

TSFS04, Elektriska drivsystem, 6 hp

Föreläsning 4 - Grundläggande principer för elmaskiner

Mattias Krysander

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

2011-01-26

Dagens föreläsning

Dagens föreläsning introducerar grundläggande principer för elmaskiner genom att exemplifiera principerna på synkronmaskinen.

1. Maskintyper
2. Konstruktion
3. MMK i luftgapet
4. Roterande mmk-vågor
5. Inducerade spänningar och moment

—— Maskintyper ——

Huvudtyper av roterande maskiner

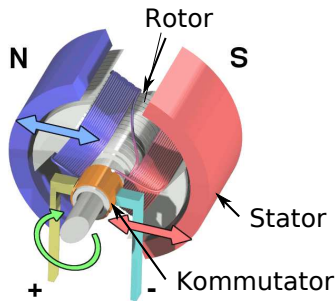
- ▶ likströmsmaskiner/DC-maskiner
- ▶ synkronmaskiner
- ▶ induktionsmaskiner eller asynkronmaskiner

För samtliga dessa maskintyper gäller att moment genereras genom **vinkelskillnad mellan två magnetfält**.

Likströmsmaskiner - konstruktion

Karaktäriserande drag:

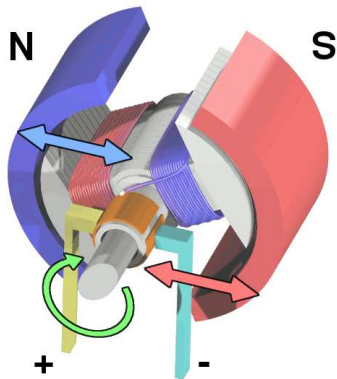
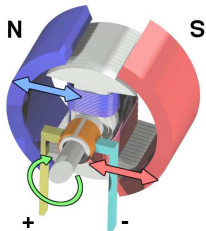
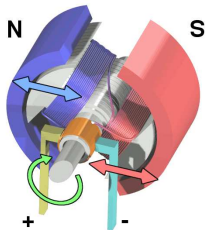
- ▶ Drivs med likström
- ▶ Statorn fix polaritet
- ▶ Rotorns polaritet switchas.
- ▶ Mekanisk switch, [kommutator](#)
- ▶ Lättreglerad
- ▶ Kommutatorn begränsar effekt och hastighet.



Borstlösa likströmsmaskiner (saknar kommutator)

- ▶ Rotorn fix polaritet, permanentmagnet.
- ▶ Statorns polaritet switchas mha elektronisk switchning.
- ▶ Påminner om växelströmsmotorer.

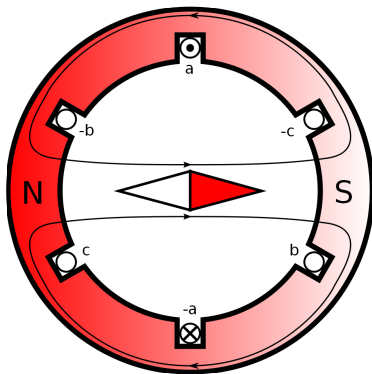
Likströmsmaskiner - funktionsprincip



Synkronmotorn - konstruktion

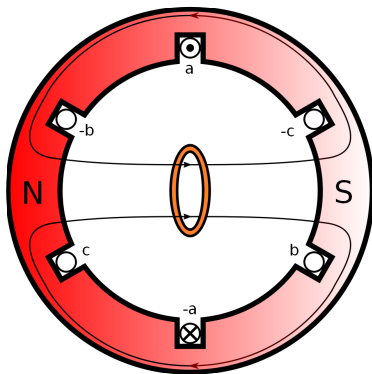
Karaktäriserande drag:

- ▶ Rotorn fix polaritet, permanentmagnet.
- ▶ Statorn genererar roterande magnetfält.
- ▶ Trefasmaskinen i sitt enklaste utförande har 3 lindningar: a, b och c.
- ▶ Flödets huvudriktning superponeras av flödena genererade av de tre lindningarna.
- ▶ Matas med vanlig trefasspänning $\Rightarrow$ konstant vinkelhastighet given av frekvensen på matningsspänningen.
- ▶ Rotorn roterar synkront med flödet, därav namnet.



