

Fö 7 - TSFS11 Energitekniska system

Likströmsmaskinen

Christofer Sundström

23 april 2018

- 1 Likströmsmaskinen
 - Introduktion
 - Ekvivalent Kretsschema
- 2 Elektriska och mekaniska samband
- 3 Driftegenskaper Motordrift
 - Separatmagnetiserad likströmsmotor
 - Shuntmagnetiserad likströmsmotor
 - Seriemagnetiserad likströmsmotor
 - Kompoundmagnetiserad likströmsmotor
 - Startström och Startpådrag
- 4 Verkningsgrad
- 5 Borstlös DC

Likströmsmaskinen: Introduktion

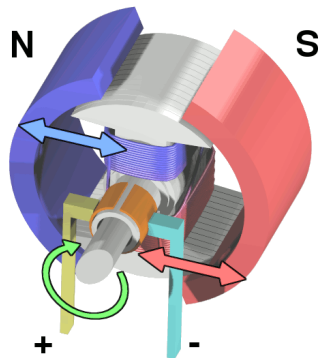
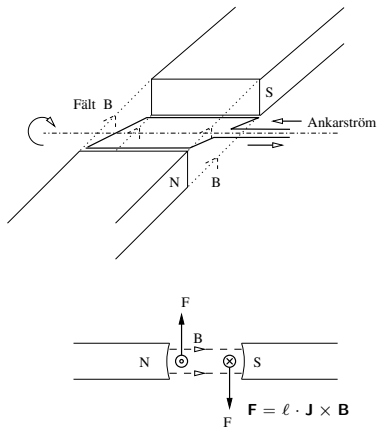
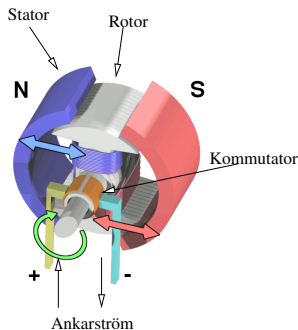


Illustration av DC-motor,
Wikimedia Commons

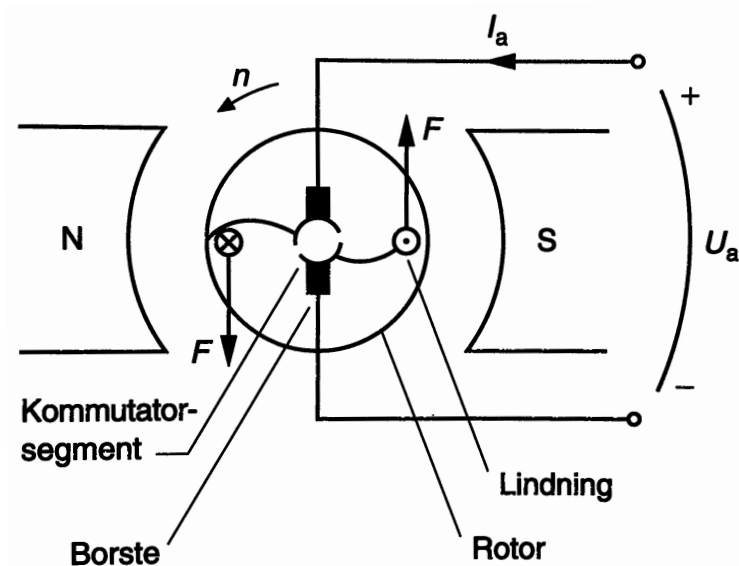
Introduktion, forts.

- En **likströmsmaskin** kan arbeta **både** som motor och generator.
- Högt startmoment, snabb acceleration, enkel att styra
- För en likströmsmaskin är ankare och rotor samma sak. (Ankarlindningen är alltid den som är AC ström i)

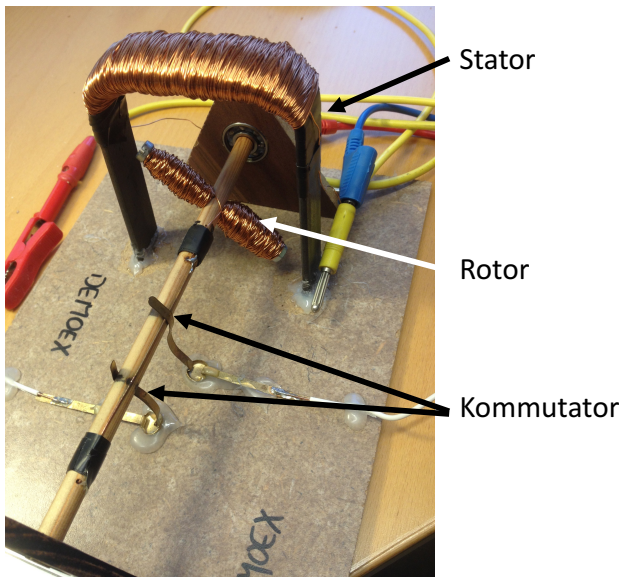


Figur: Benämningar för de olika delarna i en DC-motor

Introduktion: En illustrerande bild



Introduktion, forts.

