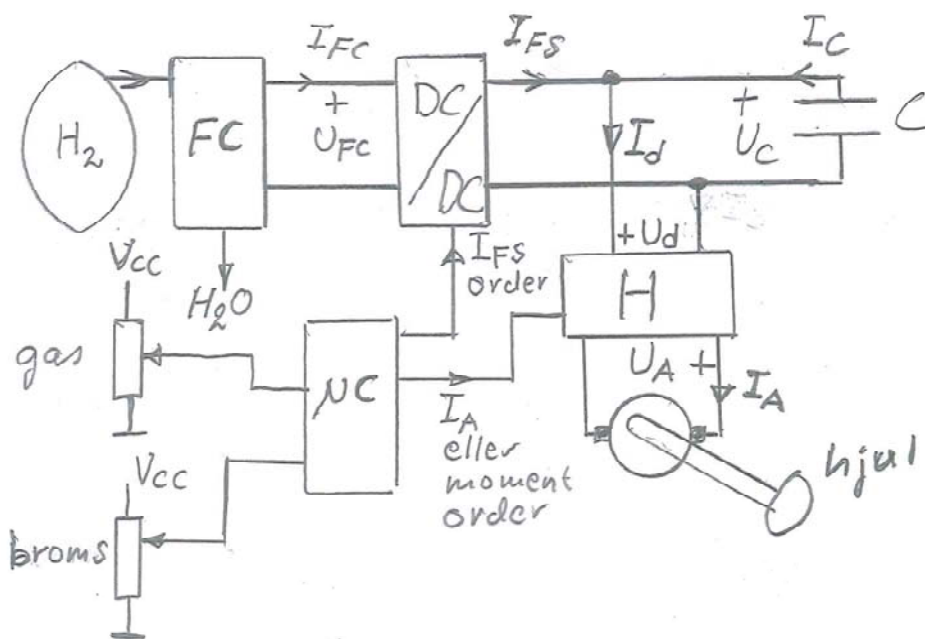


## U10:7

En experimentbil som byggts av teknologer på KTH heter SPIROS, den har deltagit i ett antal "Shell eco maraton" tävlingar. Den har haft lite olika konstruktion från år till år. År 2011 är det tänkt att den ska ha en bränslecell och en superkondensator. Den drivs av en permanentmagnet synkronmotor. Det är en så kallad "Brushless DC" eller trapetsmotor, men i vårt resonemang antar vi den drivs av en PM-likströmsmotor. Vikten för bilen blir ca 135 kg och föraren antas väga 70 kg. Nedan visas en skiss på systemuppbyggnaden.



För bränslecellen antas följande: Tomgångsspänning på 8V och vid belastning med 115 A sjunker spänningen till 5V.

Kondensatorn (supercap) antas ha kapacitansen 33 F.

Från bränslecellen går effekten genom en DC/DC omvandlare (step up) till antingen kondensatorn eller till invertern och motorn. Effekten kan inte gå åt motsatt håll.

H-bryggan styrs från en mikrokontroller och den får information dels från gaspedalen och dels en bromspedal (potentiometrar). Spänningen från dessa AD-omvandlas och tas in i mikrokontrollern. Mikrokontrollern ger en momentorder (strömorder) till invertern. Invertern mäter strömmen och reglerar strömmen så att den följer strömordern (om det går).

För fordonet gäller:

Rullmotstånd: 10 N (oberoende av varvtal)

Luftmotstånd: 12N vid 30 km/h

Direktdrift från elmotor via hjul med radien 0,25m.

Elmotordata: 930W, 36V, 32,5A, 1500 varv/minut, 16 kg

- a) Beräkna den erforderliga mekanisk effekten för framdrivning vid 30 km/h (önskad hastighet).
- b) Beräkna erforderlig motorström för framdrivning vid 30 km/h.
- c) Beräkna erforderlig klämspänning till motorerna för framdrivning vid 30 km/h.
- d) Beräkna motorns verkningsgrad vid framdrivning vid 30 km/h.
- e) Välj en utväxling som ger högre verkningsgrad. Spänningen från H-bryggan är begränsad till 36V.

Vid acceleration tas energin från kondensatorn tills spänningen sjunkit till 36 V då bränslecellen tar över.

- f) Vilken spänning måste kondensatorn vara laddad till för att energin ska räcka till att accelerera från stillastående till 30 km/h? Det antas att all energi kan omsättas till rörelseenergi
- g) Samma fråga som i f) men nu skall hänsyn även tas till rullmotstånd och luftmotstånd. Bilen skall accelereras likformigt under 30 s till 30 km/h.

Lösning:

$$a) P_{mek} = F \cdot v = (10N + 12N) \cdot 8,33m/s = 183W$$

$$b) n = 60 \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{v}{r} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{30}{0,25} = 318 \text{ varv/minut}$$

$$M = F \cdot r = (10N + 12N) \cdot 0,25m = 5,5Nm$$

Vi vill beräkna momentkonstanten för att översätta moment till ström.

$$\text{Spänningsekvationen: } U_A = R_A \cdot I_A + E$$

$$\text{Ledvis multiplikation med } I_A \text{ ger en effektekvation: } U_A \cdot I_A = R_A \cdot I_A^2 + E \cdot I_A$$

