmaskinens parametrar är  $U_a = 209.4$ ,  $n_{tomgång} = 200$  rpm,  $\Psi_m = 10$ ,  $R_a = 1$   $\Omega$ ,  $L_a = 20$  mH,  $J = 10$  kgm<sup>2</sup>



(40 p)

a. Vid 14 m/s går anläggningen med full effekt och då är vridmomentet på

likströmsmaskinens axel=250 Nm. Vid 4 m/s är momentet på axeln ner i 0 Nm. Beräkna maskinens varvtal, ström och elektrisk effekt vid 14 m/s. (9 p)

**Svar:** I tomgång är varvtalet lika med 200rpm = 20.94 rad/sek. Spänningen blir då

$$\mathcal{E} = \omega \psi = 20.94 \cdot 10 = 209.4 \text{ V}$$

Strömmen blir lika med 0 så  $U_a = 209.4 \text{ V}$ .

Vid full effekt vid 14 m/s ges strömmen av

$$T_e = I_a \Psi_m \text{ vilket ger } I_a = -25 \text{ A.}$$

Vi kan nu räkna ut  $E_a$  och därefter varvtalet enligt

$$U_a = R_a I_a + E_a \Rightarrow E_a = U_a - R_a I_a = 209.4 - (-25 \cdot 1) = 234.4 \text{ V}$$

Varvtalet är nu

$$\mathcal{E} = \omega \psi \Rightarrow \omega = \frac{\mathcal{E}}{\psi} = \frac{234.4}{10} = 23.44 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 223.8 \text{ rpm}$$

$$\text{Effekten } P = U_a I_a = 234.4 \cdot 25 = 5860 \text{ W}$$

- b. För att styra turbinen används en inre momentregleringsloop som behöver ha en tidskonstant på 10 ms. Vidare behövs en yttre varvtalsregleringsloop med en tidskonstant på 5 sekunder. Härled lämplig ström/momentregulator samt varvtalsregulator, samt ange numeriska värden på ström/moment och varvtalsregulatorn. (Att direkt utan härledning skriva upp uttrycken ger 0p) (6 p)

**Svar:**

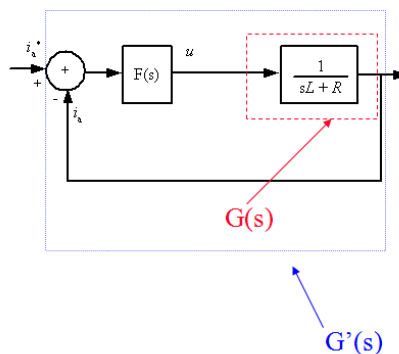
Låt oss studera det slutna systemets bandbredd, och få det som ett första ordningens lågpasfilter:

$$G_c'(s) = \frac{i_s}{i_s^*} = \frac{\alpha_c}{s + \alpha_c}$$

$$G_c'(s) = \frac{K_p / sL + R}{1 + K_p / sL + R} = \frac{K_p}{sL + R + K_p}$$

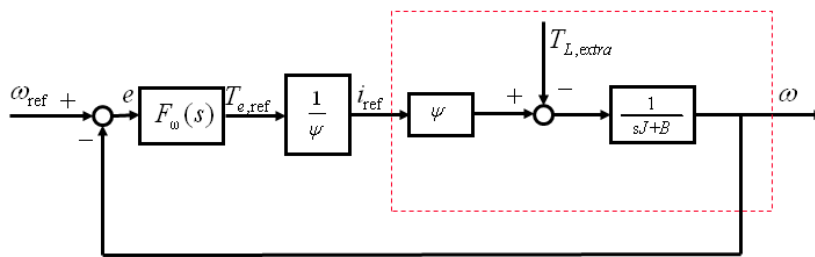
Ignorerar vi R erhåller vi:  $G_c'(s) = \frac{K_p}{sL + K_p} = \frac{K_p / L}{s + K_p / L}$

Kp för likströmsmaskinen:  $K_p = \alpha_c \hat{L}$



På samma sätt erhålles utgående från uppsättningen:

