

TSFS04, Elektriska drivsystem, 6 hp

Föreläsning 6 - Styrning av likströmsmotorn

Mattias Krysander

Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet
matkr@isy.liu.se

2011-02-08

Översikt

För att varvtalsreglera en likströmsmotor behöver vi kunna variera strömmen eller spänningen.

Då effekten tas från ett växelspanningsnät måste först en omvandling ske till likström/likspänning.

Idag ska vi studera styrning av likströmsmotorer samt översiktligt beskriva funktionen i den kraftelektronik som krävs för att realisera effektmatningen.

Introduktion till kraftelektronik

Kraftelektroniskt styrda elmotorer används inom traktionstillämpningar, fläktar, pumphar, industrirobotar, valsverk mm

De viktigaste komponenterna inom kraftelektroniken är halvledare som fungerar som "elektroniska strömbrytare". Ex: diod, tyristor och transistorer.

Dagens föreläsning

1. Strömventiler
 - ▶ dioder
 - ▶ tyristorer
2. Likriktare
 - ▶ diodlikriktare: halvåsl riktare
 - ▶ faststyrd halvåsl riktare
3. Varvtalsstyrning av likströmsmotorn
 - ▶ seriereglering
 - ▶ ankarspänningsreglering
 - ▶ fältreglering

— Strömventiler —

Strömventiler

Gemensamt för alla kraftelektronik är användning av strömventiler.

En strömventil har idealt två lägen på och av.

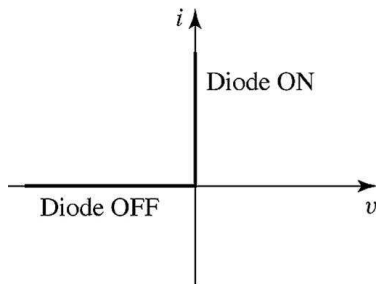
Strömventilen har idealt ingen resistans då den är påslagen och blockerar helt strömmen när den är avslagen.

Strömventilerna kan delas in i

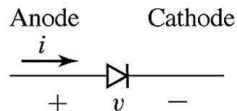
- ▶ ostyrda: dioder
- ▶ styrda: thyristorer, transistorer (MOSFET,IGBT)

Dioden

Dioden är en enkel ströventil med en ledriktning och en spärrriktning.



(a)



(b)

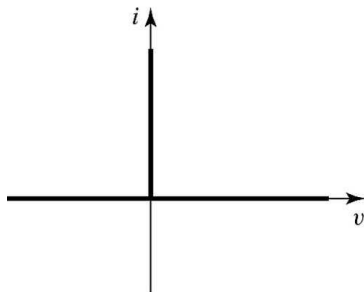
(a) Ideal spänning-strömkaraktäristik.

(b) Diodens symbol.

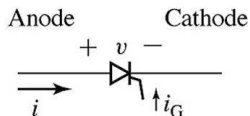
Tyristorn

Tyristorn är en strömstyrd strömventil.

Tyristorn har en tredje ingång som kallas gate. Likt dioden kan tyristorn bara leda ström från anoden till katoden. I motsats till dioden, öppnas ventilen genom en ström in i gaten. Tyristorn är öppen till dess att strömmen blir 0.



(a)



(b)

(a) Ideal spänning-strömkaraktäristik.

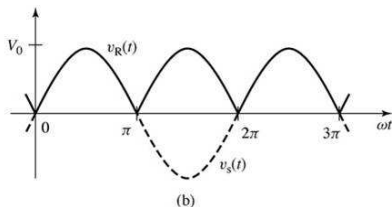
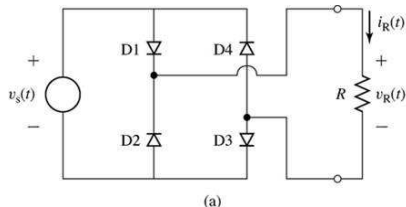
(b) Tyristorns symbol.