Asynkronmotorn - funktionsprincip

- ▶ Som synkronmaskinen fast rotern består av en kortsluten lågresistiv slinga isf en magnet.
- ▶ Den kortslutna kretsen försöker förhindra flödesändring.
- ▶ Ringen följer därför med det roterande fältet.
- ▶ Om ringens resistans vore 0, skulle rotationshastigheten bli lika med fältets rotationshastighet.
- ▶ Eftersom resistansen är nollskild kommer ringens vinkelhastighet var något lägre, därav namnet asynkronmotor.



—— Konstruktion ——

Godsets utformning

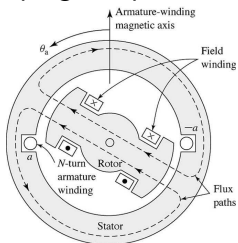
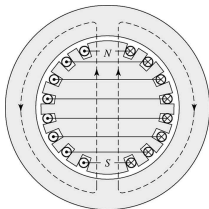
Rotor

cylindrisk

utpräglade poler

Stator

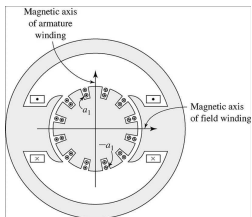
cylindrisk



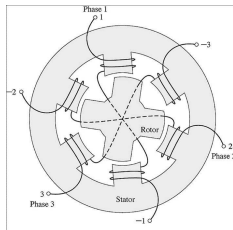
synk/asynkronmaskin

synkronmaskin

utpräglade poler



likströmsmaskin



reluktansmaskin

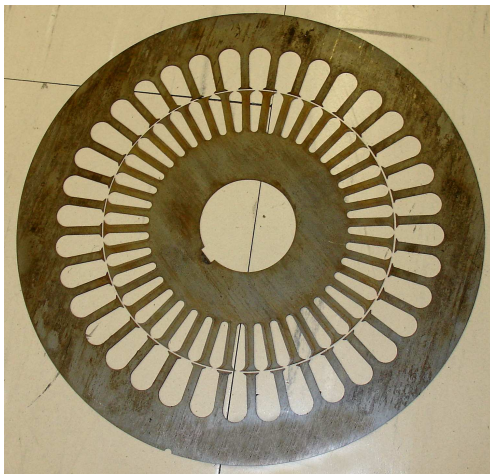
Laminering

Det gods som utsätts för ett roterande flöde lamineras för att reducera virvelströmsförluster.

Likströmsmaskin:
rotor

Synkronmaskin:
stator

Asynkronmaskin:
rotor och stator



Lindningar

Lindningar beskrivs antingen genom

- ▶ placering: stator/rotor-lindning
- ▶ funktion: fält/ankar-lindning
- ▶ konstruktion: utbredd/koncentrerad lindning

Fält/ankar-lindning

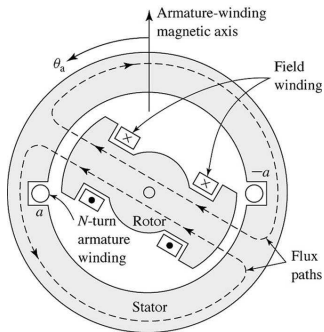
Fältlindningen genererar med likström det huvudsakliga magnetfältet i motorn.

Ankarlindning är den lindning där den huvudsakliga energiomvandlingen sker. I ankarlindningen flyter växelström. I asynkronmotorfallet brukar endast den inkopplade statorlindningen benämnas ankarlindning.