# Varvtalsreglering



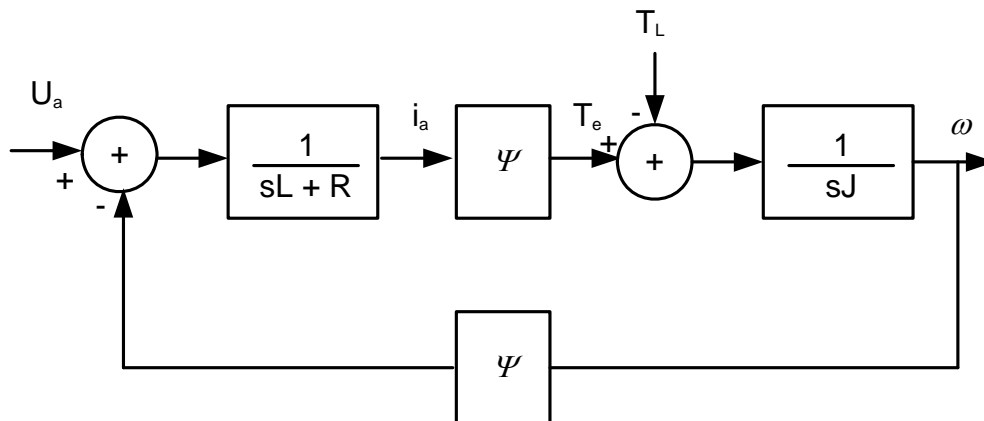
Varvtalsregulatorn blir:

$$K_{p\omega} = \alpha_{\omega} \hat{J}$$

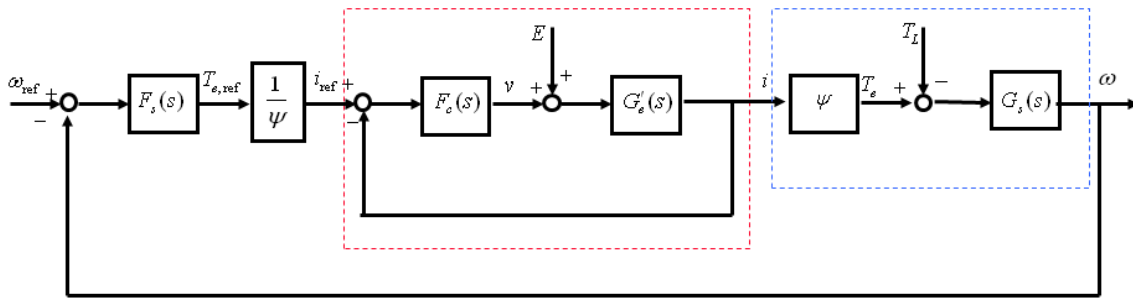
- c. Rita upp ett fullständigt blockschema för likströmsmaskinen inklusive styrningen. Ange mellan varje block vad det är för signal som går där (att endast skriva "ekvationsuttryck" för att representera signalerna ger inte poäng, utan någon form av fysikalisk tolkning av signalen erfordras (6 p)

