



LUNDS
UNIVERSITET

Elektromekaniska energiomvandlare (Kap 7)

Likströmsmaskinen (Kap 8)

Inledning

- Elektromekanisk omvandlare
 - en anordning som energimässigt förbinder ett elektriskt och ett mekaniskt system.
 - som regel roterande elektriska maskiner.
- Energitransporten kan ske i båda riktningar
 - generatordrift då energi transporteras från det mekaniska systemet till det elektriska.
 - Omvänt betyder motordrift att energi flyttas från det elektriska systemet till det mekaniska.
 - Omvandlingsprocessen är i princip reversibel, vilket innebär att alla motorer kan användas som generatorer och vice versa.



Varför magnetism?

Energiomvandling

elektrisk ↔ magnetisk ↔ mekanisk
eller elektrisk ↔ mekanisk

- **Elektriska maskiner**
 - Reversibla
 - Elektromagneter
 - Ej reversibla



Magnetiskt eller elektriskt fält?

1. Kraft på en strömförande ledare i ett magnetiskt fält
2. Kraft mellan plattorna i en kondensator

Energitätheten per volymsenhet för de båda fälten

$$w_{magn} = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} B^2 \quad w_{el} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 E^2$$

där den magnetiska flödestätheten B kan bli ca 1T och den elektriska fältstyrkan E kan bli $3 \cdot 10^6$ V/m

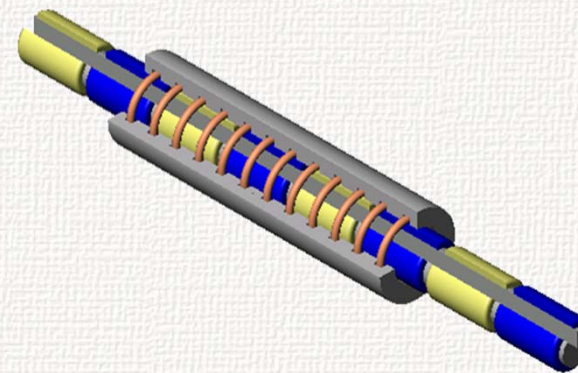
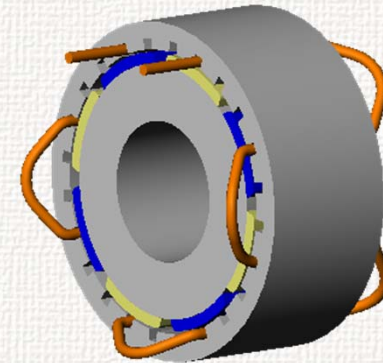
$$w_{magn} = \frac{1^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 4 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3 \quad w_{el} = \frac{1}{2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9 \cdot 10^{12} \approx 40 \text{ J/m}^3$$

Den magnetiska energitätheten är suveränt störst.

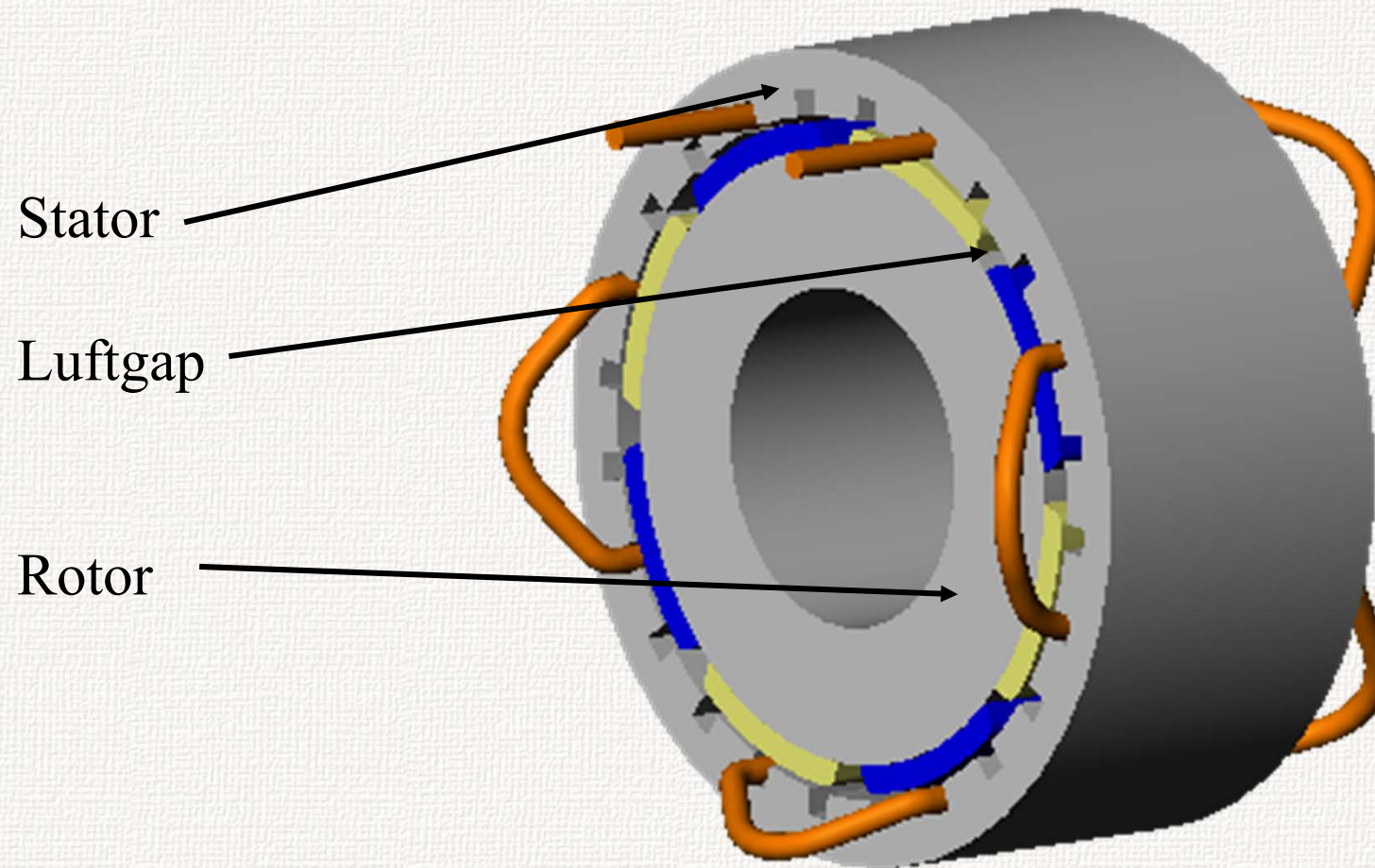


Elektromagnetmekaniska energiomvandlare

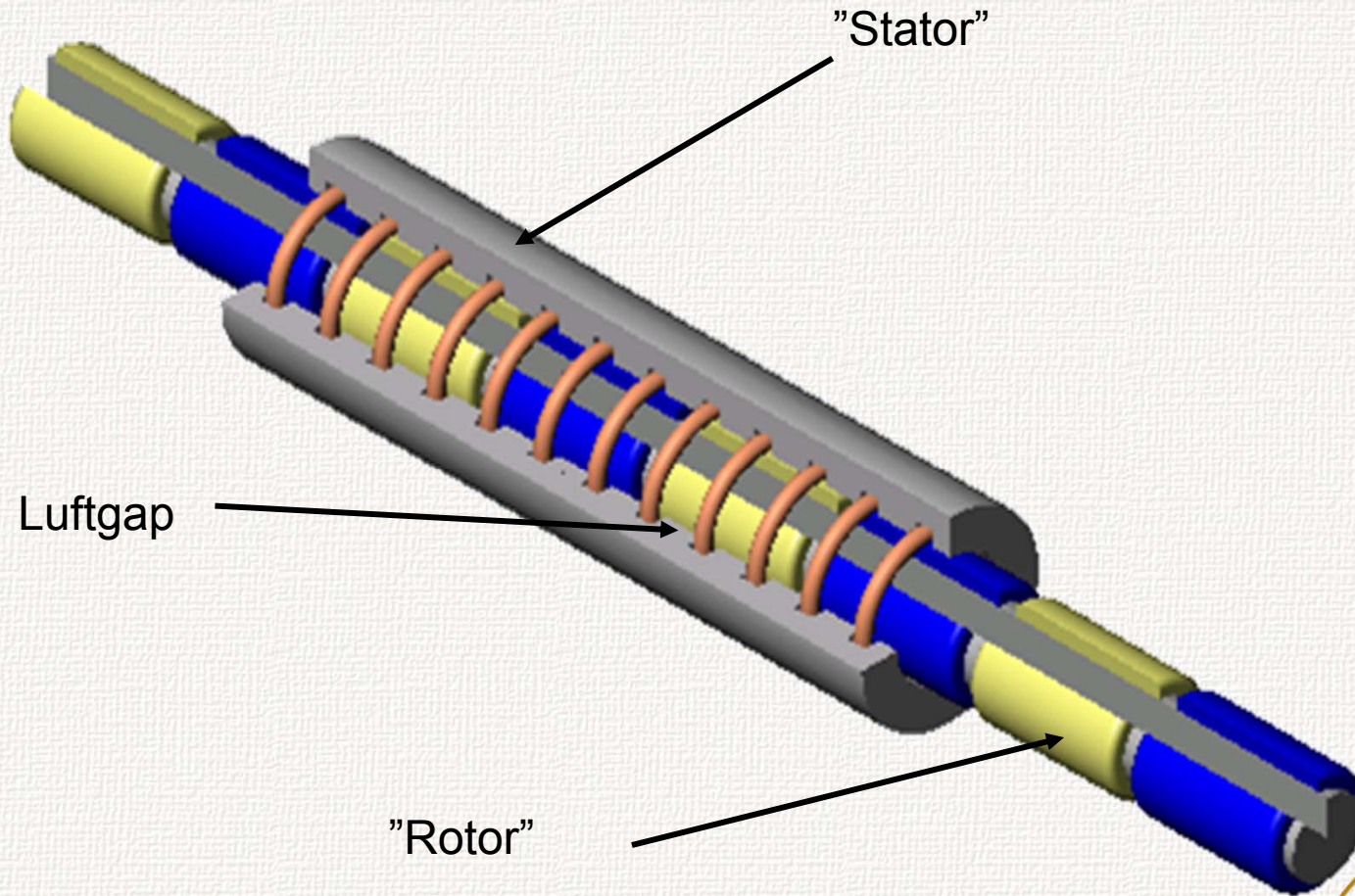
- **Elmaskin består av stator och rotor**
 - Elektrisk energi till/från statorn
 - *Spänning \times Ström*
 - Mekanisk energi till/från axeln
 - *Moment \times Varvtal*
 - Magnetisk energi mellan rotor och stator
- **Tre viktiga lagar**
 - Ampéres kretslag
 - Faradays induktionslag
 - Lorentz kraftlag



