

# Fö 5 - TMEI01 Elkraftteknik

## Likströmsmaskinen

Christofer Sundström

2 februari 2020

- 1 Repetition
  - Ekvivalent Kretsschema
- 2 Mekaniska Samband
- 3 Driftegenskaper Motordrift
  - Separatmagnetiserad likströmsmotor
  - Shuntmagnetiserad likströmsmotor
  - Seriemagnetiserad likströmsmotor
  - Kompoundmagnetiserad likströmsmotor
  - Startström och Startpådrag
  - Varvtalsstyrning
- 4 Verkningsgrad
- 5 Borstlös DC (BLDC)

# Likströmsmaskinen: Introduktion

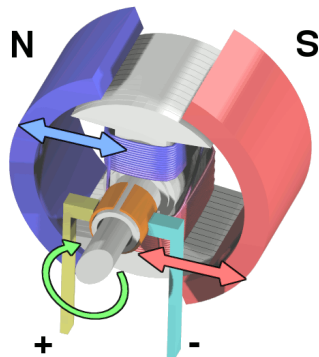
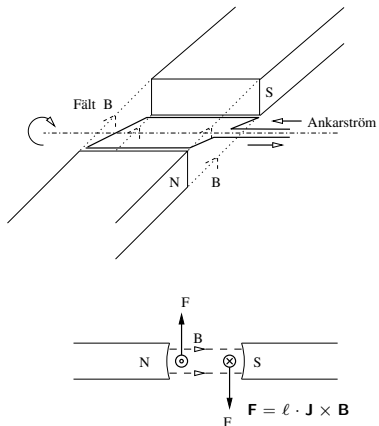
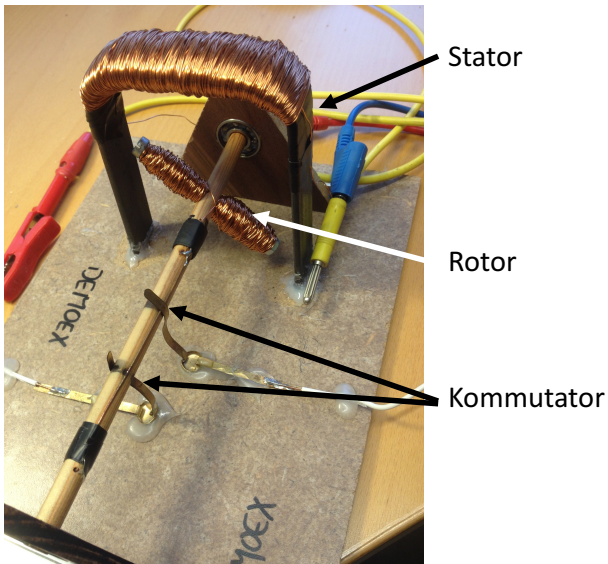


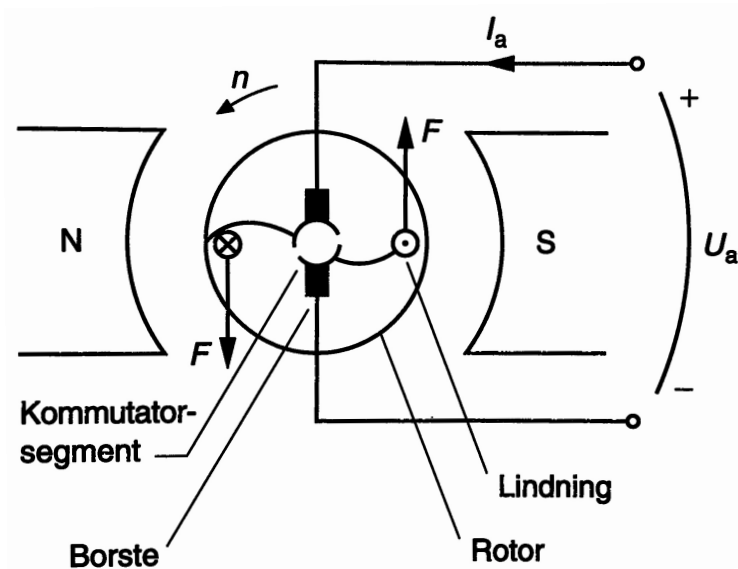
Illustration av DC-motor,  
Wikimedia Commons