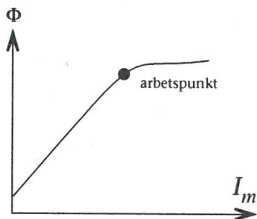


Benämningar för de olika delarna i en DC-motor

Huvudflöde

- Flödet från statorlindningen, eller fältlindningen, kallas **huvudflöde**

-> Huvudflödet bestäms i princip av magnetiseringsströmmen I_m



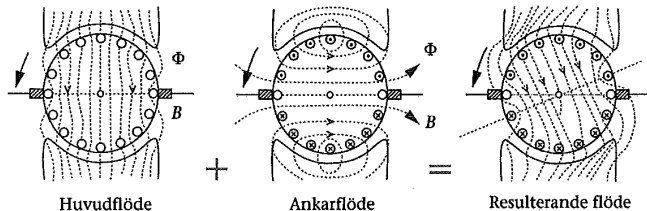
Figur 3.5 a) Magnetiseringskurva.

- Flödet genom maskinen kallas Φ och vi har alltså i princip

$$\Phi(I_m) = f(I_m) = / \text{ för det linjära området} / \approx k \cdot I_m$$

Huvudflöde och Ankarflöde

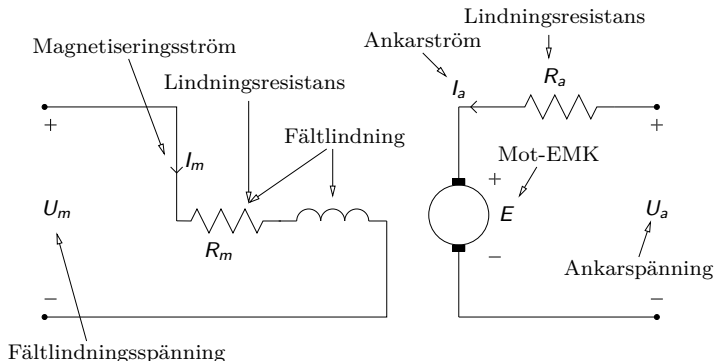
- Ankarströmmen ger upphov till ett tvärs-riktat ankarflöde som påverkar totala flödet för stora ankarströmmar.



Figur 3.6 Magnetiska flöden hos en 2-polig likströmsmaskin.

Figur: Skiss av distorsion av huvudflöde p.g.a. ankarflöde. När ankarflödet ökar p.g.a. ökad belastning så distorderas fältet allt mer. Detta leder till magnetisk mättning i de delar som utsätts för störst flöden och därmed fältförsvagning.

Ekvivalent Krettschema



Figur: Ekvivalent krettschema för DC-maskin samt benämningar på de olika komponenterna. Magnetiseringsstorheterna kallas ibland för fältstorheter, dvs I_f , U_f , R_f o.s.v.

Elektromotorisk kraft

Vid rotation skär ankarledarna luftgapets magnetiska flödeslinjer. I varje ledare induceras en emk:

$$e = B_{med}lv$$

där $v = 2\pi r \frac{n}{60}$ och $B_{med} = \frac{\phi_{med}}{A}$, med n som rotationsvarvtalet och $A = \frac{2\pi rl}{p}$ är rotorytan per pol. Om N ledare serikopplas fås

$$E = NB_{med}lv$$

Emk:n kan då skrivas som

$$E = \frac{pN}{60} \phi_{med} n$$

där p är antalet magnetiska poler och N antalet ankarledare på rotorn.

