Lösningsförslag/facit till Tentamen

TSFS04 Elektriska drivsystem
11 mars, 2013, kl. 08.00-12.00

Tillåtna hjälpmedel: TeFyMa, Beta Mathematics Handbook, Physics Handbook, Formelsamling - Elektriska drivsystem och miniräknare.

Ansvarig lärare: Mattias Krysander, tel 013-282198.

Totalt: 40 poäng.
Preliminära betygsgränser:
Betyg 3: 18 poäng
Betyg 4: 25 poäng
Betyg 5: 30 poäng

Uppgift 1.

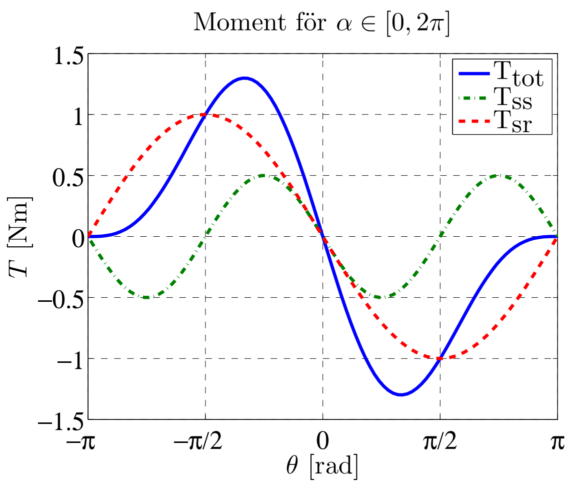
a) Sett från rotorlindningen ser kretsen identisk ut oavsett vinkeln α, rotons självinduktans kommer därmed att vara konstant, alltså är $L_{rr} = L_b$. Sett från statorlindningen kommer kretsen att vara identisk om den vrids ett halvt varv, den kommer därmed variera periodiskt med perioden 2α, alltså är $L_{ss} = L_c$. För ömseinduktansen spelar lindningarnas rikning roll, rotorn behöver då vridas ett helt varv för att kretsen ska bli identisk med ursprungsläget, ömseinduktansen varierar alltså med perioden α och därmed är $L_{sr} = L_a$.

b) Komplementenergin för systemet är:

$$W'_{\text{fld}}(i_s, i_r, \alpha) = \frac{1}{2}L_{ss}i_s^2 + L_{sr}i_si_r + \frac{1}{2}L_{rr}i_r^2 = 0.25 \cdot (1 + \cos 2\alpha) + \cos\alpha + 8 \cdot 10^{-3}$$

Momentet ges av:

$$T_{\text{fld}} = \left.\frac{\partial W'_{\text{fld}}(i_s, i_r, \alpha)}{\partial \alpha}\right|_{i_s, i_r} = -2i_s^2 \sin 2\alpha - i_si_r \sin\alpha = -0.5 \sin 2\alpha - \sin\alpha$$



c) Om rotorn vore cylindrisk kommer ensdast ömseinduktansen att variera med vinkeln α och därmed ge det enda momentbidragget. Om ömseinduktansen ej påverkas fås:

$$T(\alpha) = -i_si_r \sin\alpha$$

vilket motsvarar den röda streckade linjen i figuren ovan (T_{sr}). Momentetmax kommer flyttas utåt mot $\alpha = \pm\pi$ samt att minska i amplitud.

d) Att byta ut en spole mot en permanentmagnet är ekvivalent med att ha en spole med konstant ström. Momentet ges av $T = -2i_s^2 \sin 2\alpha - i_si_r \sin\alpha$, för $i_s = 0$ blir momentet noll även om $i_r \neq 0$, det är alltså rotorlindningen som ska bytas ut mot en permanentmagnet.