# Introduktion, forts.

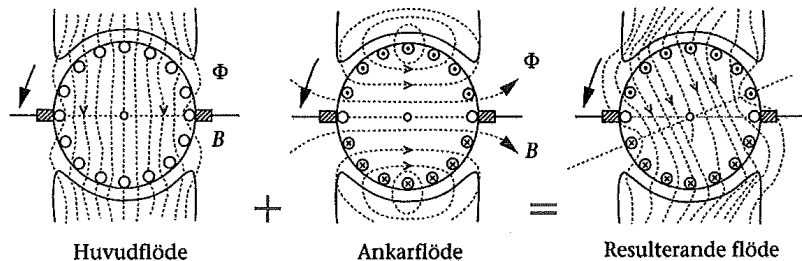


Benämningar för de olika delarna i en DC-motor

# Introduktion: En illustrerande bild



# Huvudflöde och Ankarflöde



Figur 3.6 Magnetiska flöden hos en 2-polig likströmsmaskin.

- Kirchoffs spänningslag ger oss

$$U_a - I_a \cdot R_a - E = 0$$

- Den varvtalsberoende elektromotoriska kraften är

$$E = k_1 \cdot \Phi \cdot n = k_2 \cdot \Phi \cdot \omega$$

$$\omega = n \cdot \frac{2\pi}{60}$$

- Strömmen i magnetiseringsledningen blir

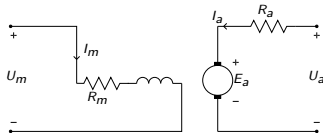
$$I_m = \frac{U_m}{R_m}$$

- Magnetfältet för det linjära området är

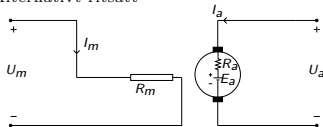
$$\Phi = k \cdot I_m$$

## Varvtalsformeln

$$n = \frac{U_a - I_a \sum_i R_i}{k_1 \cdot \Phi}$$



Alternativt rit sätt



Krettschema

- Det elektrodynamiska vridmomentet,  $M$  (eller ibland  $T$ ), dvs det som uppstår på lindningsaxeln beror på magnetfältet enligt

$$M = k_2 \cdot I_a \cdot \Phi(I_m) \approx \left( \Phi = k \cdot I_m \text{ för det linjära området} \right) \approx \\ \approx k_2 \cdot k \cdot I_a \cdot I_m$$

- Den elektriskt genererade mekaniska effekten,  $P$ , är

$$P = M \cdot \omega = I_a \cdot \underbrace{k_2 \cdot \Phi(I_m)}_E \cdot \omega = E \cdot I_a$$

- Förluster från lagerfriktion och ventilation kallas tomgångsförluster  $P_{F0}$
- Den avgivna effekten  $P_{\text{avg}}$  blir

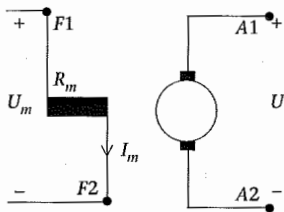
$$P_{\text{avg}} = E \cdot I_a - P_{F0}$$

- Axelmomentet, dvs det moment som lämnar maskinen blir

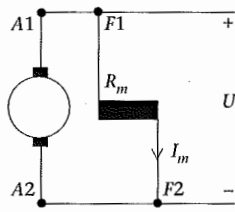
$$M_a = M - \frac{P_{F0}}{\omega}$$



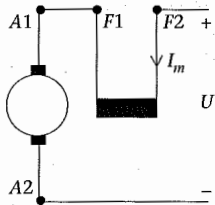
# Repetition Separat, Shunt, Serie och Kompound kopplingar



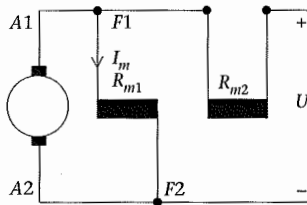
Figur 3.3 a) Separatmagnetisering.



b) Shuntmagnetisering.