— Likriktare —

Likriktare

- ▶ Diodlikriktare: halvågslikriktare
- ▶ Fastyrd halvågslikriktare

Diodlikriktare: halvågsl rikriktare



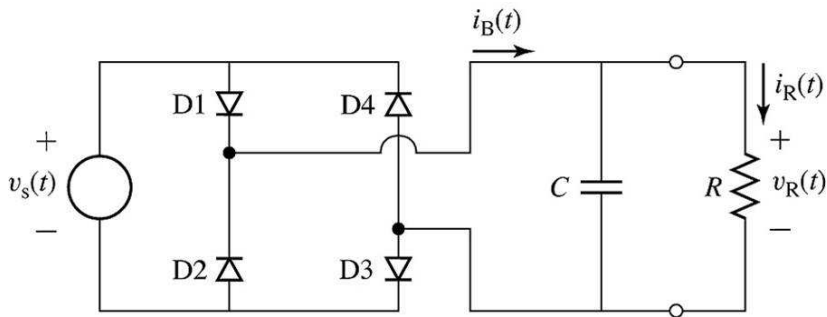
Idealt beteende:

- ▶ $v_s(t) = V_0 \sin \omega t$
- ▶ $v_s(t) > 0 \Rightarrow$ D1 och D3 på $\Rightarrow v_R(t) = v_s(t)$
- ▶ $v_s(t) < 0 \Rightarrow$ D2 och D4 på $\Rightarrow v_R(t) = -v_s(t)$
- ▶ $v_R(t) = |v_s(t)|$
- ▶ $V_{dc} = \frac{2}{\pi} V_0$

Spänningen är långt ifrån konstant vilket oftast är önskvärt.

Spänningsstyvt filter

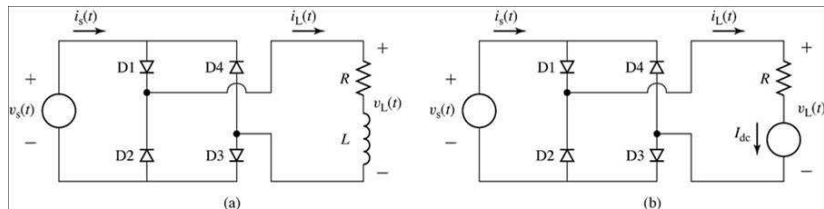
Spänningen stabiliseras genom att koppla in en kondensator över lasten enligt:



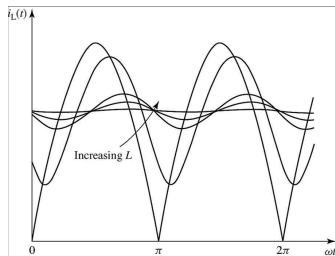
Om tidskonstanten RC är stor jmf med v_s :s periodtid blir v_R relativt konstant.

Strömstabilisering med induktans

Både då lasten är induktiv eller om en induktans är del av likriktaren kan strömmen genom lasten approximeras med en ideal strömkälla, se fig (b), då induktansen är stor.

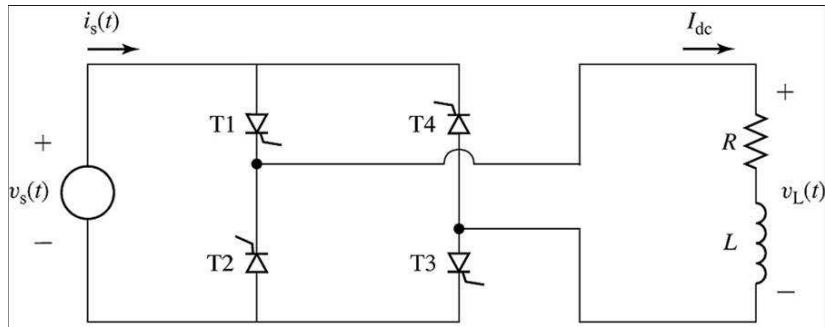


Strömmens stabilisering för växande induktans:



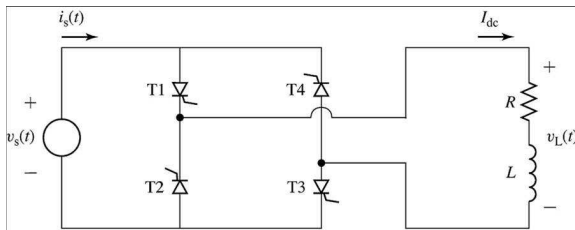
Fasstyrd halvågsl riktare

Betrakta samma krets som förut, men nu med styrbara ventiler.