Roterande Maskin

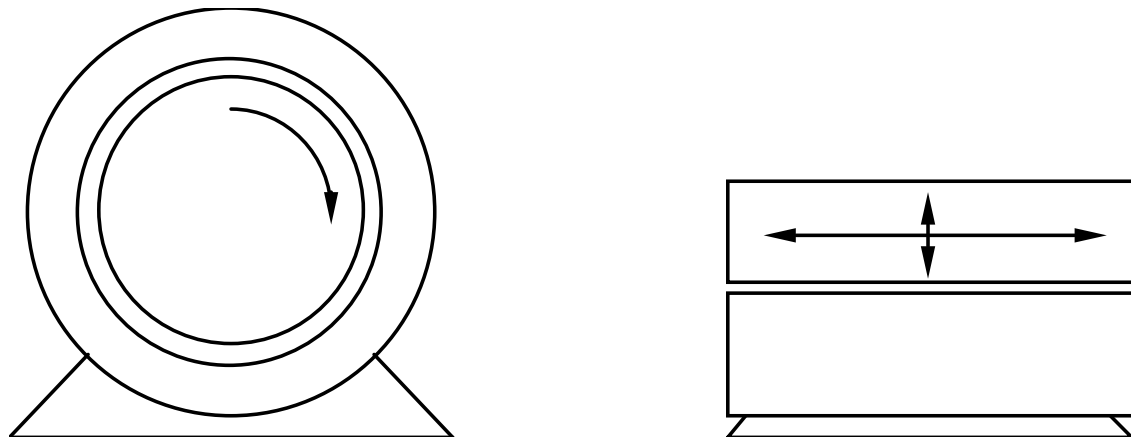


Translaterande (linjär) maskin



Roterande och translatorisk rörelse (I)

Ur den stora flora av elektromekaniska energiomvandlare som förekommer kan två grundläggande typer av mekanisk rörelse hämtas, nämligen roterande respektive translatorisk eller vibrerande, se figur 7.1.



Figur 7.1. Roterande rörelse (vänster) och translatorisk eller vibrerande rörelse (höger).

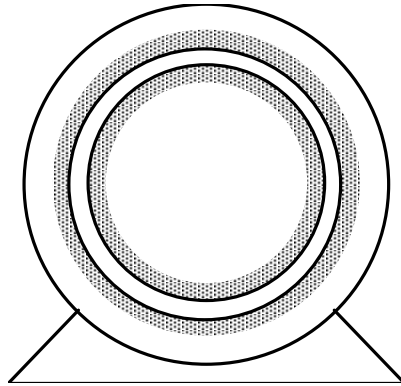


Roterande och translatorisk rörelse (II)

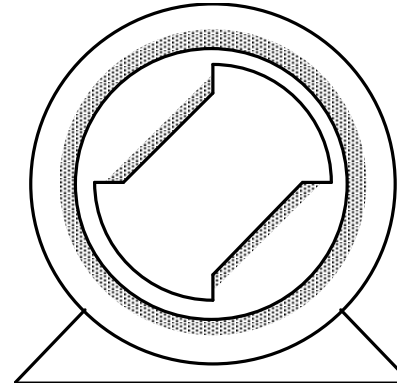
- Roterande elektromekaniska energiomvandlare har nästan alltid magnetiska fält som energibärare.
 - Finns i effekter från bråkdelar av watt upp till de största generatorerna på c:a 1 Gigawatt.
- Anordningar för translatorisk eller vibrerande rörelse är t.ex.
 - elektromekaniska reläer,
 - högtalare,
 - mikrofoner,
 - vissa typer av givare.



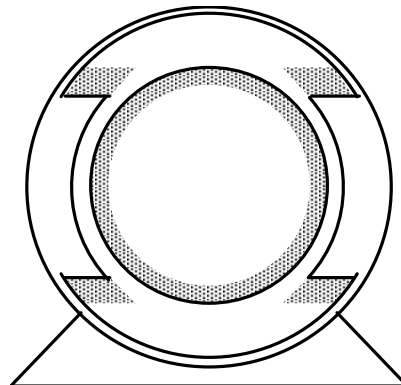
Mekanisk konstruktion (I) av roterande maskiner



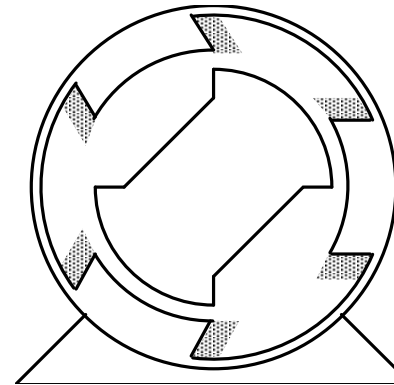
Figur 7.2.



Figur 7.3.



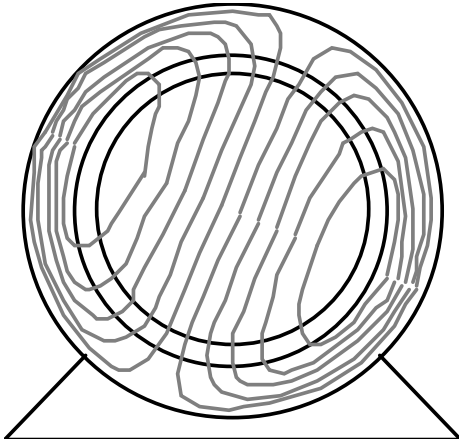
Figur 7.4.



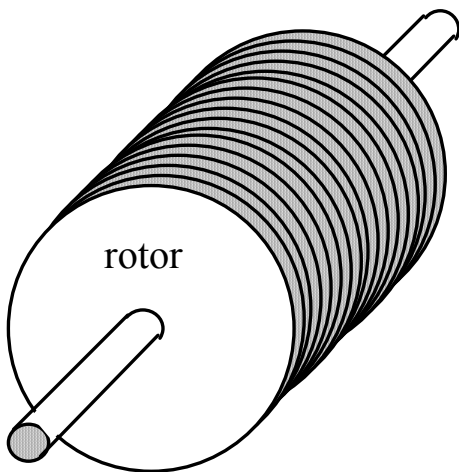
Figur 7.5.



Mekanisk konstruktion (II)



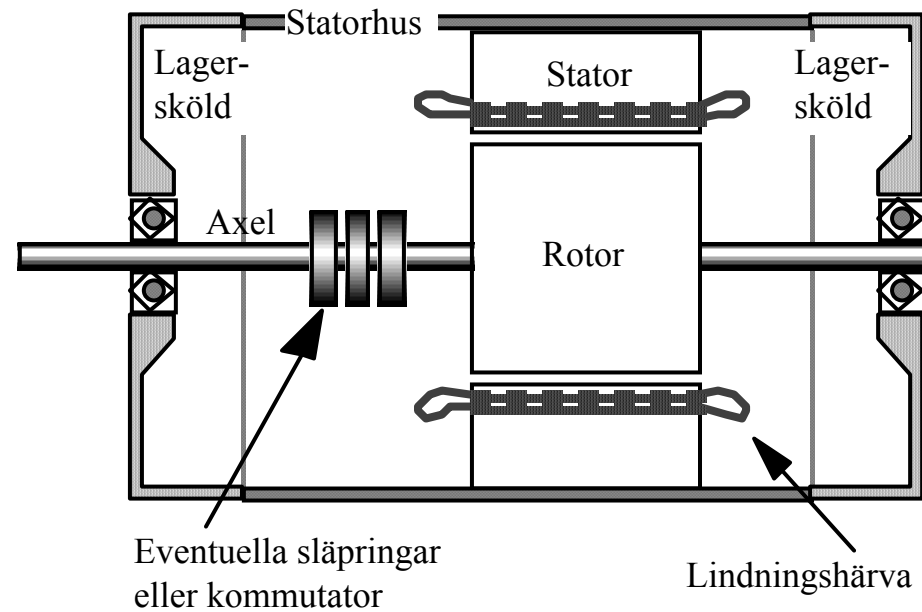
Figur 7.6. Illustration av magnetflödena i en roterande maskin.



Figur 7.7. Rotorns uppbyggnad med laminerade skivor.