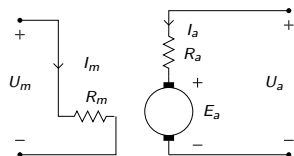


Figur 3.4 a) Seriemagnetisering.



b) Kompoundmagnetisering med shunt-lindning parallellt med ankaret.

# Separatmagnetiserad likströmsmotor



Kretsschema

Driftsekvationer:

$$U_a = E + I_a \cdot R_a$$

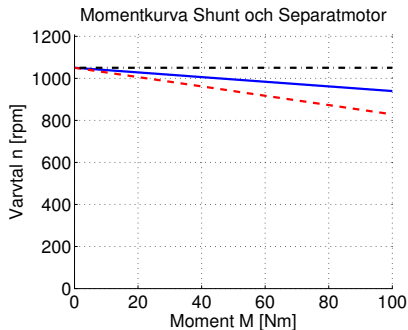
$$E = k_2 \cdot \Phi \cdot \omega = k_1 \cdot \Phi \cdot n$$

$$I_m = \frac{U_m}{R_m}$$

$$\Phi \approx k \cdot I_m$$

$$M = k_2 \cdot \Phi \cdot I_a$$

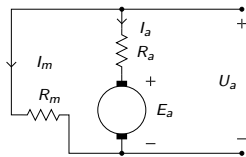
- Typisk momentkurva
- - -  $R_a \cdot 1.25$
- · ·  $R_a = 0$



Momentkurva

- $R_a = 0 \Rightarrow U_a = E \Rightarrow n = \text{konst.}$
- $R_a \neq 0 \Rightarrow E$  minskar med  $M \Rightarrow n = \text{avtar med } M$

# Shuntmagnetiserad likströmotor



Kretsschema

Driftsekvationer:

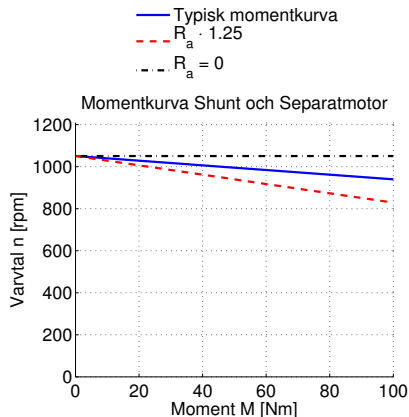
$$U_a = E + I_a \cdot R_a$$

$$E = k_2 \cdot \Phi \cdot \omega = k_1 \cdot \Phi \cdot n$$

$$I_m = \frac{U_a}{R_m}$$

$$\Phi \approx k \cdot I_m$$

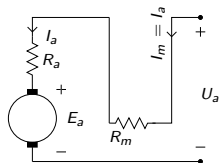
$$M = k_2 \cdot \Phi \cdot I_a$$



Momentkurva

- $R_a = 0 \Rightarrow U_a = E \Rightarrow n = \text{konst.}$
- $R_a \neq 0 \Rightarrow E$  minskar med  $M \Rightarrow n = \text{avtar med } M$

# Seriemagnetiserad likströmsmotor



Krettschema

Driftsekvationer:

$$U_a = E + I_a \cdot (R_m + R_a)$$

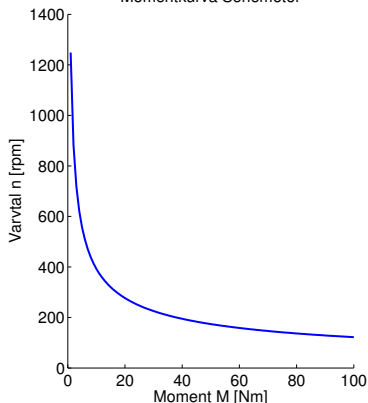
$$E = k_2 \cdot \Phi \cdot \omega = k_1 \cdot \Phi \cdot n$$