**Svar:**

Likströmsmaskinen ser ju ut såsom

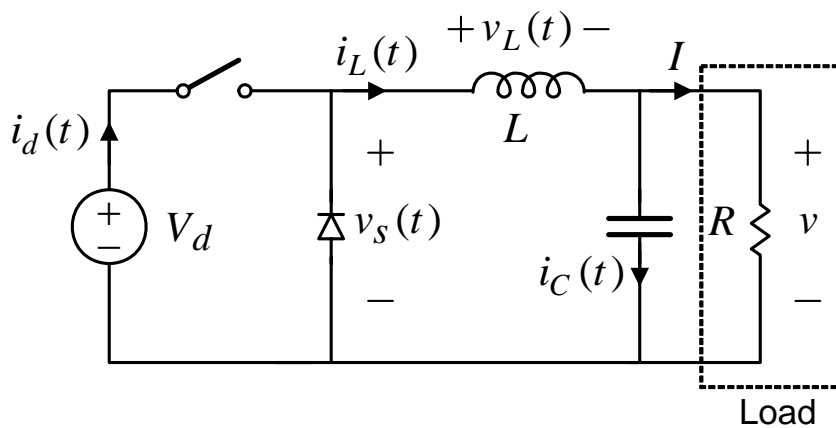


Nu gäller det att koppla in  $U_a$  från vår regleringssystem, och det gör vi med utsignalen från vår strömregulator  $F_c(s)$ , efter subtraktion av rotationsemk'n så verkar den resulterande spänningen på strömkretsen och ger en ström ut. Via flödet i maskinen erhåller vi ett elektrodynamiskt moment som efter subtraktion från lastmomentet blir det moment som verkar på rotorns tröghetsmoment. Finns det en skillnad i drivande och lastande moment kommer varvtalet på maskinen att ändras. Den resulterande varvtalssignalen jämförs med börvärdet på varvtalet och differensen går in i varvtalsregulatorn som ger ut det momentreferensvärde som erfordras för att ställa in varvtalet.



- d. Ni har tillgång till ett batterisystem på 100 V dit ni kan mata den producerade effekten. Ni har tillgång till en MOSFETtransistor ( $R=0.01 \Omega$ ), en diod samt en induktans på 1 mH. Batteriet verkar som en gigantisk kondensator. Föreslå en lämplig omriktarkonfiguration och rita upp dess huvudkretsschema (6 p)

**Svar:** Eftersom batterispänningen är lägre än spänningen från vindkraftverket föreslås en Buckomvandlare



- e. Ni väljer switchfrekvensen till 10 kHz och antar att omriktaren går i CCM. Härled ett uttryck för sambandet mellan inspänning och utspänning (att endast skriva upp uttrycket utan härledning ger 0 poäng). Beräkna aktuell "dutycykel". Rita strömmar och spänningar över induktorn under en switchperiod, samt bekräfta om CCM-antagandet var riktigt. (10 p)

**Svar:** De antaganden som görs är att omvandlaren arbetar i CCM, steady-state samt att utspänningen är en ren DC-spänning på grund av batteriet som även fungerar som en stor kondensator.

Eftersom omvandlaren arbetar i CCM kommer induktorströmmen ( $i_L$ ) att flyta genom switchen när den är tillslagen och dioden blockerar. När switchen är avslagen kommer strömmen frihjula genom dioden istället. Vidare måste medelvärdet av induktorspänningen vara lika med noll över en switchperiod. Genom att granska schemat ser man att spänningen över induktansen måste vara lika med inspänningen minus utspänningen ( $v_L = V_d - V_{load}$ ) under den tid då switchen leder. Under resten av tiden, alltså då switchen blockerar, kommer hela utspänningen med negativ polaritet ( $v_L = -V_{load}$ ) att läggas över

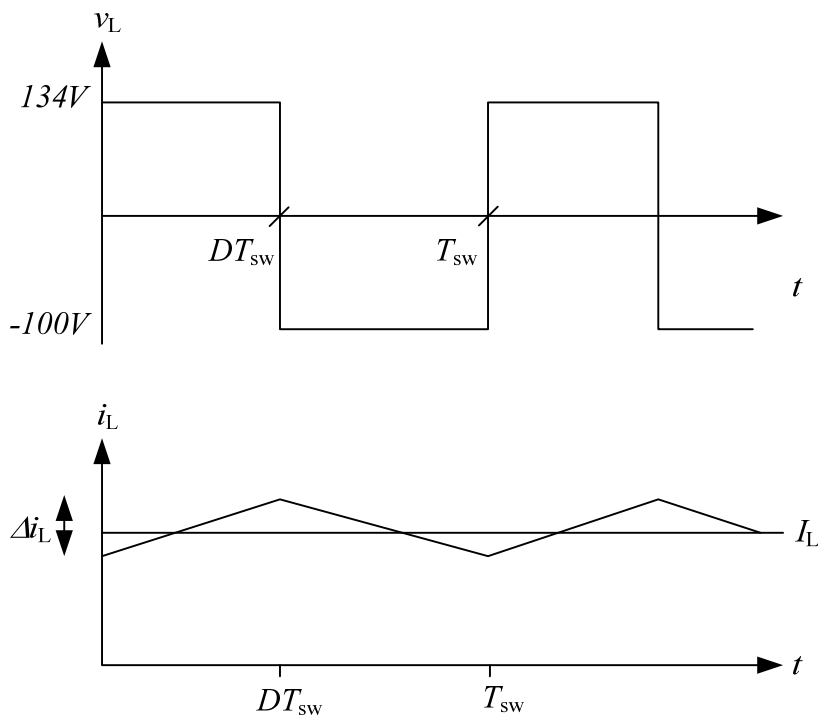
induktansen. Notera att detta gäller enbart eftersom vi har antagit att utspänningen är konstant ( $v_{load} = V_{load}$ ).