Uppgift 2. a) Ekvivalent krets för shuntkopplad likströmsmaskin (Boken - figur 7.4)

b) Beräkna först K_f

$$I_f = V_a/R_f \Rightarrow I_{a1} = I_1 - I_f \Rightarrow K_f = \frac{T_1}{I_fI_{a1}}$$

delsvar: $I_f = 0.4$ A, $K_f = 2$
Beräkna sedan varvtal 1

$$\omega_1 = \frac{E_{a1}}{K_fI_f} = \frac{V_a - R_aI_{a1}}{K_fI_f}$$

och på samma sätt för lastfall 2

$$I_{a2} = \frac{T_2}{I_f K_f}$$
$$I_2 = I_f + I_{a2}$$
$$\omega_2 = \frac{E_{a2}}{K_f I_f} = \frac{V_a - R_a I_{a2}}{K_f I_f}$$

Svar: $\omega_1 = 112.5$ rad/s $= 1074$ rpm, $I_2 = 30.4$ A, $\omega_2 = 87.5$ rad/s $= 835.6$ rpm

c) Räkna först ut effekten vid 90 km/h

$$F = m\frac{\Delta v}{\Delta t}$$
$$P_{max} = F \cdot v_{max}$$

delsvar: $F = 2000$ N, $P_{90} = 50$ kW
vilket ger moment på motorn enligt

$$T_{max} = \frac{P_{90}}{\omega_m}$$

Ställ sedan upp följande ekvationer för shunt-dc-motorn:

$$T = K_f I_f I_a$$
$$E_a = K_f I_f \omega_m$$
$$V_a = E_a + I_a R_a$$
$$V_a = I_f R_f$$

omskrivning av dessa ger:

$$I_f R_f = K_f I_f \omega_m + I_a R_a \Rightarrow I_a = \frac{I_f}{R_a}(R_f - K_f \omega_m) \Rightarrow$$
$$T = K_f I_f^2 \frac{R_f - K_f \omega_m}{R_a} \Rightarrow I_f = \sqrt{\frac{T R_a}{K_f(R_f - K_f \omega_m)}}$$

som sedan mha ovanstående ekvationer ger I_a, V_a och E_a.
delsvar: $I_f = 2.426$ A, $I_a = 98.4$ A, $E_a = 508.1$ V
Total effektivitet beräknas sedan enligt

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} = \frac{P_{90}}{I_{tot} V_a}$$

Svar: $V_a = 606.5$ V, $I_{tot} = 100.8$ A, $\eta = 81.76\%$

Uppgift 3. De ekvivalenta kretsparametrarna blir med enligt (6.29)-(6.31):

$$V_{1,eq} = |\hat{V}_{1,eq}| = |\hat{V}_1 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)}| = 212.3 \text{ V}$$
$$Z_{1,eq} = R_{1,eq} + jX_{1,eq} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = 0.94 + 1.95j\,\Omega$$

a) Med slippet $s = 0.04$ kan den totala impedensen och varvtalet på rotorn beräknas enligt

$$Z_{tot} = R_1 + jX_1 + jX_m//(jX_2 + R_2/s) = 26.4 + 19.4j\,\Omega$$
$$n_s = \frac{f_e \cdot 60}{p/2} = 3000 \text{ varv/min}$$
$$n_m = (1 - s) \cdot n_s = 2880 \text{ varv/min}$$

Strömmen, ineffekten och effektförlusten i statorlindningen beräknas enligt

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{Z_{tot}} = 5.35 - 3.98j = 6.66e^{-j36.4^\circ} \text{ A}$$
$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos(-36.4^\circ) = 3.52 \text{ kW}$$
$$P_{stator} = 3R_1 I_1^2 = 133 \text{ W}$$

Luftgapseffekten, rotorförluster, axelns utmoment och effektiviteten blir följande

$$P_{gap} = P_{in} - P_{stator}$$
$$P_{rotor} = sP_{gap} = 135 \text{ W}$$
$$P_{shaft} = P_{mech} = (1-s)P_{gap}$$
$$\omega_m = n_m \frac{60}{2\pi} = 301.6 \text{ rad/s}$$
$$T_{shaft} = \frac{P_{shaft}}{\omega_m} = 10.8 \text{ Nm}$$
$$T_{shaft} = \frac{1}{\omega_s} \frac{n_{ph} V_{1,eq}^2 (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} = 10.8 \text{ Nm (Alternativt)}$$
$$\eta = \frac{P_{shaft}}{P_{in}} = 0.923$$

b) Maxmomentet enligt (6.36), motsvarande slip och hastighet:

$$\omega_s = 2\pi f_e (2/p) = 314.2 \text{ rad/s}$$
$$T_{\max} = \frac{1}{\omega_s} \frac{0.5 n_{ph} V_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}} = 39.2 \text{ Nm}$$
$$s_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}$$
$$n_{m,maxT} = (1 - s_{maxT}) n_s = 2011 \text{ varv/min}$$

För att uppnå så stort moment som möjligt vid ($n_m = 1000$ varv/min) behöver $R_{ext,1000\ rpm}$ vara enligt (6.35)

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = 0.67$$
$$R_{ext,1000\ rpm} = s \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} - R_2 = 1.53\,\Omega$$

För att uppgylla Kalles önskemål så behöver den externa resistansen vara $1.53\,\Omega$/fas vid 1000 varv/min där resistansen är refererad till statorsidan.