$$I_m = I_a$$

$$\Phi \approx k \cdot I_m = k \cdot I_a$$

$$M = k_2 \cdot \Phi \cdot I_a \approx k_2 \cdot k \cdot I_a^2$$

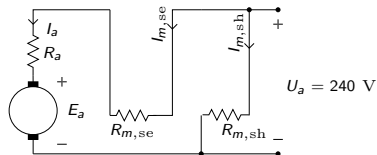
Momentkurva Seriemotor



Momentkurva

- $M \rightarrow 0 \Rightarrow \Phi \rightarrow 0 \Rightarrow n \rightarrow \infty$
- $n \rightarrow 0 \Rightarrow E \rightarrow 0 \Rightarrow I_a \rightarrow I_{a,\max} \Rightarrow M \rightarrow M_{\max}$

# Kompoundmagnetiserad likströmsmotor (Överkurs)



Kretsschema (exempel)

Driftsekvationer:

$$U_a = E + I_a \cdot (R_{m,se} + R_a)$$

$$E = k_2 \cdot \Phi_{\text{Tot}} \cdot \omega = k_1 \cdot \Phi_{\text{Tot}} \cdot n$$

$$I_{m,se} = I_a$$

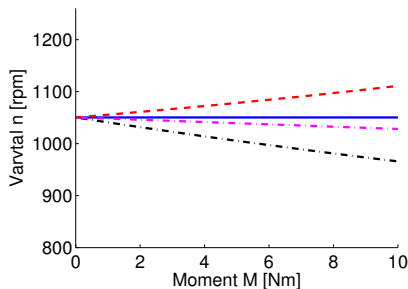
$$I_{m,sh} = \frac{U_a}{R_{m,sh}}$$

$$\Phi_{\text{Tot}} \approx k_{sh} \cdot I_{m,sh} + k_{se} \cdot I_a$$

$$M = k_2 \cdot \Phi_{\text{Tot}} \cdot I_a$$

- Perfekt Motkompounderad
- - - Motkompounderad
- · · Medkompounderad
- · - Shunt

Momentkurva Kompoundmotor



Momentkurva

- Eftersom  $E = k_1 \cdot \Phi \cdot n = 0$  vid start så blir startströmmen hög för alla likströmsmaskiner.
- Startströmmen blir speciellt hög för den seriekopplade varianten eftersom de är designade med lägre lindningsresistanser.
- Lösningen är att koppla på ett s.k. startpådtag som begränsar strömmen i startögonblicket.
- Startpådtaget kopplas ur så snart motorn fått upp farten.

- 1 Seriereglering, ökning av  $\sum R$  i ankarkretsen. Detta minskar spänningen över ankaret och sänker alltså  $E$  och därmed varvtalet.
- 2 Fältreglering (ändring av  $I_m$  och därmed  $\Phi$ ). Minskas fältet så ökar varvtalet enligt varvtalsformeln. Dock måste  $I_a$  öka för att bibehålla momentet.
- 3 Ankarspänningsreglering (ändring av  $U_a$ ). Förutsätter styrbar spänningskälla.

## Ex 3.9, Varvtalsförändring vid ändrad lindningsresistans

En likströms shuntmotor är ansluten till 250 V och drar en ankarström på 20 A vid 1000 rpm. Beräkna motorns varvtal om shuntkretsens resistans ökas med 25 % och om den avgivna effekten anses proportionell mot varvtalet. Ankarresistansen inkl. borstar är  $0.6 \Omega$  och övriga förluster försummas. Maskinen antages omättad och ankarreaktionen försummas.

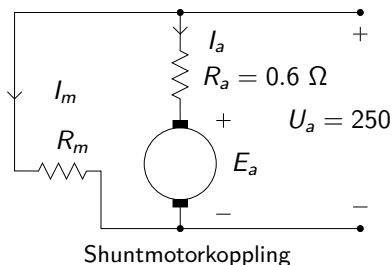


# Ex 3.9, Varvtalsförändring vid ändrad lindningsresistans

**Givet:**  $I_{a,I} = 20$  A vid  $n_I = 1000$  rpm.  
Belastningsmomentet är konstant.  
Mekaniska förluster försummas och motorn är linjär.