För en viss maskin blir då $E = k_1 \phi n$, med $k_1 = \frac{pN}{60}$
(konstruktionskonstant)

Elektriska och magnetiska samband

- Kirchoffs spänningslag ger oss

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

- Den varvtalsberoende elektromotoriska kraften är

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

- Strömmen i magnetiseringsledningen blir

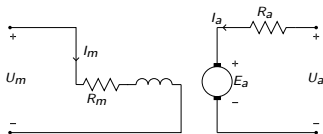
$$I_m = \frac{U_m}{R_m}$$

- Magnetfältet för det linjära området är

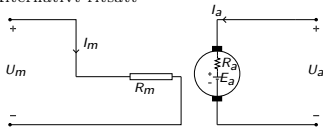
$$\Phi = k \cdot I_m$$

Varvtalsformeln

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



Alternativt ritsätt



Kretsschema

Mekaniska Samband

- 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

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

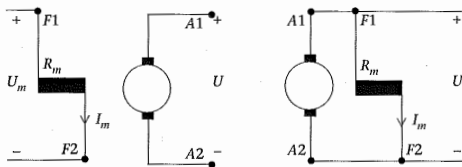
- Förluster från lagerfriktion och ventilation kallas tomgångsförluster P_{F0}
- Den avgivna effekten P_{avg} blir

$$P_{avg} = E_a \cdot I_a - P_{F0}$$

- Axelmomentet, dvs det moment som lämnar maskinen blir

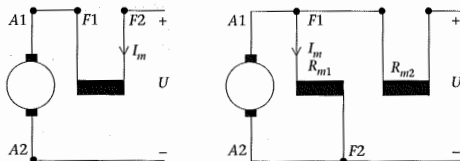
$$M_a = M - \frac{P_{F0}}{\omega}$$

Separat, Shunt, Serie och Kompond kopplingar



Figur 3.3 a) Separatmagnetisering.

b) Shuntmagnetisering.

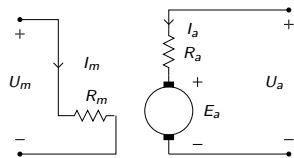


Figur 3.4 a) Seriemagnetisering.

b) Kompondmagnetisering med shuntlindning parallellt med ankaret.

Figur: Olika kopplingsvarianter för lindningarna hos en DC-maskin. Den separatmagnetiserade har samma driftsegenskaper som en permanentmagnetiserad eftersom strömmen som genererar huvudflödet är helt frikopplad från ankarkretsen.

Separatmagnetiserad likströmsmotor



Krettschema

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

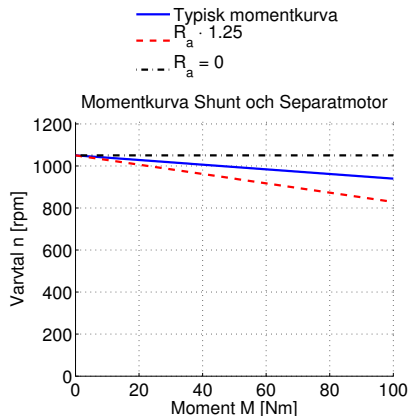
$$E_a = k_2 \cdot \Phi \cdot \omega = k_1 \cdot \Phi \cdot n$$

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

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

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

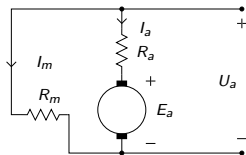
Driftsekvationer



Momentkurva

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

Shuntmagnetiserad likströmotor



Krettschema

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

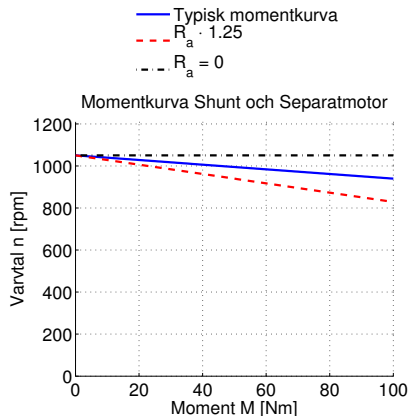
$$E_a = k_2 \cdot \Phi \cdot \omega = k_1 \cdot \Phi \cdot n$$