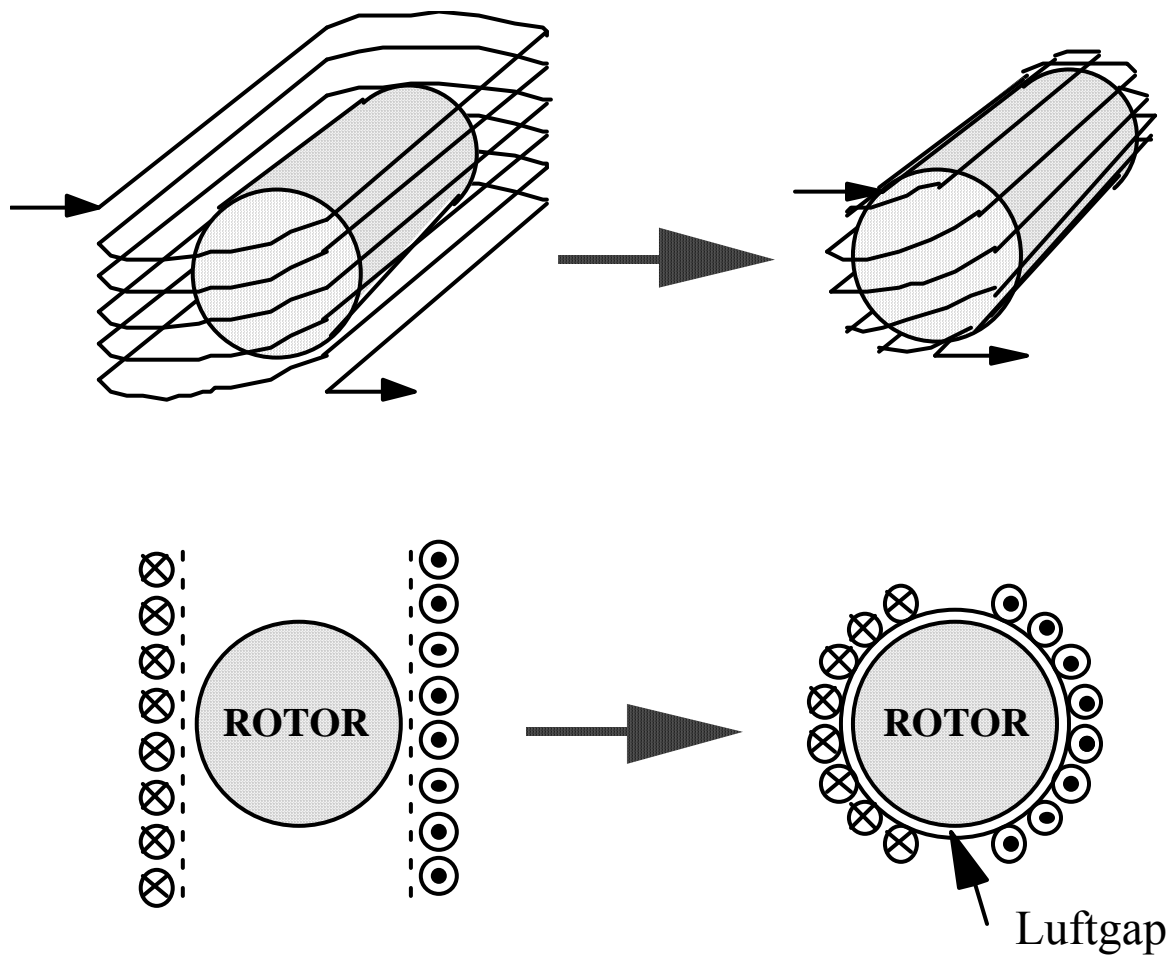
Mekanisk konstruktion (III)



Figur 7.8. Motorns uppbyggnad.



Elektrisk konstruktion (I)

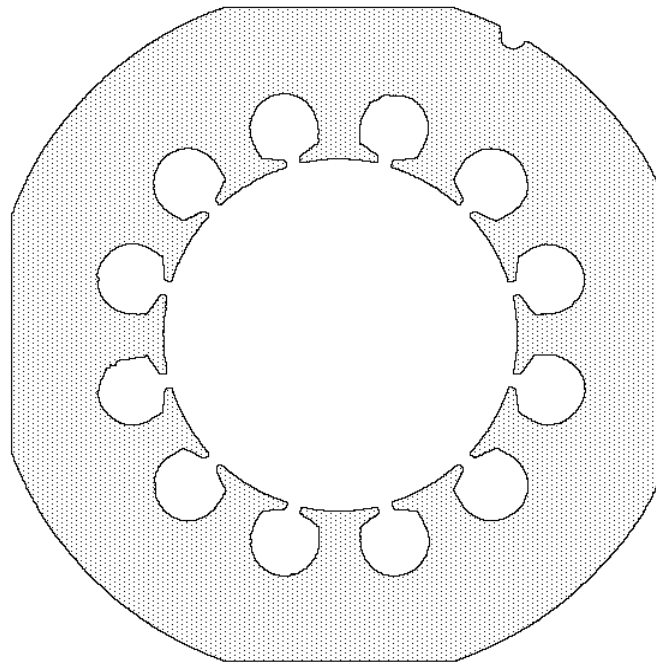


Figur 7.9. Varje faslindning blir nu cylindrisk i ena lednen. Här visas en fas.



Elektrisk konstruktion (III)

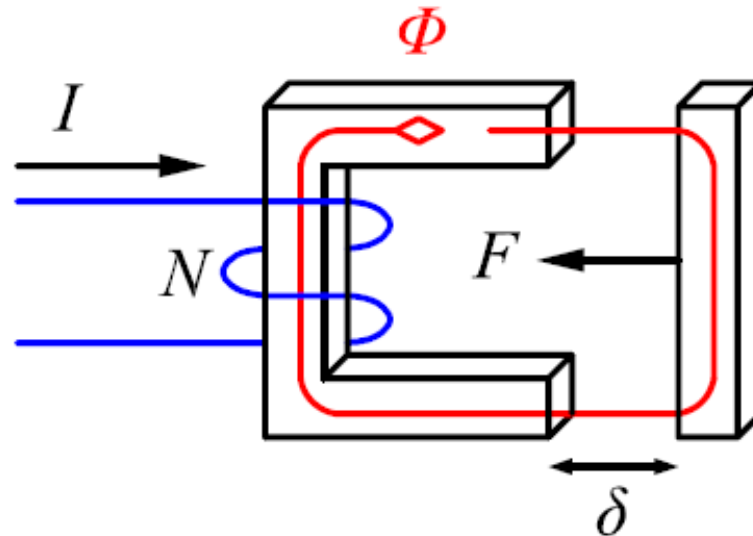
Luftgapet mellan stator och rotor måste hållas litet.
Lindningshärvarna placeras i spår i statorns och rotorns
periferi, se figur 7.14.



Figur 7.14. Spår för lindningar.



Energi i induktiv krets



$$W = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \Psi \cdot i = \frac{1}{2} N \cdot \Phi \cdot i = \frac{1}{2} Ni \cdot B \cdot A = \frac{1}{2} B^2 \frac{lA}{\mu} =$$

$$W = \frac{1}{2} B^2 \left(\frac{l_{fe} A_{fe}}{\mu_0 \mu_{fe}} + \frac{l_{\delta} A_{\delta}}{\mu_0} \right)$$

Energin finns bunden
(mestadels) i luftgapet

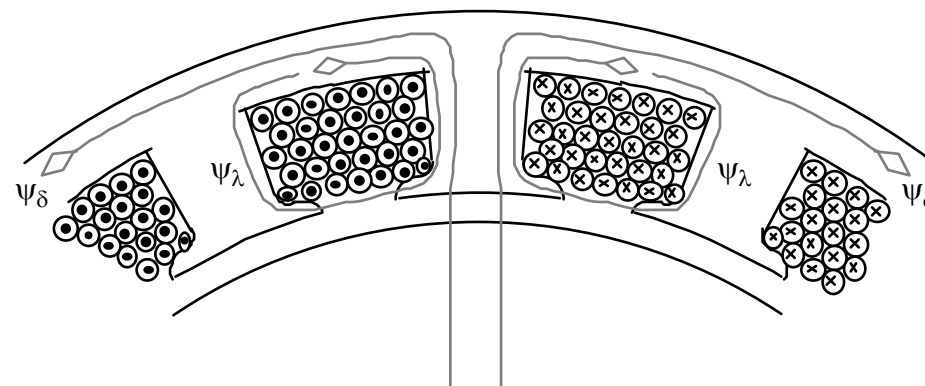


- Resistanser, läckinduktanser och inducerad emk

Läckflöde: Bidrar inte till luftgapsflödet men däremot till det totala statorflödet genom

$$\psi_{\lambda} = L_{\lambda} \cdot i$$

$$\psi_{\delta} = L_m \cdot i$$



Omagnetiserad rotor

Figur 7.20. Luftgapsflöde (ψ_{δ}) och läckflöde (ψ_{λ}).