**Sökt:** Varvtalet om  $R_m$  ökas 25%

**Rita Figur:**



**Lösning:** Använd  $E = k_1 \cdot \Phi \cdot n$  för de två fallen och lös ut varvtalet. Fall I är före och Fall II efter ändringen.

**Fall I:** Kirchoffs lag ger  $E_I$

$$E_I = U_a - I_{a,I} \cdot R_a = 250 - 20 \cdot 0,6 = 238 \text{ V} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow k_1 \cdot \Phi_I = \frac{E_I}{n_I} = 0,238$$

**Fall II:** Momentet är konstant men flödet har minskat så

$$(1) \quad M_I = M_{II} \Rightarrow k_2 \cdot \Phi_I I_{a,I} = k_2 \cdot \Phi_{II} I_{a,II}$$

$$(2) \quad \Phi = k \cdot I_m = k \cdot \frac{U_m}{R_m} \Rightarrow$$

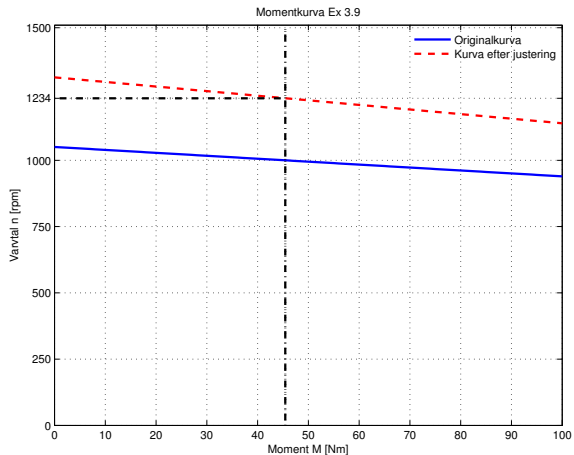
$$\Rightarrow \Phi_{II} = \Phi_I \cdot \frac{R_{m,I}}{R_{m,II}} = 0,8 \cdot \Phi_I$$

$$(1) \& (2) \Rightarrow I_{a,II} = 20 \frac{1}{0,8} = 25 \text{ A}$$

Varvtalet kan nu lösas ut enligt

$$U_a - I_{a,II} \cdot R_a - \overbrace{0,8 \cdot k_1 \cdot \Phi_I}^{k_1 \cdot \Phi_{II}} \cdot n_{II} = 0$$
$$\Rightarrow n_{II} = \frac{250 - 0,6 \cdot 25}{0,8 \cdot 0,238} = 1234 \text{ rpm}$$

# Ex 3.9, Grafisk beskrivning



Förlusterna hos en likströmsmaskin kan skrivas som

$P_{F0}$  Tomgångsförluster, ofta varvtalsberoende

$P_{FB}$  Belastningsförluster,  $P_{FB} = \sum R_a \cdot I_a^2$

$P_{FM}$  Magnetiseringsförluster,  $P_{FM} = R_m \cdot I_m^2 = U_m \cdot I_m$

Verkningsgraden blir därmed

$$\eta = \frac{P_{\text{Avg}}}{P_{\text{In}}} = \frac{P_{\text{In}} - (P_{F0} + P_{FM} + P_{FB})}{P_{\text{In}}}$$

## Ex 3.12, Verkningsgrad och varvtalsberäkning

Vid tomgång och 1000 rpm är en shuntgenerators ankarspänning 250 V. Ankarkretsens resistans inkl. borstar är  $0.5 \Omega$ . Shuntlindningens resistans är  $250 \Omega$ . I tomgång drar maskinen som motor 4 A vid 250 V. Beräkna motorns varvtal och verkningsgrad, när den vid samma spänning drar 40 A som belastad motor. Fältförsvagning på grund av ankarreaktionen uppskattas till 4 %.