$$V_L = \frac{1}{T_{sw}} \left( \int_0^{DT_{sw}} V_d - V_{load} dt + \int_{DT_{sw}}^{T_{sw}} -V_{load} dt \right) =$$

$$= \frac{1}{T_{sw}} (V_d DT_{sw} - V_{load} DT_{sw} - V_{load} T_{sw} + V_{load} DT_{sw}) = 0$$

$$V_{load} = V_d D \rightarrow D = \frac{V_{load}}{V_d} = \frac{100V}{234.4V} \cong 0.426$$

Vilket ger följande utseende på spänningen över induktansen samt strömmen genom densamme.



Antagandet av CCM måste nu kontrolleras. Utifrån figuren kan vi se att om medelvärdet på strömmen är större än eller lika med halva strömriplet ( $I_L \geq \frac{\Delta i_L}{2}$ ) kommer omvandlaren arbeta i CCM. Under den tid som switchen är tillslagen kommer spänningen över induktansen att vara konstant ( $v_L = V_d - V_{load}$ ) vilket ger:

$$v_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \rightarrow \Delta i_L = \frac{v_L \Delta t}{L} = \frac{(V_d - V_{load}) DT_{sw}}{L} = \frac{134V \cdot 0.426}{0.1m \cdot 10k} = 5.71A$$

Den DC-ström som flyter genom lasten även flyter genom induktansen ( $I_{load} = I_L$ ) vilket gör att antagandet om CCM nu kan bestyrkas.

$$I_{load} = I_L = \frac{P_{load}}{V_{load}} = \frac{5860W}{100V} = 58.6A$$

Detta visar att medelströmmen genom induktansen är betydligt större än strömriplet

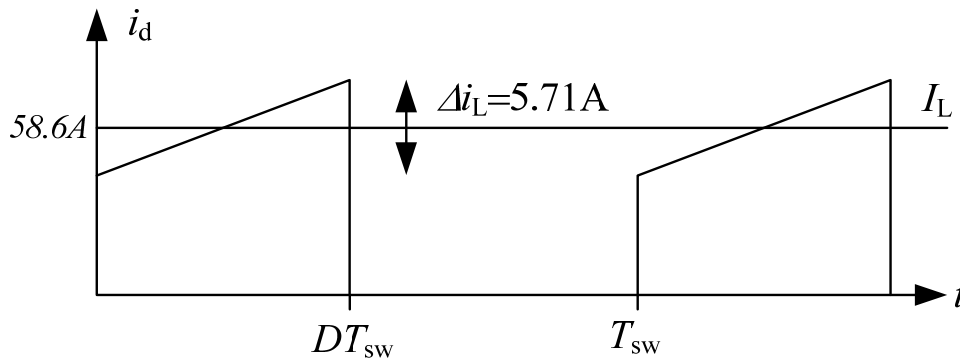
( $I_L \approx \frac{\Delta i_L}{2} \rightarrow 58.6 \approx 5.71/2$ ) vilket betyder att antagandet om CCM är korrekt.

f. Med relevanta förenklingar, beräkna förlusteffekten i MOSFET-transistorn. (3 p)

**Svar:** Den totala ledförlusten för en MOSFET kan beräknas som:

$$P_{\text{cond}} = R_{\text{sw}} \cdot I_{\text{d,RMS}}^2$$

Alltså måste vi beräkna RMS-värdet på strömmen genom komponenten. Strömmen kan ritas som:



Vi försummar strömriplet vilket gör att strömmen under den tid som transistorn leder kan ses som konstant, alltså 58.6 A. Detta gör att RMS-värdet kan beräknas som:

$$I_{\text{d,RMS}}^2 = \sqrt{\frac{DT_{\text{sw}}}{T_{\text{sw}}}} 58.6 \text{ A} = 38.3 \text{ A}$$