Liten repetition

Magnetiskt flöde, mmk, reluktans

Amperes lag

$$\Sigma I = \oint H ds$$

$$NI = H \cdot l_{fe}$$

$$NI = \frac{B}{\mu} \cdot l_{fe}$$

$$NI = \frac{\Phi}{\mu A} \cdot l_{fe}$$

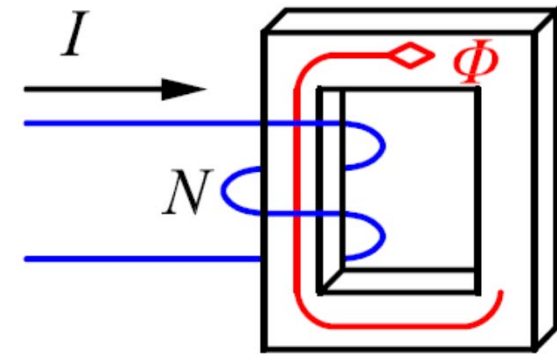
$$NI = \frac{l_{fe}}{\mu A} \cdot \Phi$$

$$F = \mathfrak{R} \cdot \Phi$$

Magnetomotorisk
kraft, mmk

Reluktans

Flöde

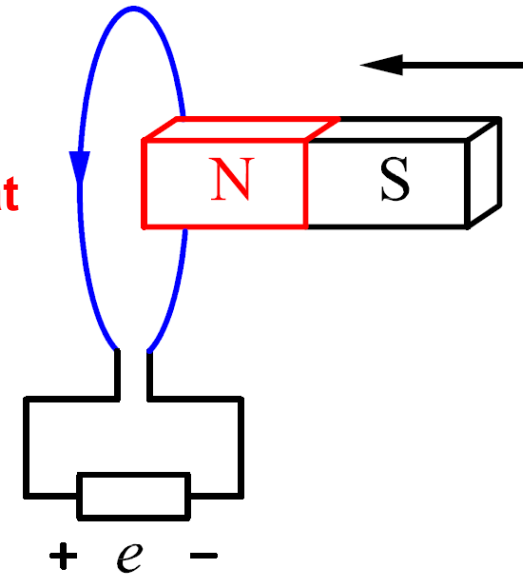


Induktion 1

- Ändring av flödet genom en slinga ger inducerad spänning

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt}$$

Sammanlänkat flöde

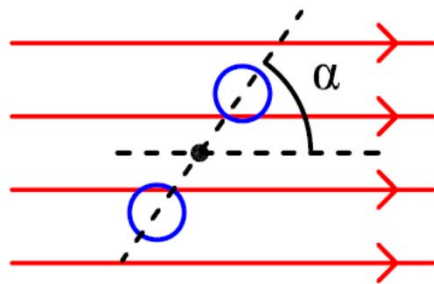
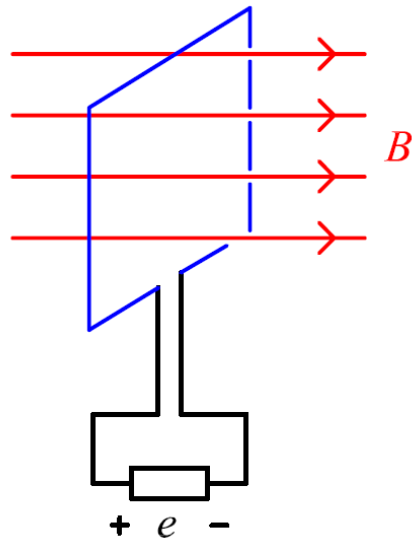


- Konstant flöde ger ingen inducerad spänning
- Snabbare förändring av flödet ger högre spänning
- Fler varv ger högre spänning



Induktion 2

- Roterar en slinga i ett magnetfält



$$\Phi = \hat{\Phi} \sin \alpha$$

$$\Phi = \hat{\Phi} \sin \omega t$$

$$e = N \frac{d\Phi}{dt}$$

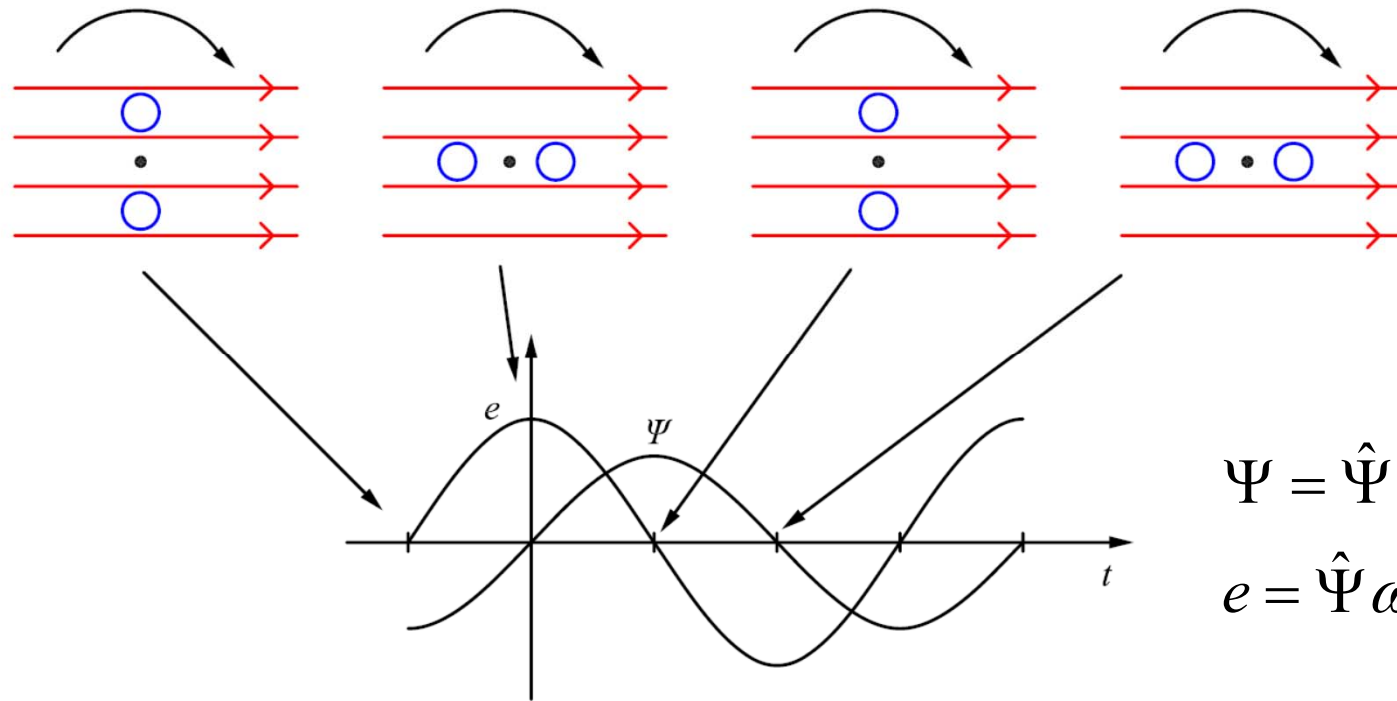
$$e = N \hat{\Phi} \omega \cos \omega t$$

$$e = \hat{\Psi} \omega \cos \omega t$$

$$e = \hat{e} \cos \omega t$$



Induktion 3

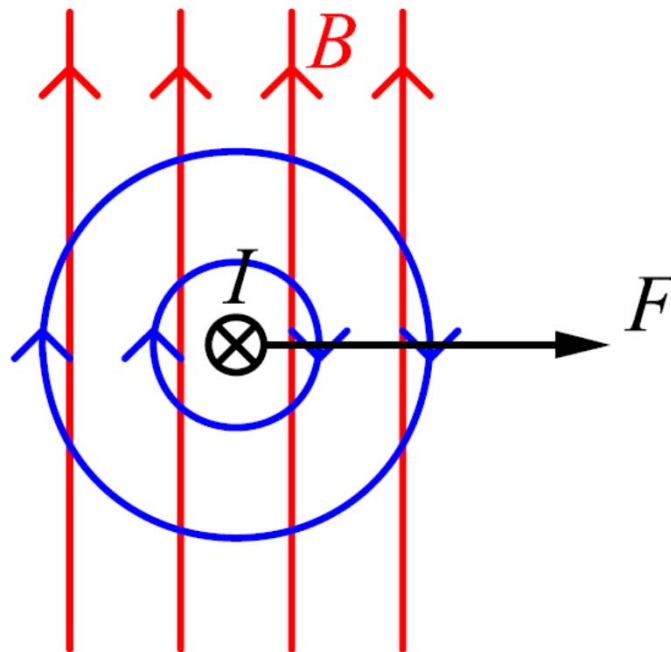


- Inducerad spänning ligger 90° före flödet
- Inducerad spänning är proportionell mot flöde och varvtal

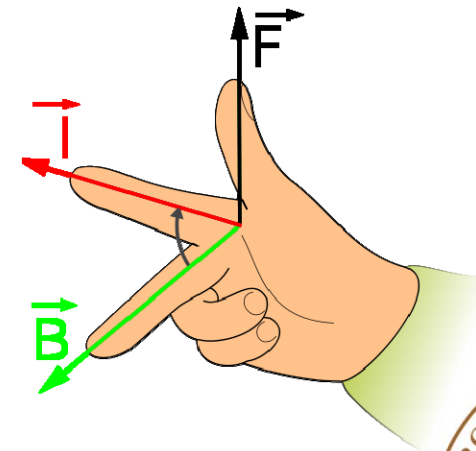


Magnetisk kraftverkan

- Strömförande ledare i magnetfält
- Kraftverkan vill jämna ut fältfördelningen

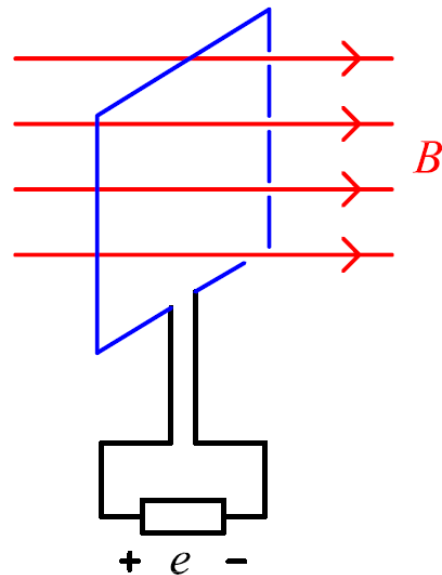


$$F = BIl$$



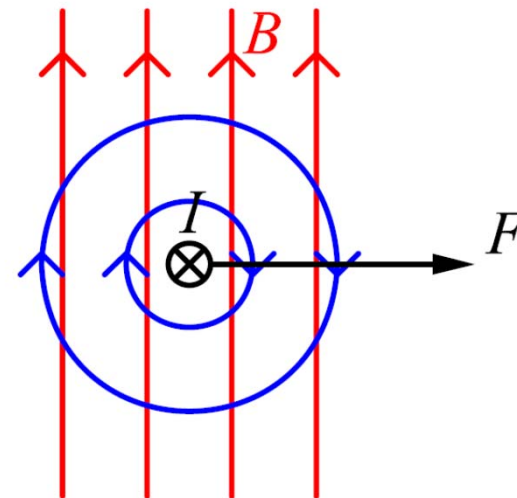
Sedan tidigare...