## Ex 3.12, Verkningsgrad och varvtalsberäkning

**Givet:** Shuntkopplad elmaskin med  $R_a = 0,5 \Omega$ ,  $R_m = 250 \Omega$ .

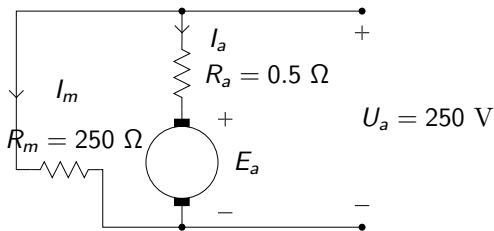
**Fall I:** Olastad generator,  $U_{a,I} = 250 \text{ V}$  vid  $n_I = 1000 \text{ rpm}$ .

**Fall II:** Motor vid tomgång,  $I_{a,II} + I_{m,II} = 4 \text{ A}$ , vid  $U_{a,II} = 250 \text{ V}$ .

**Fall III:** Lastad motor,  $I_{a,III} + I_{m,III} = 40 \text{ A}$ ,  $\Phi_{III} = 0,96\Phi_I$

- Sökt:** a) Varvtal  $n_{III}$  och  
b) Verkningsgrad  $\eta_{III}$

**Lösning:** a) Räkna ut  $k_1 \cdot \Phi_I$  och sätt in i  $U_{a,III} - I_{a,III} \cdot R_a - \underbrace{k_1 \cdot \Phi_{III} \cdot n_{III}}_{E_{III}}$



## Ex 3.12, forts.

**Fall I:** För en shuntgenerator i tomgång så är  $I_a = -I_m$  och  $I_m = \frac{U_a}{R_m} = 1 \text{ A}$ .

Kirchoffs lag ger  $U_{a,I} - I_{a,I} \cdot R_a - \underbrace{k_1 \cdot \Phi_I \cdot n_I}_{E_I} = 0$  så

$$k_1 \cdot \Phi_I = \frac{U_{a,I} - I_{a,I} \cdot R_a}{n_I} = \frac{250 + 0,5 \cdot 1}{1000} = 0,2505$$

**Fall III:** Kirchoffs lag ger  $U_{a,III} - I_{a,III} \cdot R_a - k_1 \cdot \Phi_{III} \cdot n_{III} = 0$ . Vi har dessutom att

$$I_{a,III} = 40 - I_{m,III} = 40 - 1 = 39 \text{ A}$$

$$k_1 \cdot \Phi_{III} = 0,96 \cdot k_1 \cdot \Phi_I = 0,96 \cdot 0,2505$$

Vi har alltså slutligen:

$$n_{III} = \frac{U_{a,III} - I_{a,III} \cdot R_a}{0,96 \cdot k_1 \cdot \Phi_I} = \frac{250 - 39 \cdot 0,5}{0,2505 \cdot 0,96} = 958,5 \text{ rpm}$$

## Ex 3.12, forts.

**Lösning:** b) Räkna ut förlusterna  $P_{F0}$  från Fall II samt belastnings och magnetiseringsförlusterna,  $P_{FB} = R_a \cdot I_a^2$  och  $P_{FM} = U_m \cdot I_m$  för Fall III. Använd sedan verkningsgradsformeln.

Vi har att

$$P_{\text{tillf}} = U_a \cdot I_a = 250 \cdot 40 = 10 \text{ kW}$$

$$I_{a,II} = 4 - I_{m,II} = 4 - 1 = 3 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P_{F0} &= E_{II} \cdot I_{a,II} = (U_a - R_a \cdot I_{a,II}) \cdot I_{a,II} = \\ &= (250 - 0,5 \cdot 3) \cdot 3 = 745,5 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{FB} = R_a \cdot I_a^2 = 39^2 \cdot 0,5 = 760,5 \text{ W}$$

$$P_{FM} = U_m \cdot I_m = 250 \cdot 1 = 250 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{avg}}}{P_{\text{tillf}}} = \frac{P_{\text{tillf}} - P_{F0} - P_{FM} - P_{FK}}{P_{\text{tillf}}} = \\ &= \frac{10^4 - 250 - 745,5 - 760,5}{10^4} = 82,4\% \end{aligned}$$

Notera att  $P_{F0}$  är konstant,  $P_{FM}$  är proportionell mot  $U_m$  och  $P_{FB}$  varierar med belastningen. Därför kan vi använda  $P_{F0}$  och  $P_{FM}$  från Fall I och II i uträkningarna för Fall III.