Fasstyrd halvågslikriktare - översikt

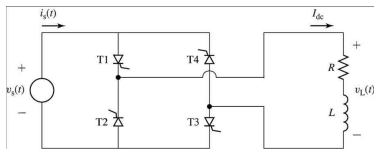
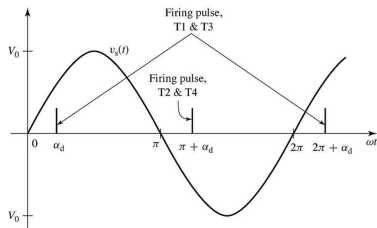
- ▶ Beskriva hur ventilerna är på och avslagna under en period.
- ▶ Visa strömmen $i_s(t)$ som lasten drar från spänningskällan.
- ▶ Teckna spänningen $v_L(t)$ över lasten.
- ▶ Teckna likspänningen över resistorn V_{dc} .
- ▶ Teckna likströmmen genom lasten I_{dc} .



Fasstyrd halvågsl riktare - ventilposition

Antag att L är så stor jmf med R att strömmen genom lasten approximativt kan antas vara konstant I_{dc} .

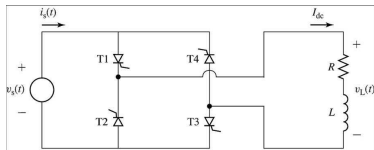
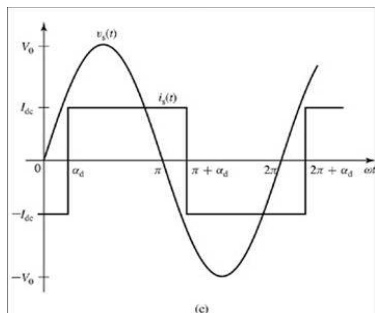
- ▶ T1 & T3 slås på vid α_d .
- ▶ Notera att T2 & T4 är av till $\pi + \alpha_d$.
- ▶ För att dra en konstant ström I_{dc} måste alltså T1 & T3 vara påslagna till det att T2 & T4 slås på.



Fastyrd halvågsl riktare - matningsströmmen

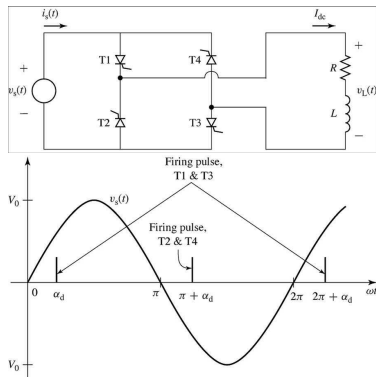
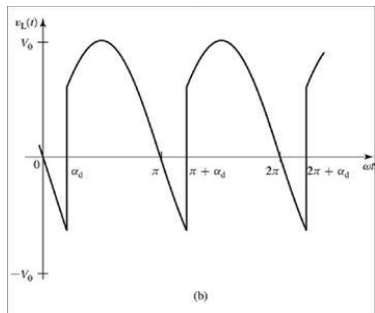
- ▶ T1 & T3 är påslagna i $[\alpha_d, \alpha_d + \pi] =: \mathcal{I}_1$
 $\Rightarrow i_s(t) = I_{dc}$, för $\omega t \in \mathcal{I}_1$
- ▶ T2 & T4 är påslagna i $[\alpha_d + \pi, \alpha_d + 2\pi] =: \mathcal{I}_2$
 $\Rightarrow i_s(t) = -I_{dc}$, för $\omega t \in \mathcal{I}_2$

Matningsströmmen blir en fyrkantsvåg med amplitud I_{dc} och fasförsjuten α_d radianer.