Inducerad spänning



$$e = N \frac{d\Phi}{dt}$$

Kraft på strömförande ledare i magnetfält



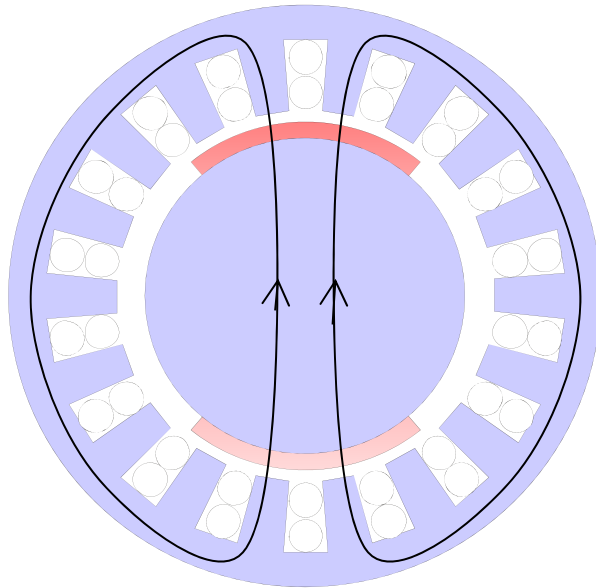
$$F = BIl$$

Detta kan bli en elmotor!

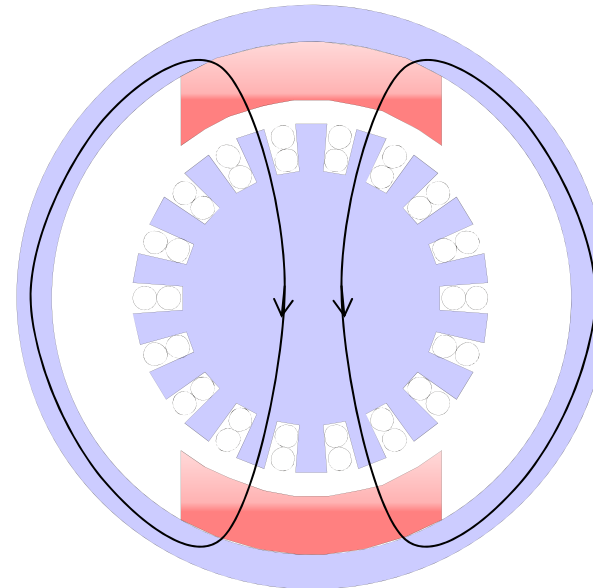


Permanentmagnetiserad (PM) elmotor

Ström och flöde skall mötas i Luftgapet



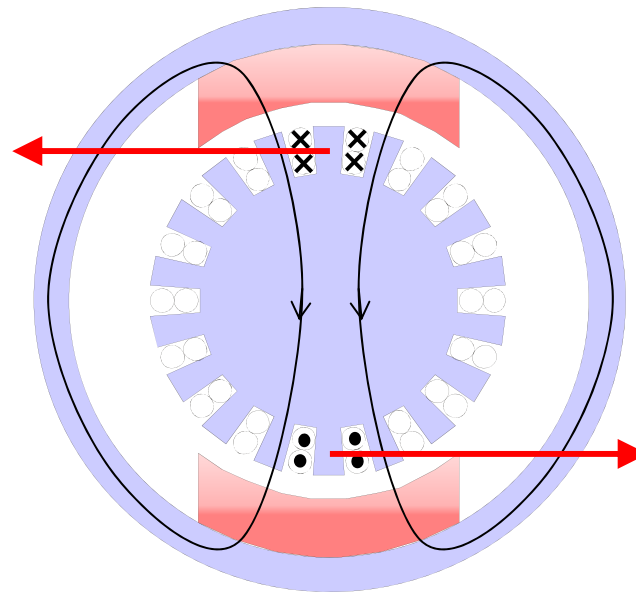
- Magneter på rotorn som i synkronmaskinen
- Ström i lindning i statorn
- $F=Bil$



- Magneter i statorn som i likströmsmotor
- Ström i lindning i rotorn
- $F=Bil$



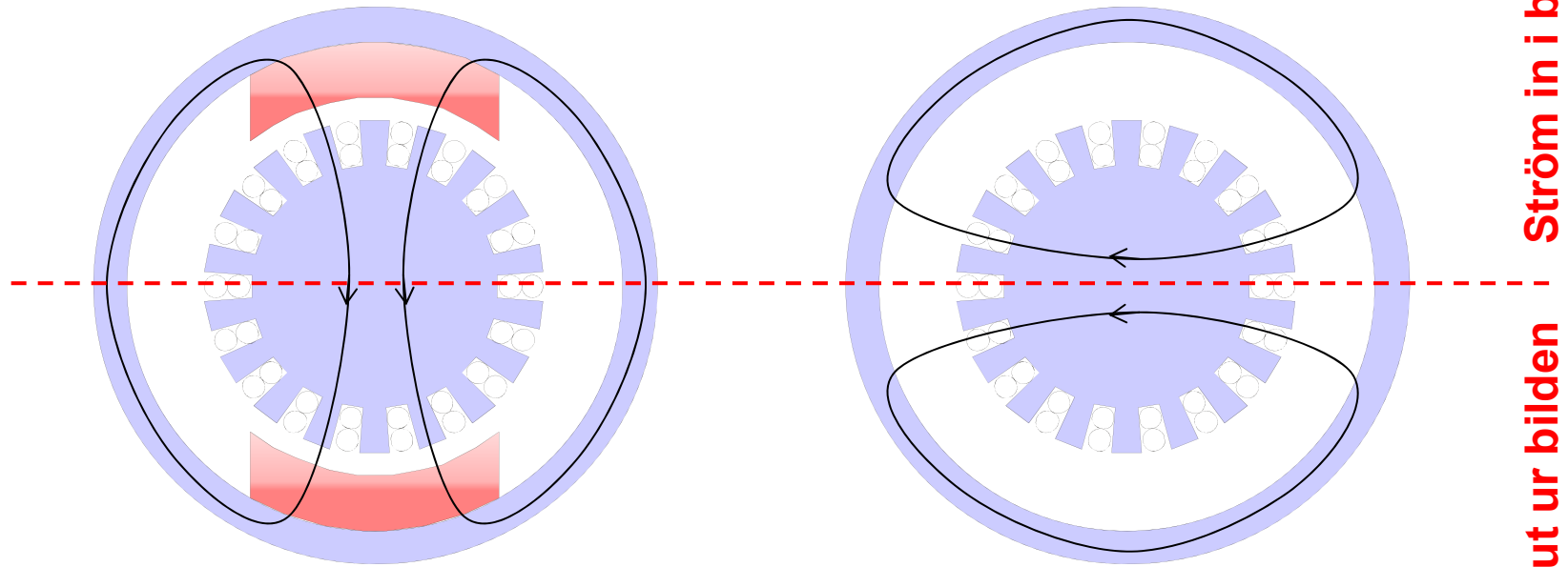
Magnetisering i stator: Skapa kraft och vridmoment



- $F = BIl$
- Kraft på ledarna upptill ←
- Kraft på ledarna nedtill →
- Vridmoment på rotern moturs



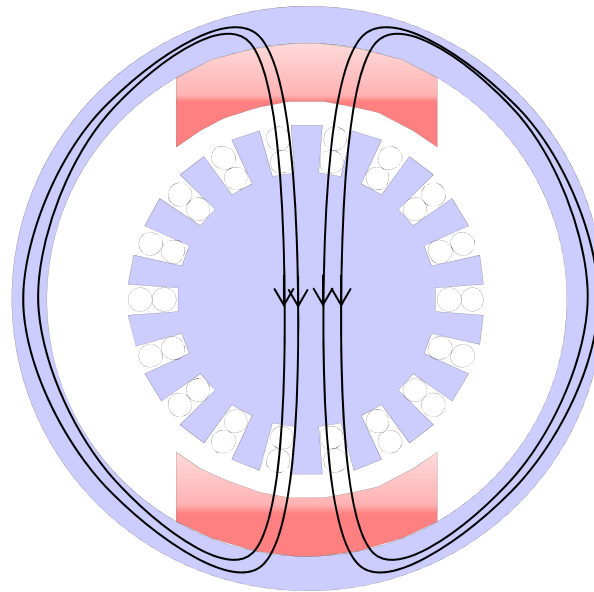
Maximera kraft och vridmoment



- Magneterna ger ett flöde riktat neråt
- Lindningarna ger ett flöde riktat åt vänster
- Maximalt vridmoment vid 90° vinkelskillnad



Låt rotorn rotera

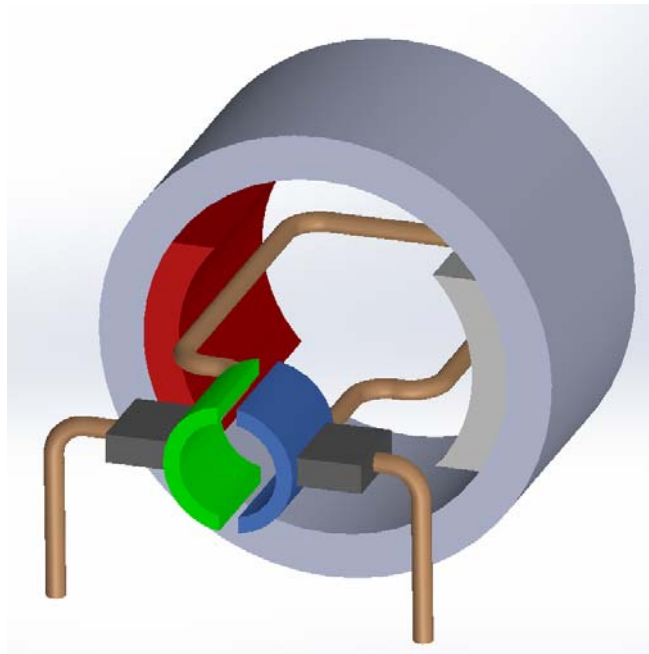


- Rotorflödet ställer sig i statorflödets riktning, vridmoment försvinner
- Om rotorflödet inte satt fast i rotorn utan kunde fortsätta vara riktat åt vänster medan rotorn rör sig...
- → Byt strömriktning i ett ledarpar i taget



Kommutator

- En mekanisk växelriktare monterad på rotorn – kallad kommutator kopplar om strömmarna i rotorn så att riktningen på rotorflödet bibehålls
- Det är en likströmsmotor!