## Ex 3.20 Kompoundkopplad motor

I en komppoundmotor för 240 V och 80 A är strömvärmeförlusterna i ankaret 2.6 %, i shunten 2 % och i serielindningen 1.2 % av totala ineffekten. Beräkna de olika lindningarnas resistans och motriktade emk:n i ankaret samt det moment som motorn är belastad med om den går på varvtalet 1200 rpm.



## Ex 3.20 Kompoundkopplad motor

**Givet:** En komppoundkopplad motor, med shuntgrenen närmast spänningskällan. Designad för  $U_a = 240V$  och  $I_{Tot} = 80 A$ . Förlusterna i ankarkretsen är 2,6%, i shuntlindningen 2% och i serielindningen 1,2% av totala ineffekten. Driftsfall  $n = 1200$  rpm.

**Sökt:**  $R_{m,sh}$ ,  $R_{m,se}$ ,  $E$ ,  $M_{avg}$

**Lösning:** Räkna ut effekterna och använd sambanden mellan ström och effekt för att få fram resistanserna. Därefter kan kirchoffs lag användas för att räkna ut mot-emk'n.

$$P_{In} = U \cdot I \Rightarrow P_{In} = 240 \cdot 80 = 19200 \text{ W}$$

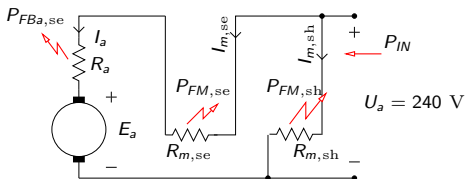
$$P_{FBa} = \frac{2,6}{100} P_{In} = 192 \cdot 2,6 = 499,2 \text{ W}$$

$$P_{FM,sh} = \frac{2}{100} P_{In} = 385 \text{ W}$$

$$P_{FM,se} = \frac{1,2}{100} P_{In} = 230,4 \text{ W}$$

## Ex 3.20, forts.

Fortsätt med att räkna ut strömmarna och sedan resistanserna från effekterna



Kretsschema med utsatta effekter för komppoundkopplingen

$$P_{FM,sh} = U_a \cdot I_{m,sh} \Rightarrow I_{m,sh} = \frac{385}{240} = 1,6 \text{ A}$$

$$\Rightarrow R_{m,sh} = \frac{U}{I_{m,sh}} = \frac{240}{1,6} = 150 \Omega$$

$$I_a = I_{Tot} - I_{m,sh} \Rightarrow I_a = 78,4 \text{ A}$$

$$\Rightarrow R_{m,se} = \frac{P_{Fm,se}}{I_a^2} = 37,4 \text{ m}\Omega$$

$$\Rightarrow R_a = \frac{P_{Fa,se}}{I_a^2} = 81,2 \text{ m}\Omega$$

Kirchoffs spänningslag ger nu  $E$  enligt

$$0 = U_a - R_{m,se} \cdot I_a - R_a \cdot I_a - E$$

$$\Rightarrow E = U_a - R_{m,se} \cdot I_a - R_a \cdot I_a = 230,7 \text{ V}$$

Slutligen kan då momentet räknas ut från effekten  $P = I_a \cdot E = 18087 \text{ W}$

$$P = M \cdot \omega$$

$$\Rightarrow M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{n} \frac{60}{2\pi} = 144 \text{ Nm}$$

- Motorn är en i princip Ut-och-In-vänd DC-motor med elektronisk styrning.
- Rotorn består av permanentmagneter istället för statorn.
- Motors position bestämmer vilka lindningar som leder ström precis som en vanlig likströmsmaskin.
- Motortypen är extremt lik en Synkronmaskin för växelström. Skillnaden är att den matas med fyrkantsvåg istället för sinus.
- En annan skillnad är att vi låter positionen bestämma switch-tiden istället för att ställa ut en på förhand bestämd våg.

### Styrning av Borstlös DC

När kommuteringen sköts av positionen så gäller samma ekvationer som för vanliga likströmsmaskiner.