Fastyrd halvågsl riktkare - spänningen över lasten

- ▶ T1 & T3 är påslagna i $[\alpha_d, \alpha_d + \pi]$
 $\Rightarrow v_L(t) = v_s(t)$
- ▶ T2 & T4 är påslagna i $[\alpha_d + \pi, \alpha_d + 2\pi]$
 $\Rightarrow v_L(t) = -v_s(t)$



Fasstyrd halvågsl riktare - likspänningen över resistorn

Medelspänningen över induktorn är 0 då strömmen är periodisk ty:

$$v = L \frac{di}{dt} \Rightarrow$$

$$i(t + T) - i(t) = 0 = \frac{1}{L} \int_t^{t+T} v(t) dt \Rightarrow$$

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(t) dt = 0$$

Likspänningen över resistorn är lika med medelspänningen över lasten $V_{dc} = \bar{v}_L$ i detta fall ty

$$\bar{v}_L = \bar{V}_{dc} + \bar{v} = V_{dc}$$

Likspänningen över resistorn kan alltså beräknas som:

$$V_{dc} = \frac{V_0}{\pi} \int_{\alpha_d}^{\alpha_d + \pi} \sin x dx = \frac{2V_0}{\pi} \cos \alpha_d \text{ där } 0 \leq \alpha_d \leq \pi$$

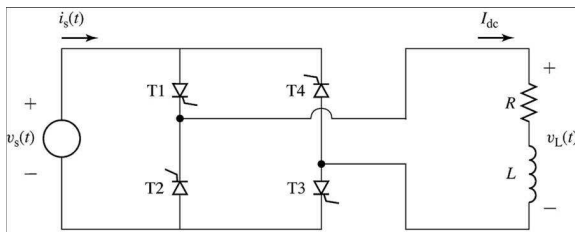
Fastyrd halvåglikriktare - likströmmen genom lasten

Likspänningen över resistorn kan alltså beräknas som:

$$V_{dc} = \frac{2V_0}{\pi} \cos \alpha_d \text{ där } 0 \leq \alpha_d \leq \pi$$

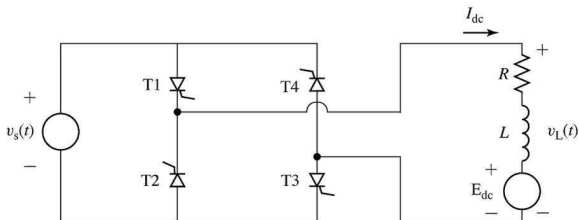
Strömmen genom lasten är:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{2V_0}{R\pi} \cos \alpha_d \text{ där } 0 \leq \alpha_d \leq \pi$$



Motorexempel

Givet: En pm dc-motor styrs mha en fasstyrd halvågslirikriktare:



Likritaren matas med en växelspänning på 35V och 60Hz. DC-motorns ankarlindningsresistans är R och induktans L där L/R är så pass stor att det går att anta att I_{dc} är konstant för fix tändvinkel α_d . Tomgångshastigheten är $n_0 = 8000$ varv/min då ankarlindningen matas med 50V. Tomgångsmomentet får antas försumbart.

Sökt: Beräkna tomgångsfarten n som funktion av styrvinkeln α_d .

Motorexempel

Lösning: Varvtalet ges av

$$n = n_0 \frac{E_{dc}}{E_{dc,0}}$$

Eftersom tomgångsmomentet är litet, dvs

$$T = K_m I_{dc} \approx 0 \quad \Rightarrow \quad I_{dc} \approx 0 \quad \Rightarrow \quad E_{dc} \approx V_{dc}$$

där V_{dc} betecknar likspänningen över ankarlindningen. Med denna approximation erhålls

$$\begin{aligned} n &= n_0 \frac{V_{dc}}{V_{dc,0}} = \frac{2V_0 n_0}{V_{dc,0} \pi} \cos \alpha_d = \frac{2\sqrt{2} \cdot 35 \cdot 8000}{50\pi} \cos \alpha_d = \\ &= 5040 \cos \alpha_d \text{ varv/min} \quad (0 \leq \alpha_d \leq \pi/2) \end{aligned}$$

För $\alpha_d \geq \pi/2$ kommer bryggan att vara stängd.