Uppgift 4.

a)

$$n_m = \frac{f_e \cdot 60}{p/2} = 1000 \text{ varv/min}$$

b)

$$L_{af} = \frac{\sqrt{2} V_{a,\text{rated}}}{2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot I_{f0}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 800/\sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 35} \approx 59 \text{ mH}$$

c) Eftersom vinkeln mellan spänningen och strömmen är 30° så är effektfaktorn $\cos(\theta) = \frac{\sqrt{3}}{2}$ och ankarströmmen är

$$I_a = \frac{P}{3V_{a,\text{rated}} \cdot \cos(\theta)} = 83.3 \text{ A}$$
$$\hat{I}_a = 83.3e^{-j30^\circ}$$

Den inducerade spänningen är

$$E_{af} = |\hat{E}_{af}| = |\hat{V}_a - \hat{I}_a(R_a + jX_s)| = 415.9 \text{ V}$$
$$\hat{E}_{af} = 415.9e^{-j53.98^\circ}$$

Den efterfrågade fältströmmen ges av

$$I_f = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot L_{af}} = 31.5 \text{ A}$$

d) När frekvensen halveras så halveras även ankarspänningen enligt reglerprincipen. Induktanserna beror på frekvensen enligt $X = L\omega$. Eftersom effektfaktorn är 1 så fås följande

$$n_m = \frac{f_e \cdot 60}{p/2} = 500 \text{ varv/min}$$
$$V_a = \frac{800/2}{\sqrt{3}} = 230.9 \text{ V}$$
$$X_{s,25Hz} = 25 \cdot \frac{X_s}{50} = 0.5X_s$$
$$I_a = \frac{P}{3V_a} = 72.2 \text{ A}$$
$$E_{af} = |\hat{E}_{af}| = |\hat{V}_a - \hat{I}_a(R_a + j0.5X_s)| = 275 \text{ V}$$
$$I_f = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot L_{af}} = 41.7 \text{ A}$$

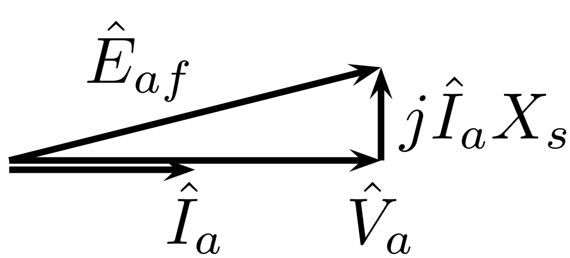
Uppgift 5.

a) Synkronreaktansen X_s modellerar läckflödet och huvudflödet från statorn.

E_{af} modellerar den inducerade (eller genererade) spänningen orsakat av rotation och magnetiseringen i rotorn. Det vill säga den inducerade spänningen i fas a från rotorn.

b) Generatordrift

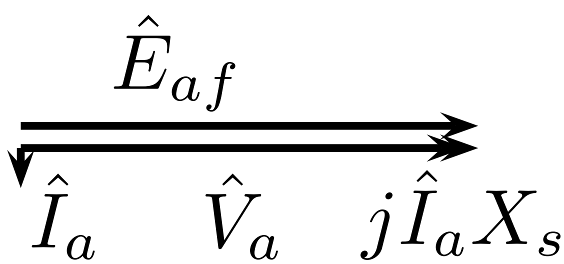
c) Se figur 1



Figur 1: Visardiagram för Uppgift 5c.

d) Generatordrift eftersom den inducerade spänningen $\hat{E}_{af}$ ligger före ankarspänningen $\hat{V}_a$.

e) Se figur 2. Eftersom magnetiseringen är konstant så kommer även magnituden på $\hat{E}_{af}$ vara konstant.



Figur 2: Visardiagram för Uppgift 5e.