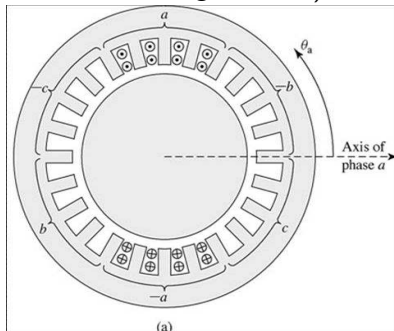
	likströmsmaskin	synkronmaskin	asynkronmaskin
stator	fältlindning	ankarlindning	ankarlindning
rotor	ankarlindning	fältlindning	inducerad växelström

Koncentrerad/utbredd lindning

koncentrerad lindning:



utbredd lindning (ofta sinusformigt utbrett):

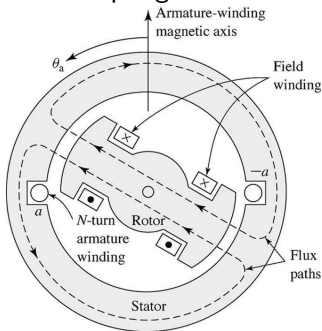


Poltal

Antalet poler som en motor har kallas för poltal.

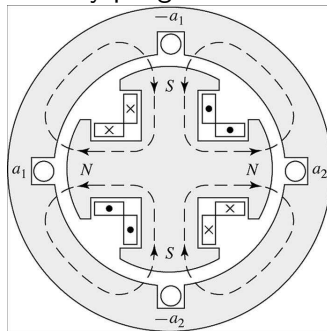
Samma antal poler på rotor och stator för de maskintyper vi studerar.

Tvåpolig maskin



Inducerad spänning i $a - a$ genomlöper 360 elektriska grader på 360 mekaniska grader.

Fyrpolig maskin



Inducerad spänning i $a_1 - a_1$ genomlöper 720 elektriska grader på 360 mekaniska grader.

Mekanisk och elektrisk vinkel(hastighet)

Sambandet mellan mekanisk vinkel θ_a , elektrisk vinkel θ_{ae} och poltalet p är

$$\theta_{ae} = \left(\frac{p}{2}\right) \theta_a$$

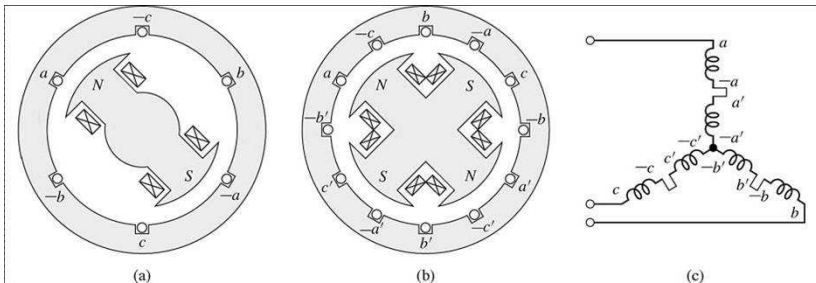
Detta ger att förhållandet mellan mekanisk vinkelhastighet ω_a och elektrisk vinkelhastighet ω_{ae} är

$$\omega_{ae} = \left(\frac{p}{2}\right) \omega_a$$

Poltalet fungerar alltså som en växel mellan elektrisk och mekanisk vinkelhastighet.

Trefaslindning

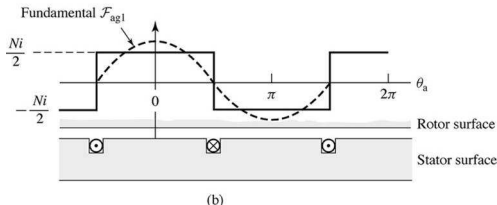
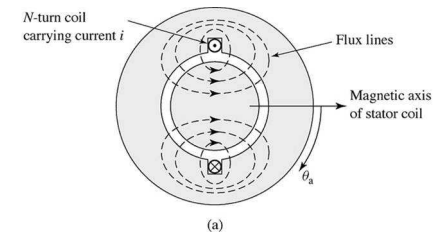
Tvåpolig resp fyrpolig trefas synkronmaskin med utpräglade poler på rotorn.