Den totala förlusteffekten kan då beräknas som:

$$P_{\text{cond}} = 0.01 \cdot 58.6^2 = 14.65 \text{ W}$$

2 a. Förklara begreppen transmaterialisering och dematerialisering. (4 p)

**Svar:** Transmaterialisering betyder att man byter ett material mot ett annat, som förhoppningsvis är mer hållbart att använda. Dematerialisering betyder att gå ifrån att använda materialet i fråga. Det kan vara helt- byt t ex pappersbrev mot e-post – eller delvis – genom att använda mindre av materialet genom effektivisering.

b. Ge konkreta exempel på vad du i din roll som z-ingenjör kan göra för att med hjälp transmaterialisering och dematerialisering kan verka för en hållbar utveckling. Minst ett exempel på varje behövs. (4 p)

**Svar:** Koppas => aluminium i strömförande ledningar. Glasflaska => plastflaska för viktreducering. Enskilda bilar => bilpool. post => e-post. Telefon med tråd => mobiltelefoni.

(8 p)

3 a. Vad menas med serie- respektive parallellhybriddrift av fordon? (4 p)

**Svar:** I seriehybriden driver förbränningsmotorn en generator som laddar batterierna som i sin tur driver en elmotor som driver hjulen. I parallellhybriden ger både

(14 p)

elmotorn och förbränningsmotorn kraft till drivningen.

- b. Vad är den huvudsakliga skillnaden mellan dessa två tekniker?(4 p)

**Svar:** Serie är enklare än parallell. Parallell har möjlighet att ge mer kraft i en del lägen när t ex extra kraft/moment behövs så som i uppförsbackar, omkörningar, start.

- c. Eftersom strömmen fortfarande i stor utsträckning leds tillbaks till batteriet via chassit/karossen i fordonet så går det mycket ström i enkelledare i fordon. Som ingenjör får du i uppgift att minimera det magnetiska fältet i fordonet. Jämför effekten av att minska strömmen i ledningen och att öka avståndet mellan ledningen och passagerarna, som två alternativa sätt att minska påverkan. (6 p)

**Svar:** Resonemanget bör visa på kunskap om att fältet ökar proportionellt med strömmen och även avtar omvänt proportionellt mot avståndet.

- 4 Ge tre exempel på när man ska använda Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) respektive Livscykelanalys (LCA). Förklara även skillnaden mellan de två.

**Svar:** MKB används när man ska starta eller förändra en verksamhet som kan ge en påverkan på miljön eller hälsan. LCA används när man vill ta reda på den "fullständiga" påverkan på miljön av en produkt eller tjänst. MKB regleras av lagar och förordningar, vilket LCA inte gör. MKB fokuserar på miljön och hälsan, LCA fokuserar på en produkt eller tjänst.

(9 p)

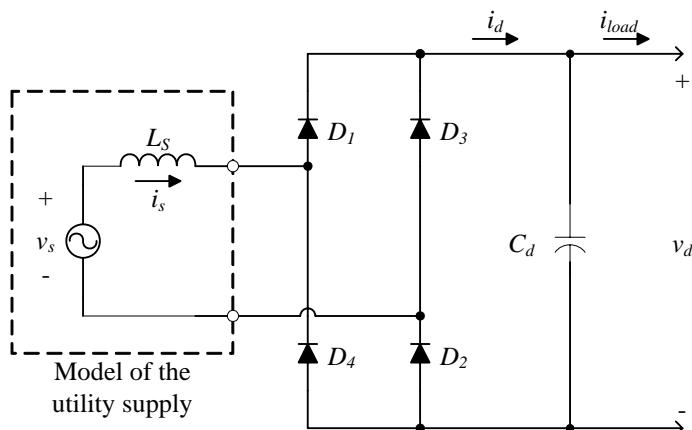
- 5 Hållbar utveckling sägs "stå på tre ben". Vad menar man? Ge en definition av hållbar utveckling.

**Svar:** De tre benen är ekologisk, ekonomisk och social hållbar utveckling. Man kan utveckla detta till någonting i stil med en definition: "Meet the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their needs" (WCED 1987:87). Hållbar utveckling tillfredsställer dagens behov utan att äventyra förutsättningarna för kommande generationer att tillfredsställa sina behov.