Att sista termen är den mekaniska effekten visas nedan:

$$P_{mek} = F \cdot v = \frac{M}{r} \cdot \omega \cdot r = M \cdot \omega = K_2 \Phi \cdot I_A \cdot \frac{E}{K_2 \Phi} = I_A \cdot E$$

$$\text{Vilket ger: } U_A \cdot I_A = R_A \cdot I_A^2 + P_{mek}$$

$$\text{Härur kan } R_A \text{ beräknas: } 36V \cdot 32,5A = R_A \cdot (32,5A)^2 + 930W \text{ vilket ger: } R_A = 0,227\Omega$$

Användning av spänningsekvationen ger:

$$E = U_A - R_A \cdot I_A = 36V - 0,227\Omega \cdot 32,5A = 28,6V$$

$$\text{Och } E = K_2 \Phi \cdot \omega \text{ ger: } K_2 \Phi = \frac{28,6}{2\pi \cdot 1500/50} Vs / rad = 0,182Vs / rad$$

I bilen krävs 5,5 Nm vid 30 km/h.

$$M = K_2 \Phi \cdot I_A \text{ med insatta värden } 5,5Nm = 0,182Nm / A \cdot I_A \text{ ger } I_A = 30A$$

c) Vid 30km/h är  $n = 318$  varv/minut enligt tidigare beräkning.

$$\text{Ger } E = K_2 \Phi \cdot \omega = 0,182 \cdot 2\pi \cdot 318 / 60V = 6,1V$$

$$\text{Och } U_A = R_A \cdot I_A + E = (0,227 \cdot 30 + 6,1)V = 13V$$

d) I a) beräknas mekaniska effekten som är motorns uteffekt till 183 W.

$$\text{Tillförd elektrisk effekt: } P_{in} = U_A \cdot I_A = 13V \cdot 30A = 390W$$

$$\eta(\text{verkningsgrad}) = \frac{183}{390} = 0,46 = 46\%$$

e) Strömmen ger förluster i motorn. Kan momentet reduceras blir strömmen lägre och därmed blir förlusterna lägre. Minskning av momentet genom utväxling ger en motsvarande ökning av varvtalet. Antag att momentet växlas ned med faktor tre och att varvtalet växlas upp med samma faktor.

Vid 30 km/h gäller för motormomentet och för varvtalet:

$$M = 5,5Nm / 3 = 1,8Nm$$

$$n = 3 \cdot 318 \text{ varv/minut} = 954 \text{ varv/minut}$$

$I_A$  minskar med samme faktor som momentet och  $E$  ökar med samma faktor som varvtalet.

$$I_A = 30A/3 = 10A$$

$$E = 6,1V \cdot 3 = 18,3V$$

Nya motorspänningen:

$$U_A = R_A \cdot I_A + E = (0,227 \cdot 10 + 18,3)V = 20,5V$$

$$\text{Nya } \eta(\text{verkningsgrad}) = \frac{183}{20,5 \cdot 10} = 0,89 = 89\%$$

Detta kan förbättras ytterligare genom högre utväxling, men spänningen är begränsad till 36V, vilket i sin tur begränsar utväxlingen. Vi kan även konstatera att strömmen ligger på ca 30% av märkströmmen mot tidigare nästan 100%. Det bör därför gå att välja en betydligt mindre 36V motor.

f) För kondensatorn gäller att laddad energi är  $\frac{1}{2}C \cdot U_C^2$

Energi kan hämtas från batteriet tills spänningen sjunkit till 36V då bränslecellen tar över

$$W_C = \frac{1}{2} \cdot 33(U_{\max}^2 - 36^2) = 16,5 \cdot U_{\max}^2 - 21384J$$

Bilens rörelseenergi är:

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 205 \cdot 8,33^2 = 7118J$$

$$W_C = W_u \text{ vilket ger } 16,5 \cdot U_{\max}^2 - 21384 = 7118 \text{ och } U_{\max} = 41,6 \approx 42V$$

g) Rullmotståndet kräver denna energi för att övervinnas:

$$W_r = F_r \cdot \text{sträcka} = F_r \frac{v_{\max} \cdot T_{acc}}{2} = 10 \frac{8,33 \cdot 30}{2} = 1249J$$

Luftmotståndet är proportionellt mot hastigheten i kvadrat

$F_{luft} = 12 \left( \frac{v}{v_{\max}} \right)^2$  och vi kan beräkna den energi som behövs för att övervinna denna kraft

$$W_{luft} = \int F_{luft} dx = \{ dx = v \cdot dt \} = \int_0^{T_{acc}} F_{luft} v \cdot dt = \left\{ v = \frac{v_{\max}}{T_{acc}} t \text{ och } dv = a \cdot dt = \frac{v_{\max}}{T_{acc}} dt \right\} =$$

$$= \int_0^{v_{\max}} 12 \left( \frac{v}{v_{\max}} \right)^2 \cdot v \frac{T_{acc}}{v_{\max}} dv = 12 \frac{T_{acc}}{v_{\max}^3} \left[ \frac{v^4}{4} \right]_0^{v_{\max}} = 12 \frac{T_{acc}}{v_{\max}^3} \frac{v_{\max}^4}{4} = \frac{12 \cdot v_{\max} \cdot T_{acc}}{4}$$

$$W_{luft} = \frac{12 \cdot 8,33 \cdot 30}{4} = 750 \text{ J}$$

Total energi som behövs för att driva bilen framåt blir

$$W_{tot} = W_k + W_r + W_{luft} = 7118 + 1249 + 750 = 9117 \text{ J}$$

$$W_C = W_{tot} \Rightarrow 16,5 \cdot U_{\max}^2 - 21384 \text{ J} = 9117 \text{ J}$$

$$U_{\max} \approx 43 \text{ V}$$