—— MMK i luftgapet ——

MMK med koncentrerad lindning

Först ska vi studera en koncentrerad lindning.

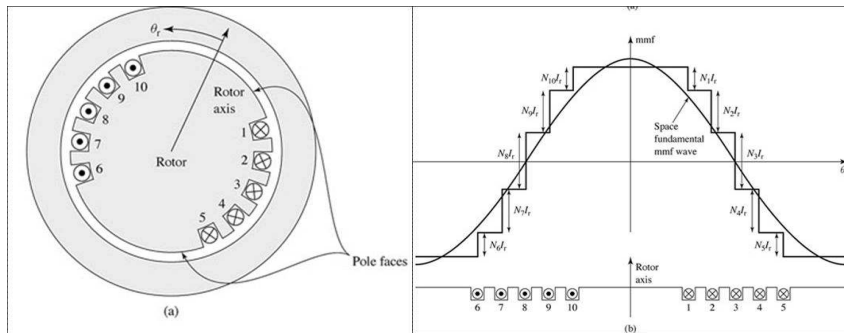


Minns:

$$\mathcal{F} = Ni$$

MMK med utbredd lindning

Sinusformigt utbredd mmk i luftgapet ger fördelar för momentkvaliteten.

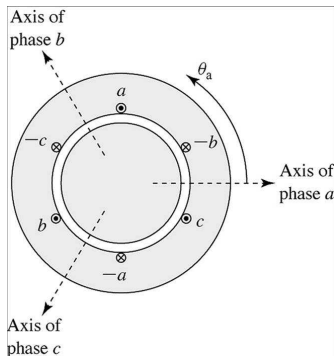


Detta åstadkoms genom att lindningsvarven varieras över de olika spåren, idealt ska lindningstätheten vara fördelad enligt:

$$\frac{\text{trådvarv}}{\text{spår}} \approx \text{lindningstäthet} \propto \left| \frac{d}{d\theta_r} F_{\max} \cos(\theta_r) \right| \propto |\sin(\theta_r)|$$

—— Roterande mmk-vågor ——

Roterande mmk-vågor i växelströmsmaskiner - en fas



Antag att vi matar a-lindningen med en växelström

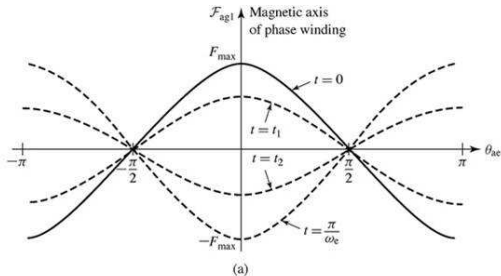
$$i_a = I_a \cos \omega_e t$$

där ω_e är den elektriska vinkelhastigheten samt att strömmen genererar en sinusformig mmk. Då får vi

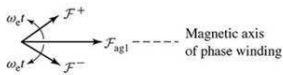
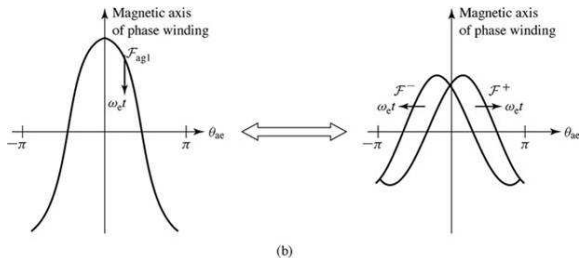
$$\mathcal{F}_{ag1} = F_{\max} \cos \theta_{ae} \cos \omega_e t$$

där θ_{ae} är elektriska radianer.