(7 p)

- 6 a) För att driva er dator erfordras en effekt på ca 150 W. Denna tas från elnätet, dvs 230 V, 50 Hz, som likriktas för vidare likspänningsomvandling. Rita ett förslag på hur denna första likriktning kan gå till och diskutera för- och nackdelar med ert föreslagna likriktarkoncept. (4 p)

**Svar:**



Denna likriktare är billig, nackdelen är att den drar icke-sinusformad ström från elnätet.

(10 p)

- b) Vilka 3 laddningsbara batterityper skulle passa för er vindkraftsapplikation i uppgift 1? Vilket har störst energiinnehåll per kg? (4 p)

**Svar:** Klassiska bly-syra-batterier, Nickel Metallhydrid eller Litium-Jon-batterier. Litium-Jon har bäst energiinnehåll per kg.

- c) Hur ser den tillgängliga energin i vinden ut som funktion av vindhastigheten? (Att den ökar med vindhastigheten är en alltför förenklad beskrivning för att ge poäng). (2 p)

**Svar:** Den tillgängliga energin ökar med kuben på vindhastigheten.

- 7 När man pratar om den globala ökade växthuseffekten säger man att den beror på en ökad mängd växthusgaser. En orsak sägs också vara vårt slöseri med energi. Eftersom man inte kan förbruka energi verkar det svårt att slösa med den.

- a. Förklara hur man trots allt kan motivera ett uttalande om att vi slösar med energi. (4 p)

**Svar:** Men kan göra en process effektivare så att mängden energi som behövs inte är så stor.

- b. Ett sätt att effektivisera är att titta på energikvalitet istället för energikvantitet. Vilket begrepp använder man för energikvalitet? (2 p)

**Svar:** Exergi.

- c. Ge två exempel på hur man kan minska slöseriet genom att utgå från energikvalitet istället för energikvantitet. (6 p)

**Svar:** Kolla i miljöfysikboken sid 256 och framåt.

**(12 p)**

---



---

## Elenergiuppgifter för ENM010

---

- E1** En trefasig sexpolig asynkronmotor för 50 Hz är märkt : 150 kW; 3.3 kV; 36 A;  $\cos \phi=0.8$ ; 965 rpm.  
Vid direkt start är maskinens startström 200 A och tillförda effekten 345 kW. Statorns resistans är  $1.5 \Omega/\text{fas}$ . Vid start kan statorns järnförluster försummas i jämförelse med dess kopparförluster. Gör i övrigt lämpliga approximationer vid beräkningarna.

Bestäm med motorn ansluten till ett 3.3 kV-nät:

- a) Startmomentet för motorn vid direkt start
- b) Förhållandet mellan startmoment och märkmomentet
- c) Förhållande mellan rotorförlusterna vid start och märkdrift

**(15 p)**

**Svar:** Se sid 11.

- E2** Tre symmetriska belastningar enligt nedan är anslutna till ett symmetriskt trefasnät med nominell spänning 690 V, 50 Hz;
- I. Belastning bestående av tre lika impedanser  $Z=(7.5-j9) \Omega$ ,  $\Delta$ -kopplade
  - II. Belastning bestående av tre lika impedanser  $Z=(4+j2) \Omega$ , Y-kopplade
  - III. En rent resistiv belastning med märkeffekt  $S_n=15 \text{ kVA}$

- a) Bestäm den fasström som nätet belastas med av respektive belastning
- b) Bestäm den resulterande fasström som nätet belastas med (alla tre lasterna ihop).
- c) Bestäm den från nätet totalt avgivna skenbara effekten (i komplex form).
- d) Bestäm den effektfaktor med vilken nätet arbetar samt lastens karaktär.

**Svar:** Se sid 12.

**(15 p)**

- E3** Varför används järnkärnor i magnetiska kretsar (i t.ex. transformatorer och elmaskiner) och varför är dessa ofta laminerade?