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

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

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

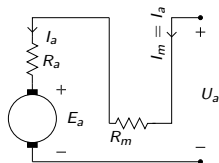
Driftsekvationer



Momentkurva

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

Seriemagnetiserad likströmsmotor



Krettschema

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

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

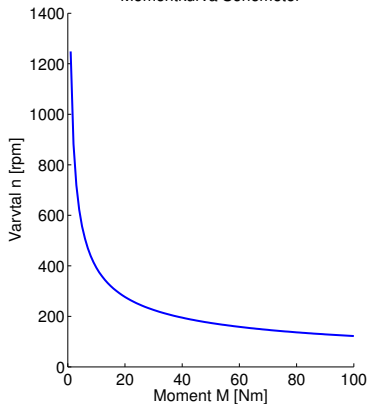
$$I_m = I_a$$

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

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

Driftsekvationer

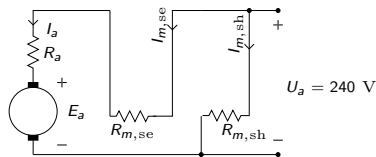
Momentkurva Seriemotor



Momentkurva

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

Kompoundmagnetiserad likströmsmotor



Krettschema, Long-Shunt

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

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

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

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

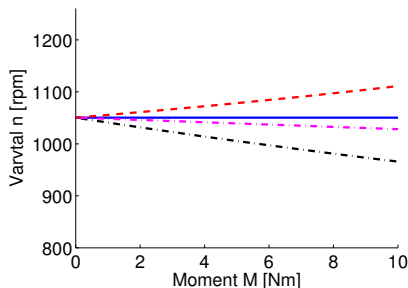
$$\Phi_{\text{Tot}} \approx k_{sh} \cdot I_{m,sh} + k_{se} \cdot I_a$$

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

Driftsekvationer

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

Momentkurva Kompoundmotor



Momentkurva

Startström och Startpådrag

- 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. startpådrag som begränsar strömmen i startögonblicket.
- Startpådraget kopplas ur så snart motorn fått upp farten.

Varvtalsstyrning av likströmsmotor

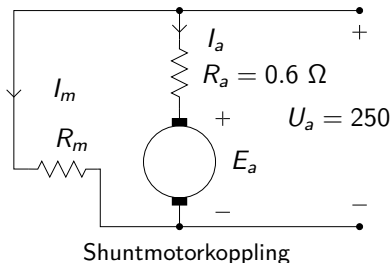
- 1 Seriereglering, ökning av $\sum R$ i ankarkretsen. Detta minskar spänningen över ankaret och sänker alltså E_a och därmed varvtalet.
- 2 Fältreglering (ändring av I_m och därmed Φ). Minskas fältet så ökar varvtalet enligt varvtalsformeln. Dock måste I_a öka för att bibehålla momentet.
- 3 Ankarspänningsreglering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

Ex 2: 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 $E_a = k_1 \cdot \Phi \cdot n$ för de två fallen och lös ut varvtalet. Fall I är före och Fall II efter ändringen.

Fall I: Kirchoffs lag ger $E_{a,I}$

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

$$\Rightarrow k_1 \cdot \Phi_I = \frac{E_{a,I}}{n_I} = 0,238$$

Fall II: Momentet är konstant men flödet har minskat så

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

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

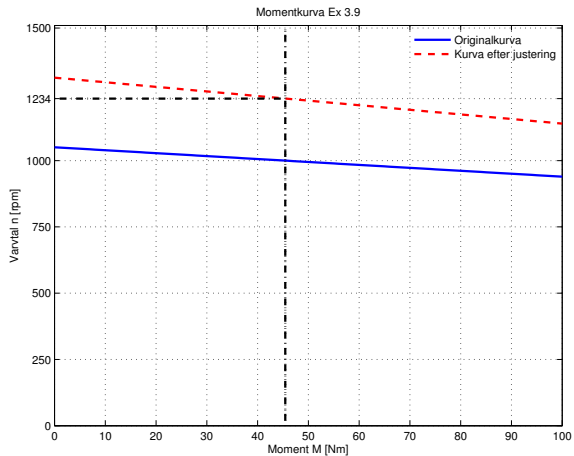
$$\Rightarrow \Phi_{II} = \Phi_I \cdot \frac{R_{m,I}}{R_{m,II}} = 0,8 \cdot \Phi_I$$

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

Varvtalet kan nu lösas ut enligt

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

Ex 2, 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, Verkningsgrad och varvtalsberäkning

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

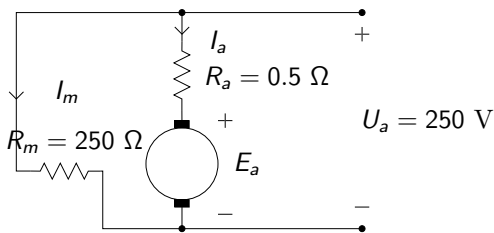
Fall I: Olastad generator, $U_{a,I} = 250 \text{ V}$ vid $n_I = 1000 \text{ rpm}$.

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 η_{III}

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



Ex 3, 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 $U_{a,I} - I_{a,I} \cdot R_a - \underbrace{k_1 \cdot \Phi_I \cdot n_I}_{E_{a,I}} = 0$ 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, 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.

- Motorn är en i princip Ut-och-In-vänd DC-motor med elektronisk styrning.
- Rotorn består av permanentmagneter istället för statorn.
- Motorns 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.