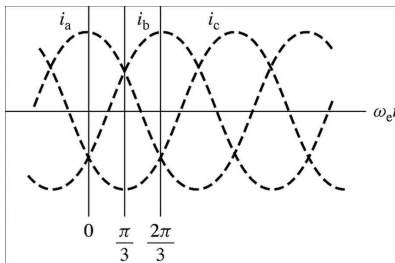
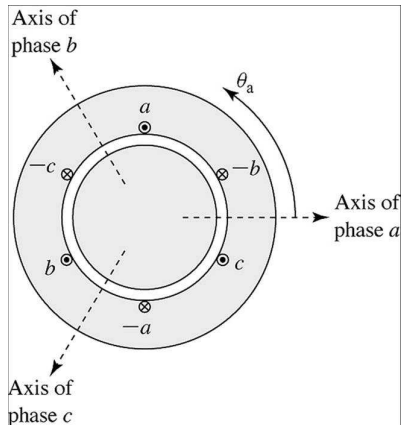
Roterande mmk-vågor i växelströmsmaskiner



En stående våg $\mathcal{F}_{ag1}$ kan delas upp i två vågor med fix amplitud $F_{max}/2$ som rör sig i motsatta riktningar.



Roterande mmk-vågor i trefas växelströmsmaskiner



Fas på strömmar och magnetaxlarna:

$$a : i_a = I_m \cos \omega_e t$$

$$\theta_{ae} = 0$$

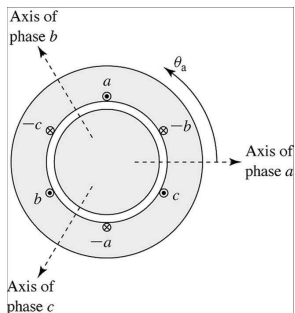
$$b : i_b = I_m \cos(\omega_e t - 2\pi/3)$$

$$\theta_{ae} = 2\pi/3$$

$$c : i_c = I_m \cos(\omega_e t - 4\pi/3)$$

$$\theta_{ae} = 4\pi/3$$

Roterande mmk-vågor i trefas växelströmsmaskiner



Genom att välja magnetaxlar och strömmar på detta sätt så kommer den resulterande mmk:n att bli

$$\mathcal{F}(\theta_a, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos \left(\left(\frac{p}{2} \right) \theta_a - \omega_e t \right)$$

Detta beskriver en roterande våg med amplitud $\frac{3}{2} F_{\max}$ som rör sig moturs med vinkelhastighet ω_e .

Den består av summan av de tre vågorna med amplitud $\frac{1}{2} F_{\max}$ som rör sig moturs, emedan de tre vågorna som rör sig medurs ligger ur fas och tar ut varandra.

Ekvivalent fält

Animationen

<http://www.ece.umn.edu/users/riaz/animations/abcvec.html>

visar att en stator matad med en balanserad trefasström med amplitud I_a och vinkelhastighet ω_{me} , ger upphov till samma fält som att mekaniskt rotera statorn med synkronhastigheten $\omega_m = \frac{2}{p}\omega_{me}$ då endast en av lindningarna är matad med en likström på $1.5I_a$.

—— Inducerade spänningar och moment ——

Inducerade spänningar och moment genom kretsanalogi

Med kretsanalogin kommer vi att härleda tre ekvationer som givet strömmen i rotorn i_r och statorn i_s och vinkeln θ_{me} bestämmer spänningen över rotorn v_r , statorn v_s och momentet T .

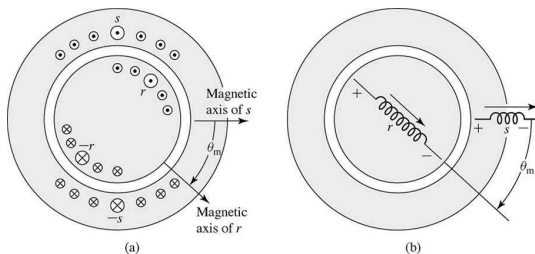
Vi börjar med att härleda uttryck för spänningarna.

Minns:

- ▶ $\lambda = L(\theta)i$
- ▶ $e = \frac{d\lambda}{dt}$

Förutsättningar

Ström enligt markering antas ge ett huvudflöde genom luftgapet i pilens riktning.