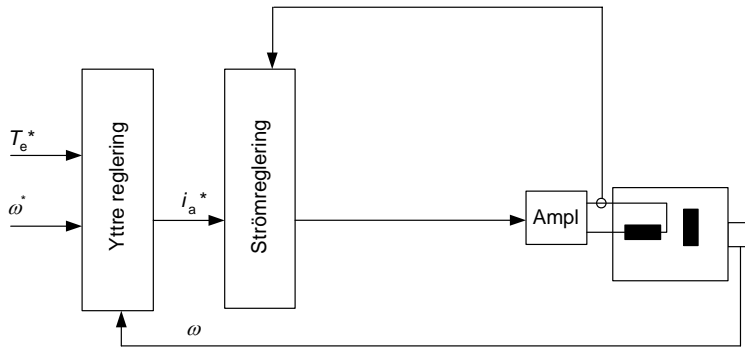
**Svar:** Järn leder magnetflöde mycket bra, därför används de för att leda flödet dit man vill ha det. Järn är elektriskt ledande, detta innebär att när man försöker trycka ett flöde genom järnet bildas virvelströmmar. För att reducera dessa virvelströmmar använder man sig av tunna plåtskivor som lamineras med något elektriskt isolerande innan dessa sätts samman till en järnkärna.

**(5 p)**

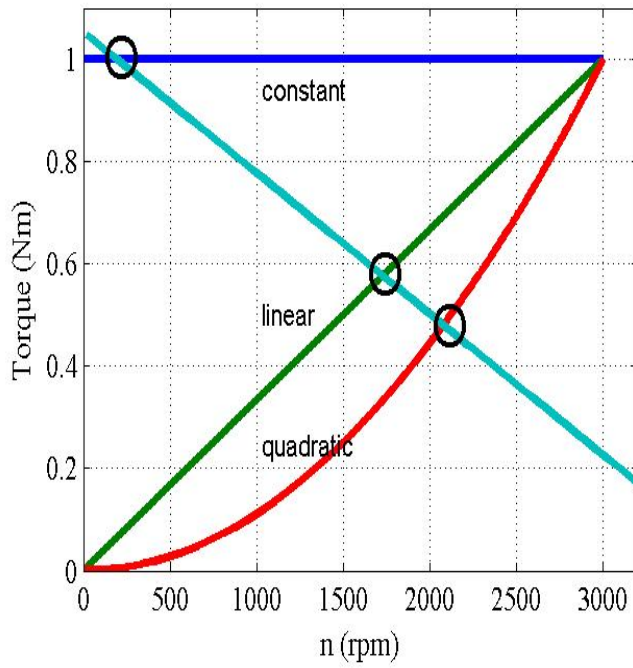
- E4** Vad menas med ett motordrivsystem? Rita en enkel skiss. Hur bestäms den stationära arbetspunkten vid en motordrift, där både motorns och lastens momentkurvor är kända? Rita ett moment-varvtalsdiagram.

**Svar:** Ett motordrivsystem är ett system (en omriktare, reglersystem samt kraftelektronisk omformare) där man skickar in ett börvärde på t.ex. varvtal som driften realiserar. Ett exempel på hur ett drivsystem är konstruerat ges i figuren nedan

**(5 p)**



En motordrift har en driftkaraktistika, i figuren nedan sluttande som funktion av varvtalet. Lasten brukar öka med varvtalet. Där lastkaraktistiken skär drivkaraktistiken får vi driftpunkten.



E18

3-fas AM: 150 kW, 3,3 kV; 36 A;  $\cos \varphi = 0,8$   
 965 rpm; 50 Hz;  $R_s = 1,5 \Omega/\text{fas}$

$P_{\text{start}} = 345 \text{ kW}; I_{\text{start}} = 200 \text{ A}$

a)  $T_{\text{start}} = ?$

Vid start gäller  $s = 1$

$P_m$  och  $P_{\text{Fes}}$   $\Rightarrow$  kan försummas  $\Rightarrow$

$P_m = P_r = 0 \Rightarrow P_s = P_0 + P_{\text{cus}}$

$(P_{\text{cus}})_{\text{start}} = 3 R_s I_{\text{start}}^2 = 3 \cdot 1,5 \cdot 200^2 = 180 \text{ kW}$

$P_0_{\text{start}} = P_{\text{sstart}} - P_{\text{cus}} = 345 - 180 = 165 \text{ kW}$

$T_{\text{start}} = \frac{P_0_{\text{start}}}{\omega_s} = \frac{165 \cdot 10^3}{\frac{2\pi \cdot 1000}{60}} = 1575,6 \text{ Nm}$

b)  $T_n = ?$   
 $T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{150 \cdot 10^3}{\frac{2\pi \cdot 965}{60}} = 1484,3 \text{ Nm}$