Elementär hastighetsreglering av
likströmsmotorn

Elementär hastighetsreglering av likströmsmotorn

Denna del behandlar styrning av likströmsmotorn under stationär drift. Minns:

$$V_a = E_a + I_a R_a \qquad E_a = K_a \Phi_d \omega_m$$

Elimination av E_a ger vinkelhastigheten:

$$\omega_m = \frac{V_a - I_a R_a}{K_a \Phi_d}$$

Tre metoder för hastighetsstyrning:

- ▶ Seriereglering: styra resistansen R_a i ankarlindningen med en seriekopplad potentiometer.
- ▶ Ankarspänningsreglering (rotorstyrning): styra ankarspänningen V_a
- ▶ Fältstyrning: styra magnetiseringen Φ_d

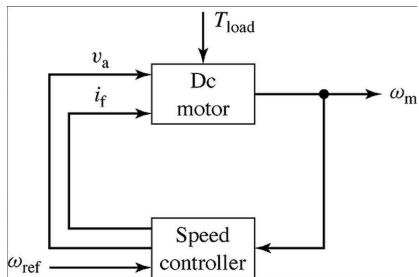
Dessa tre fall skall vi studera närmre.

Seriereglering

- ▶ Minska hastigheten genom att införa ett variabelt motstånd i serie med ankarlindningen.
- ▶ Kraftigt beroende mellan moment och varvtal.
- ▶ Stor effektförlust över resistansen, speciellt vid låga varvtal (E_a liten).
- ▶ Billig i tillverkning.
- ▶ Används oftast i billiga seriemotorer med kortvarig drift i dellast.

Varvtalsstyrning

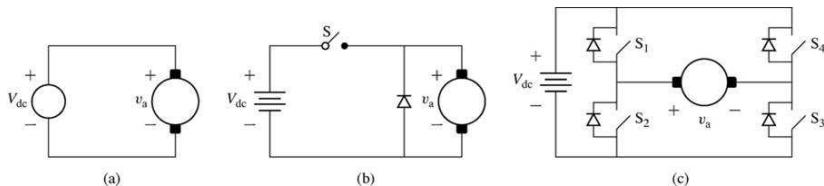
Blockdiagram för hastighetsreglering av en likströmsmotor.



Regulatorn innehåller både reglerlogik och kraftelektronik.

Ankarspänningsreglering

Tre typiska konfigurationer för ankarspänningsreglering:



- (a) Variabel likspänningsmatning genererad av faststyrd halvåglikriktare med kapacitivt slutsteg.
- (b) Konstant spänningskälla (genererad av en diodlikriktare med kapacitivt slutsteg) + pulsbreddsmodulering. $V_a = DV_{dc}$
- (c) Konstant spänningskälla + H-brygga + pwm. Möjliggör polaritetsväxling: $-V_{dc} \leq V_a \leq V_{dc}$.
 S_1 pulsas, S_2 och S_4 avslagna, S_3 påslagen ger $V_a \geq 0$.
 S_4 pulsas, S_1 och S_3 avslagna, S_2 påslagen ger $V_a \leq 0$.

Ankarspänningsreglering - varvtal, maxmoment

En trevlig regleregenskap är att ankarspänningen är proportionell mot hastigheten då huvudflödet är konstant enligt:

$$V_a \approx E_a = K_a \Phi_d \omega_m$$

Påverkan av ett moment ses i

$$\omega_m = \frac{1}{K_a \Phi_d} \left(V_a - \frac{R_a}{K_a \Phi_d} T_{\text{load}} \right)$$

- ▶ Vinkelhastigheten sjunker linjärt med belastningen.
- ▶ Vinkelhastigheten ökar linjärt med ankarspänningen.
- ▶ För att hålla fix vinkelhastighet så måste spänningen ökas affint med ökad belastning $V_a = k T_{\text{load}} + C$ där k och C är konstanter.