Vridmoment!

- Det totala luftgapsflödet bildas av statorflöde och rotorflöde i samverkan
- Statorflöde och rotorflöde "vill" ligga i samma linje. Rotorn rör sig när den påverkas av detta vridmoment



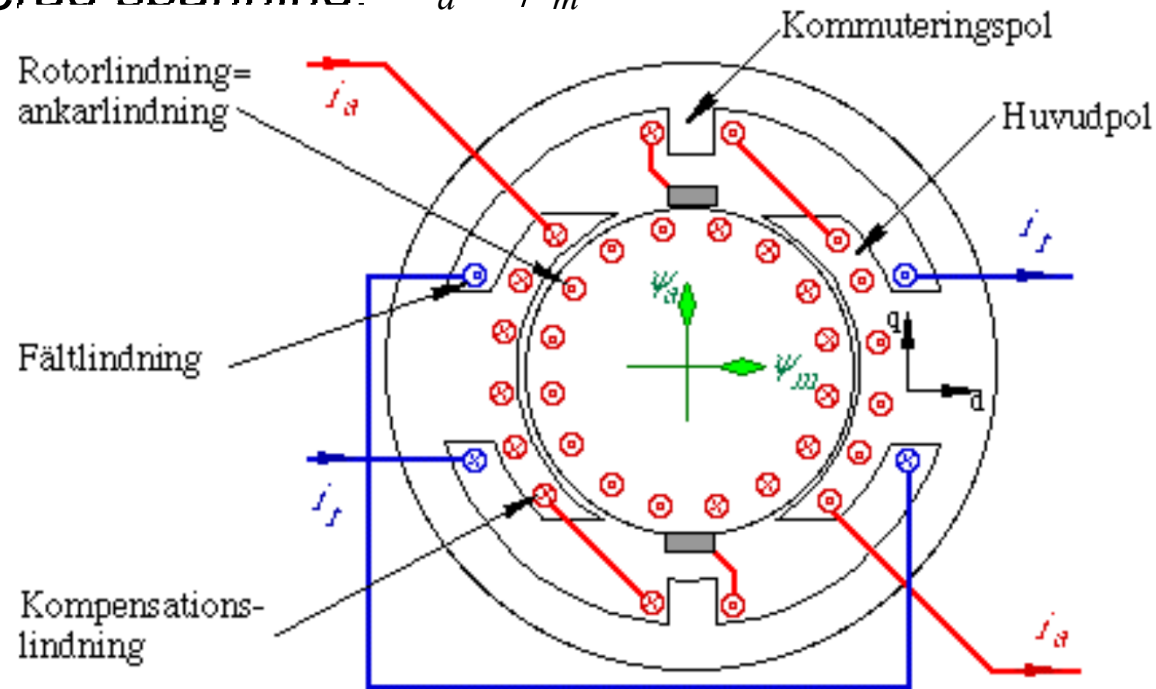
Vridmomentbildning (I)

- Elmaskinens uppgift i ett elektriskt drivsystem är oftast att leverera ett önskat moment till axeln.
- Momentstyrningen är oftast den innersta och snabbaste loopen i återkopplingen.
- För att kunna styra en elmaskins moment är det naturligtvis viktigt att förstå hur maskinen bildar vridmoment



Momentbildning och inducerad spänning för likströmsmaskinen stationärt

- Vridmoment: $T = \psi_m \cdot i_a$
- Inducerad spänning: $e_a = \psi_m \cdot \omega$

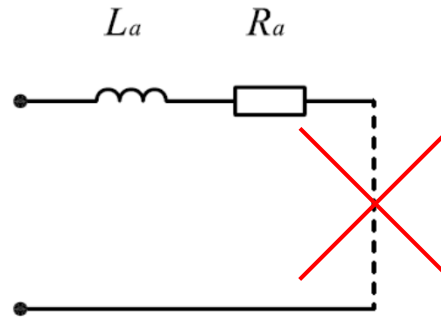


Figur 8.2. Principbild av genomskuren DC-motor.



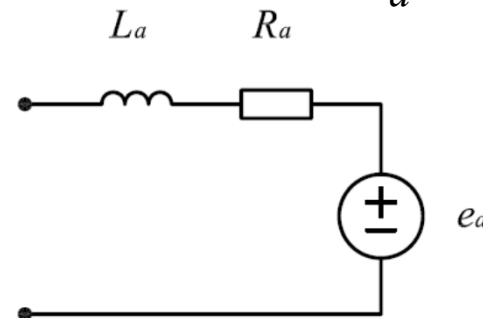
Likströmsmaskinens ekvivalenta schema

- Rotorlindningen kan ses som resistans och induktans, a står för ankare (eng. armature)



- R_a och L_a är små, varför blir strömmen inte hög?
- I en slinga som roterar i ett fält induceras spänning
- Kommutatorn likriktar vilket ger $e_a = \omega \psi$

$$e = \frac{d\psi}{dt}$$



- Inducerad spänning (emk) är beroende av varvtal och flöde

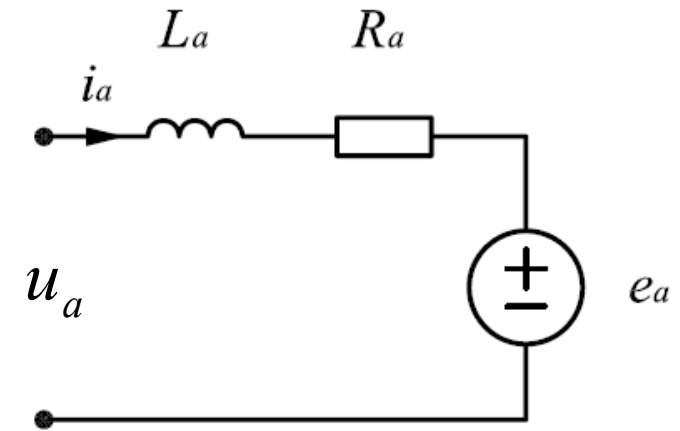


Likströmsmaskinens matematiska modell

- Rotorkretsen kan skrivas som

$$u_a = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega \cdot \psi_m$$

Försvinner i stationaritet



Likströmsmotorns vridmoment

- Vridmoment är kraft gånger hävarm
 - Hävarmen konstant
 - $F = B \cdot l \cdot i$
- $F = B \cdot l \cdot i$
 - För PM-stator är B konstant
 - Längden konstant
 - Likströmmen i avgör kraften F
- Vridmomentet (ur sambandet $P_{mek} = P_{eldyn}$)

$$P_{mek} = \omega T = e_a \cdot i_a = \omega \psi_m \cdot i_a$$

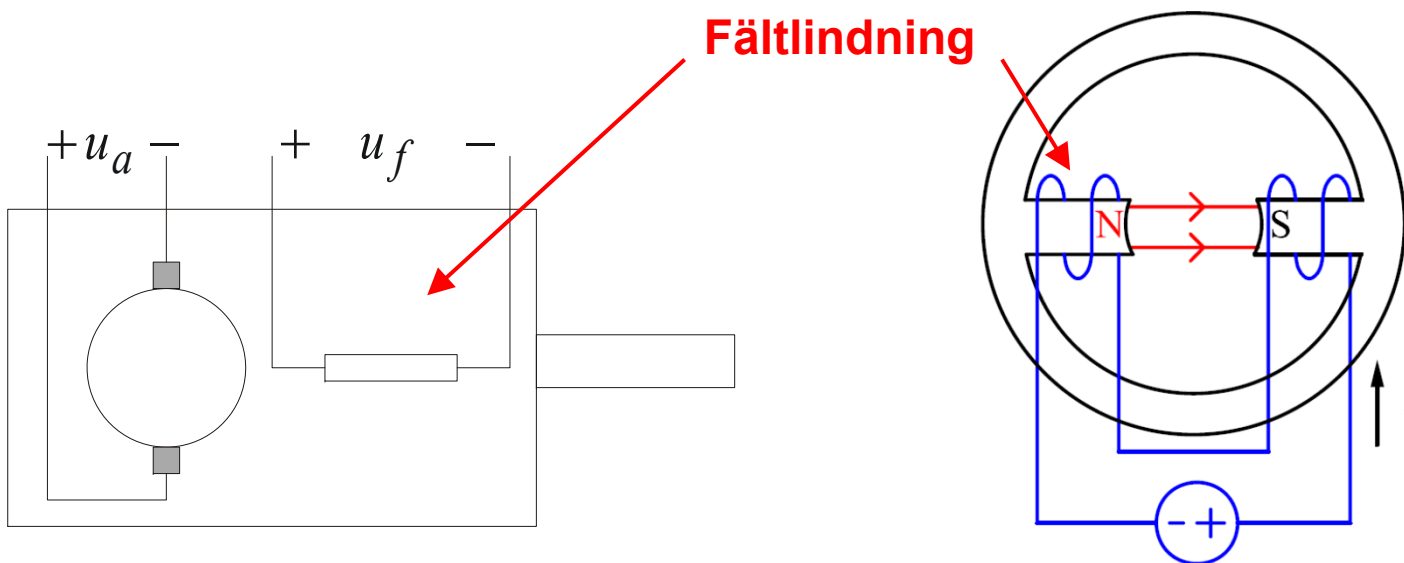
$$\omega T = \omega \psi_m \cdot i_a \Rightarrow T = \psi_m \cdot i_a$$