$\frac{T_{\text{start}}}{T_n} = \frac{1575,6}{1484,3} = 1,06$

c)  $P_{\text{rot}} = ?$

$P_{\text{rot}} = P_{\text{Esr}} + P_{\text{Fsr}} = P_{\text{Esr}} = s \cdot P_s$

$\frac{P_{\text{min}}}{\omega_n} = \frac{P_{0n}}{\omega_s}$

$P_{0n} = P_{\text{min}} \frac{\omega_s}{\omega_n} = P_{\text{min}} \frac{n_s}{n_n}$

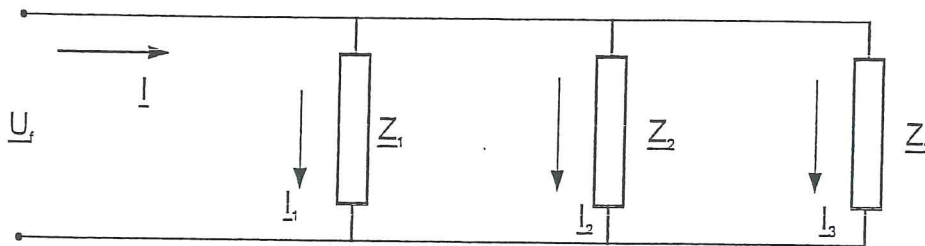
$\frac{1 P_{\text{rot}}|_{\text{start}}}{(P_{\text{rot}})_n} = \frac{s_{\text{start}} P_s|_{\text{start}}}{s_n P_{0n}} = \frac{1 \cdot P_s|_{\text{start}}}{s_n \frac{1}{1-s_n} P_{2n}} = \frac{1-s_n}{s_n} \frac{P_s|_{\text{start}}}{P_{2n}}$

Med insatta värden och  $s_n = \frac{1000 - 965}{1000} = 0,035$  uphålls =

$\frac{1 P_{\text{rot}}|_{\text{start}}}{(P_{\text{rot}})_n} = \frac{1 - 0,035}{0,235} \frac{165}{150} = 30,33$

EL

a) Ekvivalent Y-fas krets:



$$\underline{U}_f = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398,37 \angle 0^\circ \text{ - referens}$$

I)

$$\underline{Z}_\Delta = 7,5 - j9 \Rightarrow \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3} = 2,5 - j3 = 3,91 \angle -50,19^\circ \Omega/\text{fas}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_1} = \frac{398,37 \angle 0^\circ}{3,91 \angle -50,19^\circ} = 101,89 \angle 50,19^\circ = (65,23 + j78,27) \text{ A}$$

II)

$$\underline{Z}_2 = 4 + j2 = 4,47 \angle 26,57^\circ \Omega/\text{fas}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_2} = \frac{398,37 \angle 0^\circ}{4,47 \angle 26,57^\circ} = 89,12 \angle -26,57^\circ = (79,71 - j39,86) \text{ A}$$

III)

$$\underline{I}_3 = \frac{S_n}{\sqrt{3}U} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 690} = 12,55 \text{ A}$$

b)

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 65,23 + j78,27 + 79,71 - j39,86 + 12,55 = 157,49 + j38,41 = 162,11 \angle 13,71^\circ \text{ A}$$

c)

$$\underline{S} = 3 \cdot \underline{U}_f \underline{I}^* = 3 \cdot 398,37 \angle 0^\circ \cdot (157,49 - j38,41) = (188218 - j45904) \text{ VA} = P - jQ$$

d)

$$\cos 13,71^\circ = 0,972 \quad \cos \varphi = 0,972 \text{ kapacitiv karaktär}$$

Svar: a)  $\underline{I}_1 = 101,9 \angle 50,2^\circ \text{ A}$

$$\underline{I}_2 = 89,1 \angle -26,6^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_3 = 12,6 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$b) \underline{I} = 162,1 \angle 13,7^\circ \text{ A}$$

$$c) \underline{S} = (188,2 - j45,9) \text{ kVA}$$

$$d) \cos \varphi = 0,972, \text{ kapacitiv karaktär}$$