Maxmomentet är konstant för olika varvtal ω_m ty

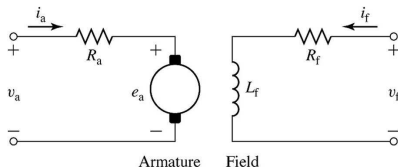
$$T_{\text{load}} = K_a \Phi_d I_{a,\text{max}} = \text{konst.}$$

Fältreglering

Fältströmmen kan styras antingen genom att

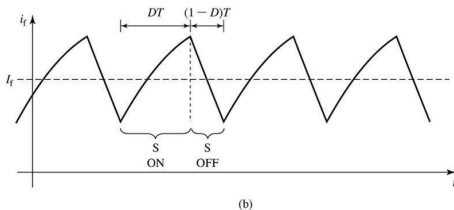
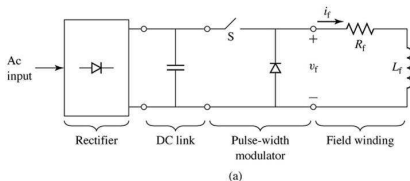
- ▶ seriekoppla fältlindningen med en potentiometer eller
- ▶ genom att styra spänningen över fältlindningen mha kraftelektronik.

Syftet med fältstyrning är att höja motorns vinkelhastighet vid reducerat belastningsmoment.



Fältreglering via spänningsreglering

Exempel på lösning: Likriktare, spänningsstyvt filter som genererar V_{dc} , pulsbreddsmodulerad likspänning V_f .



Strömmen blir

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} = D \frac{V_{dc}}{R_f}$$

Fältreglering - varvtal

Antag konstant moment T_{load} , samt betrakta en separatmagnetiserad eller shuntmagnetiserad motor.

Inducerad spänning och moment i det omättade fallet tecknas som

$$E_a = K_f I_f \omega_m \qquad T_{\text{load}} = K_f I_f I_a$$

Varvtalet som funktion av I_f blir:

$$\omega_m = \frac{E_a}{K_f I_f} = \frac{V_a - I_a R_a}{K_f I_f} = \frac{1}{K_f I_f} \left(V_a - \frac{R_a}{K_f I_f} T_{\text{load}} \right)$$

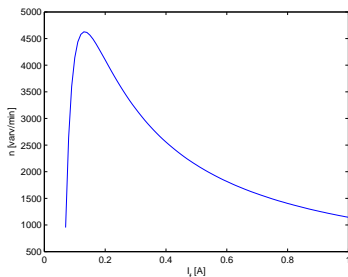
Fältreglering - varvtal,maxeffekt

Varvtalet som funktion av I_f är:

$$\omega_m = \frac{V_a - \frac{T_{\text{load}}}{K_f I_f} R_a}{K_f I_f}$$

$I_a R_a$ oftast liten $\Rightarrow \frac{d\omega_m}{dI_f} < 0$

- ▶ Lägsta hastigheten begränsas av maximal fältström
- ▶ Högsta hastigheten begränsas av kommutering, fältförsvagning, etc ($I_a = T_{\text{load}}/(K_f I_f)$)



Fältstyrning ger drivsystem med konstant maxeffekt ty

$$P = E_a I_{a,\text{max}} \approx V_a I_{a,\text{max}} = \text{konstant.}$$

Fältreglering - exempel

Givet: En shuntmagnetiserad motor har $R_a = 47\text{ m}\Omega$ och $R_f = 187\Omega$. Med $V_a = 240\text{ V}$ och $I_{f,0} = 0.34\text{ A}$, är tomgångsfarten $n_0 = 3600\text{ varv/min}$. Antag att

$$P_{\text{load}} = 22.4 \left(\frac{n}{n_0} \right)^3$$

där n är varvtalet. En potentiometer i serie med shuntlindningen kopplas in för att styra farten.