- Ψ_m är flödet från permanentmagneternas magnetisering
- i_a är rotorströmmen

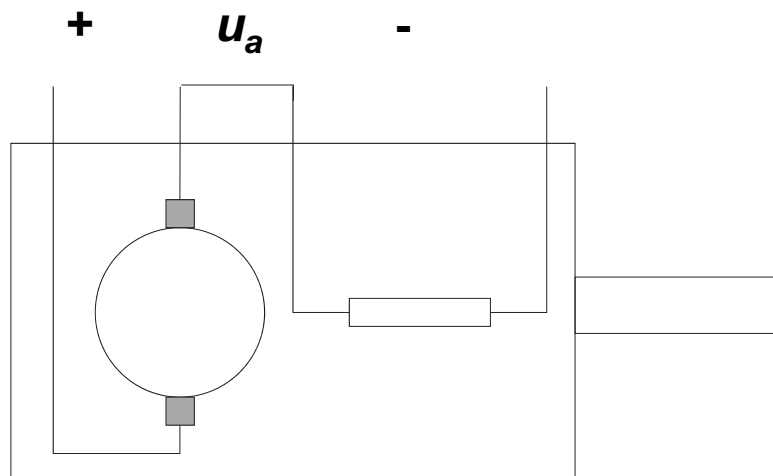


Separatmagnetiserad likströmsmaskin

- I stället för permanentmagnet kan en elektromagnet användas
- Flödet är då inte fixerat utan kan väljas med fältspänningen



Seriemagnetiserad likströmsmotor



- Rotorströmmen samma som fältströmmen
- Momentet oberoende av strömmens tecken

$$T = \psi_m \cdot i_a$$

- Växelström går bra!
- Kallas allströmsmotor (dammsugare, bormaskin)



Varvtal vid konstant u_a

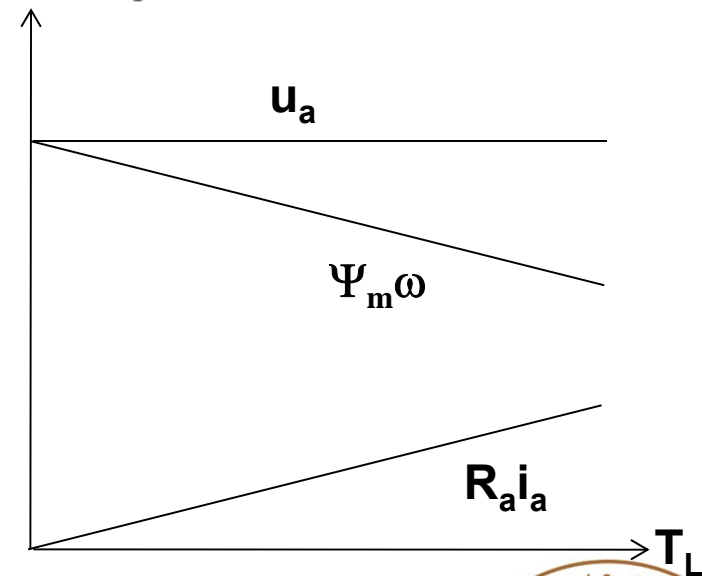
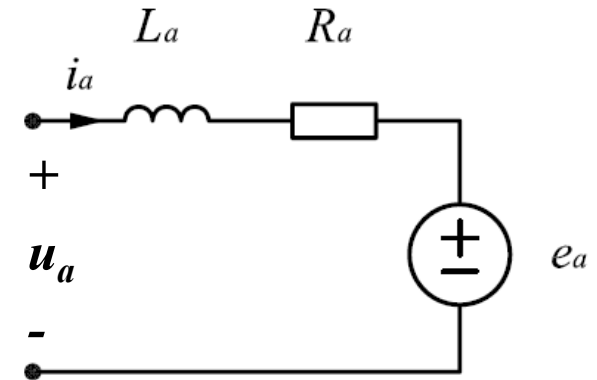
- Stationaritet ger

$$u_a = R_a \cdot i_a + e_a$$

$$\left. \begin{aligned} T_L = T_{el} = \psi_m \cdot i_a \\ e_a = \psi_m \cdot \omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$u_a = R_a \cdot \frac{T_L}{\psi_m} + \psi_m \cdot \omega$$

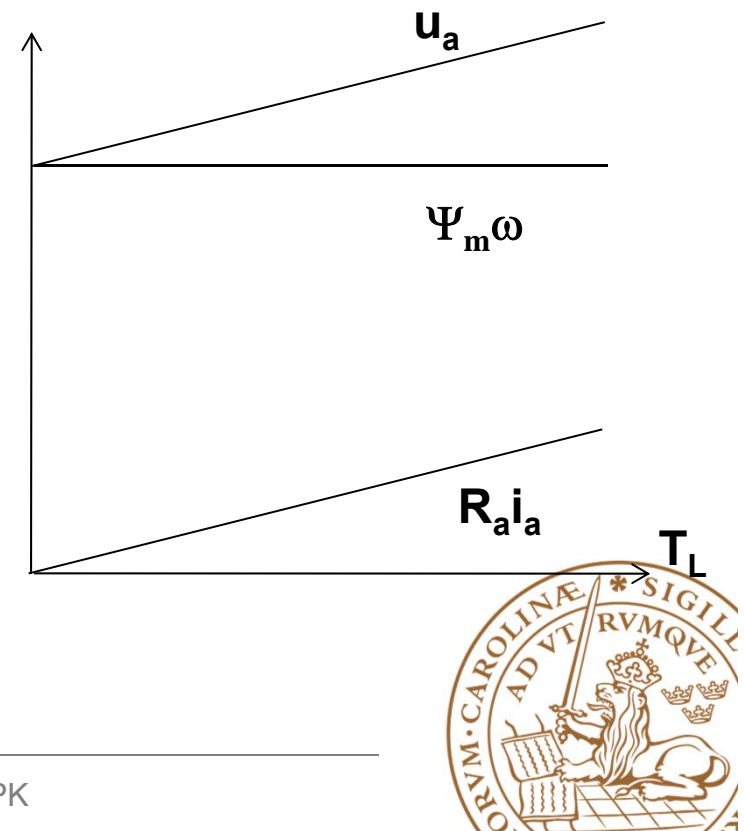
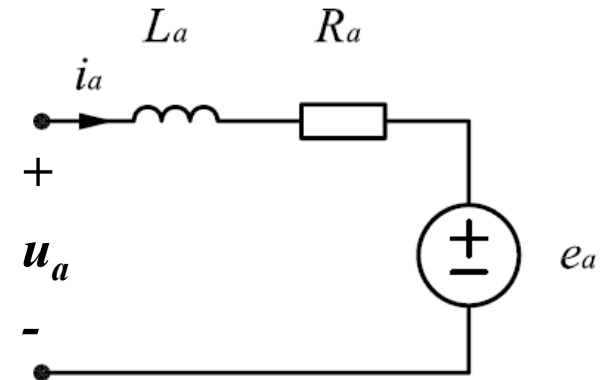
- Konstant u_a , ökande T
 - i_a ökar, spänningsfaller över R_a ökar
 - ω minskar



Konstant varvtal

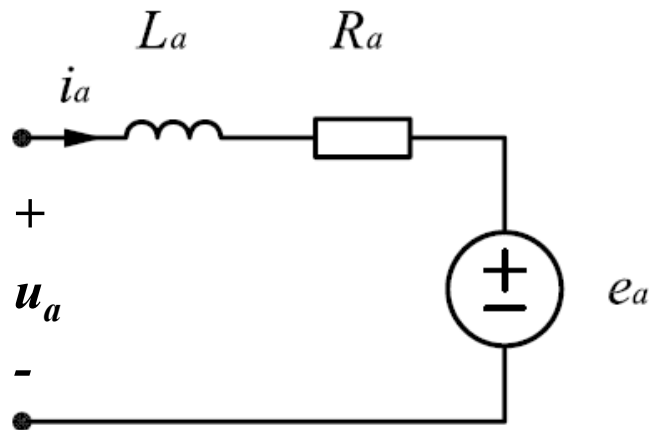
$$u_a = R_a \cdot \frac{T_L}{\Psi_m} + \Psi_m \cdot \omega$$

- **Konstant ω , ökande T**
 - i_a ökar, spänningsfaller över R_a ökar
 - u_a måste ökas



Likströmgenerator

- Samma sak fast tvärt om...
- Generatordrift: $e_a > u_a$, i_a negativ $\rightarrow P$ negativ



- I tomgång är $u_a = e_a$, alltså kan man mäta upp e_a
- Vid belastning sjunker u_a pga spänningsfallet över R_a
- Separat magnetisering $\rightarrow e_a$ kan varieras vid konstant varvtal



Exempel

En permanentmagnetiserad likströmsmotor har följande data:

Ankarresistans $R_a=0,25 \Omega$

Ankarinduktans $L_a=20 \text{ mH}$

Magnetflöde $\Psi_m=1,2 \text{ Vs}$

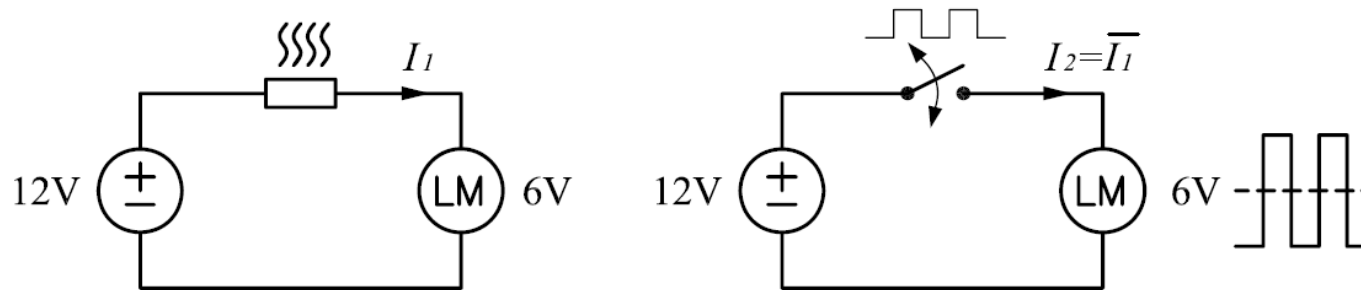
Motorn matas med 180 V och driver en vinsch som används för att lyfta saker.

a) Vilket är motorns varvtal vid tomgång?

b) Vid ett stationärt driftfall belastas motorn med lastmomentet 18 Nm. Vilket är då varvtalet och vilken effekt drar motorn?



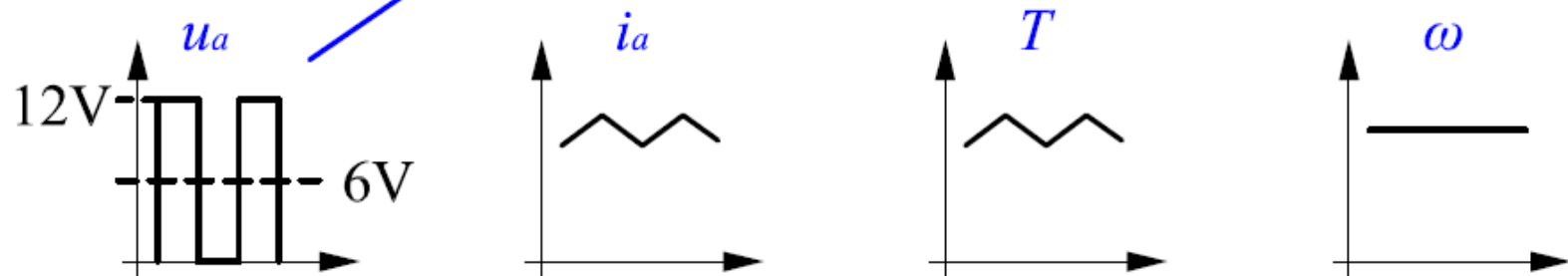
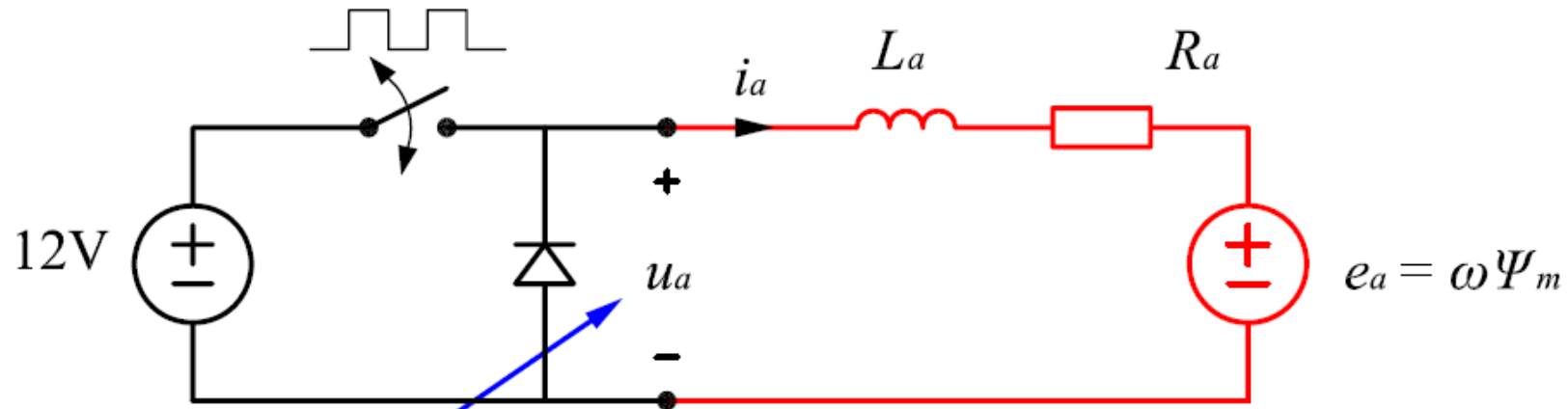
Kraftelektronik för LM



- För att minska varvtalet måste spänningen minskas
- Resistans i serie ger värmeförluster
- Lösning: slå till/från spänningen snabbt



Kraftelektronik för LM



$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega \Psi_m$$

$$T = \Psi_m i_a$$

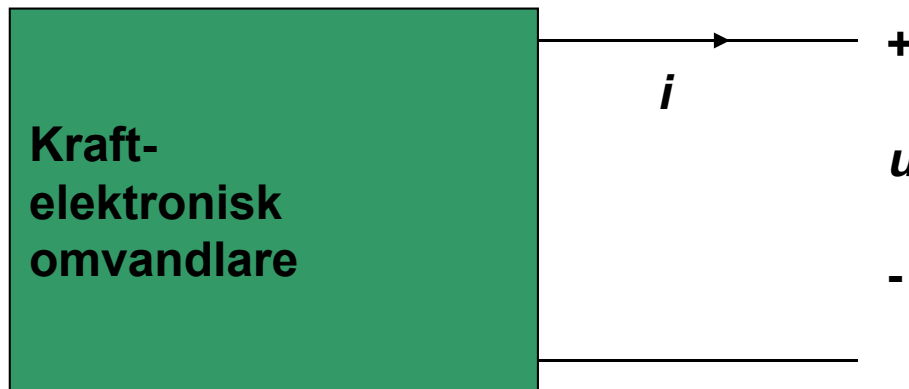
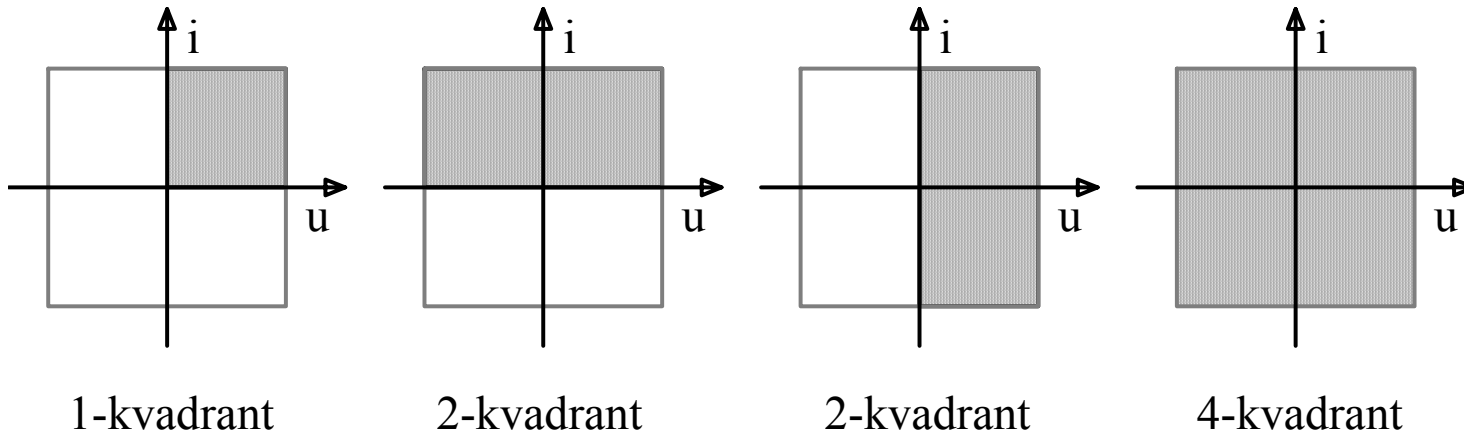
$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_L$$

↑
Stor

Konstant varvtal trots switchad spänning



Kvadranter



**Likströmsmotor:
Varvtal ~ spänning
Moment ~ ström**



Sammanfattning

- Elmotor har ofta permanentmagneter och lindning
 - $F = BIl$ ger _____ på en strömförande ledare i magnetfält
- Strömmar i stator och rotor skapar varsitt _____
- Moment bildas när _____ strävar efter att ha samma riktning
 - Maximalt moment vid ---- vinkelskillnad
 - I likströmsmaskinen håller kommutatorn vinkeln konstant ---°
- Permanentmagnetiserad likströmsmotor
 - Vridmoment $T = \Psi_m$ gånger _____
 - Inducerad likspänning $e_a = \Psi_m$ gånger _____
 - Spänningsekvation $u_a = R_a i_a + L_a di_a/dt +$ _____
- Separatmagnetiserad LM har egen likspänningskälla eller _____
- Motor i dammsugare/borrmaskin kallas _____
 - Seriemagnetiserad LM matas med växelspanning