Sökt: Om V_a är konstant och farten skall kunna regleras så att $n_1 = 1800 \leq n \leq 3600 = n_2$ varv/min, vilket resistansintervall måste potentiometern kunna ställa ut.

Fältreglering - exempel

Lösning:

$$P_{\text{load},i} = 22.4 \left(\frac{\omega_{m,i}}{\omega_{m,0}} \right)^3, \text{ där} \quad \omega_{m,i} = \frac{\pi}{30} n_i$$

$$T_{\text{load},i} = P_{\text{load},i} / \omega_{m,i}$$

$I_{f,i}$ kan lösas ut ur

$$\omega_{m,i} = \frac{V_a - \frac{T_{\text{load},i}}{K_f I_{f,i}} R_a}{K_f I_{f,i}}$$

om K_f är känd. K_f beräknas ur tomgångsdata där $E_a \approx V_a$ ger att

$$K_f = \frac{V_a}{I_{f,0} \omega_{m,0}}$$

$$I_{f,i} = \frac{V_a}{2K_f \omega_{m,i}} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\omega_{m,i} T_{\text{load},i}}{V_a^2}} \right)$$

R_a litet ger $I_{f,i} \approx V_a / (K_f \omega_{m,i})$, dvs + ska användas.

Fältreglering - exempel, fortsättning

De sökta resistanserna ges av:

$$R_i = \frac{V_a}{I_{f,i}} - R_f$$

Numeriska värden:

i	n_i [varv/min]	$T_{\text{load},i}$ [Nm]	$I_{f,i}$ [A]	R_i [Ω]
1	1800	14.9	0.678	167
2	3600	59.4	0.334	532

Svar: Potentiometern måste kunna varieras mellan 167-532 Ω .

Fältreglering - exempel, fortsättning

Sökt: Samma uppgift som förut fast nu styrning med pulsbreddsmodulering. Mellan vilka värden ska D varieras för att uppnå samma fartvariation.

Lösning: Användning av

$$I_{f,i} = D_i \frac{V_a}{R_f}$$

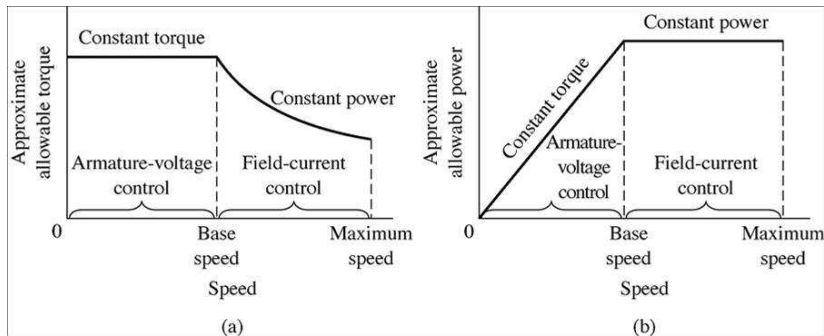
där $I_{f,i}$ är beräknade i förra uppgiften ger

$$0.334 \leq D \frac{240}{187} \leq 0.678 \quad \Leftrightarrow \quad 0.26 \leq D \leq 0.53$$

vilket är det sökta svaret.

Styrning för att åstadkomma maximalt varvtalsområde

Kombinerad ankarspännings- samt fält-reglering ger maximalt varvtalsområde.



- ▶ För att öka farten ovanför den nominella hastigheten minskas fältströmmen. $\omega_{\max} \approx 4\omega_b$
- ▶ För att sänka farten minskas ankarspänningen. $\omega_{\min} \approx \omega_b/10$

Maximalt varvtalsområde: max/min 40:1.

Sammanfattning: styrning av likströmsmotorer

Hastighetsreglering

- ▶ Tre typer av styrning
 1. seriereglering, styr R_a
 2. ankarspänningsreglering, styr V_a
 3. fältreglering, styr $\Phi_d(I_f)$
- ▶ Maximalt varvtalsområde genom att kombinera 2 och 3.