Antaganden

- ▶ cylindrisk rotor där inverkan av spår är försumbar
- ▶ reluktansen i stator och rotorn är försumbar
- ▶ sinusformad mmk-våg

Konsekvenser

- ▶ Självinduktansen för rotorn L_{rr} och statorn L_{ss} är konstant.
- ▶ Ömseinduktansen kan tecknas $\mathcal{L}_{sr}(\theta_{me}) = L_{sr} \cos \theta_{me}$.

Spänningarna över statorn och rotorn

Samband mellan strömmar och sammanlänkade flöden är:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & \mathcal{L}_{sr}(\theta_{me}) \\ \mathcal{L}_{sr}(\theta_{me}) & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}$$

Spänningarna över lindningarna ges av

$$v_s = R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt}$$
$$v_r = R_r i_r + \frac{d\lambda_r}{dt}$$

Eliminering av de sammanlänkade flödena ger

$$v_s = R_s i_s + L_{ss} \frac{di_s}{dt} + \frac{d}{dt} \mathcal{L}_{sr}(\theta_{me}) i_r$$
$$v_r = R_r i_r + L_{rr} \frac{di_r}{dt} + \frac{d}{dt} \mathcal{L}_{sr}(\theta_{me}) i_s$$

Spänningarna över statorn och rotorn

$$\begin{aligned} v_s &= R_s i_s + L_{ss} \frac{di_s}{dt} + L_{sr} \frac{di_r}{dt} \cos \theta_{me} \quad \overbrace{-L_{sr} i_r \omega_{me} \sin \theta_{me}}^{\text{spänning e inducerad pga rotation}} \\ v_r &= R_r i_r + L_{rr} \frac{di_r}{dt} + L_{sr} \frac{di_s}{dt} \cos \theta_{me} - L_{sr} i_s \omega_{me} \sin \theta_{me} \end{aligned}$$

Den sista termen svarar för den elektromekaniska energiomvandlingen och är proportionell mot rotorns vinkelhastighet.

Elektrisk effekt som omvandlas till mekanisk effekt i statorlindningen:

$$P = e i_s$$

Moment

Härnäst kommer vi att härleda ett uttryck för momentet T givet strömmen i rotorn i_r och statorn i_s och vinkeln θ_{me} .

Momentet ges av den partiella derivatan av fältenergin med avseende på vinkel

$$T = \left. \frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial \theta_m} \right|_{i_s, i_r} = \left. \frac{p}{2} \theta_m \right|_{i_s, i_r} = \left. \frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial \theta_{me}} \right|_{i_s, i_r} \frac{d\theta_{me}}{d\theta_m} = \frac{p}{2} \left. \frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial \theta_{me}} \right|_{i_s, i_r}$$

För detta behöver vi teckna energin i systemet

$$W_{\text{fld}} = \frac{1}{2} L_{ss} i_s^2 + \frac{1}{2} L_{rr} i_r^2 + L_{sr} i_s i_r \cos \theta_{me}$$

Detta ger att

$$T = -\frac{p}{2} L_{sr} i_s i_r \sin \theta_{me}$$

Minustecknet indikerar att momentet verkar för att likrikta magnetfälten.

Moment för trefas synkronmaskin

För en p -polig motor med synkronvarvtal

- ▶ statorn matas med balanserad trefasström med amplitud I_a
- ▶ rotorn med likström I_f

erhålls momentet

$$T = -\frac{p}{2} \frac{3}{2} L_{sr} I_a I_f \sin \theta_{me}$$

—— Att ta med sig från föreläsningen ——

Att ta med sig från föreläsningen

1. Grundläggande koncept: poler, elektrisk/mechanisk vinkelhastighet
2. Sinusfördelad mmk i luftgapet genom utbredda lindningar.
3. De tre fasernas resulterande stående vågor genererar en roterande mmk-våg.
4. Rotationen inducerar spänningar i lindningarna som möjliggör elektromekanisk energiomvandling.
5. Moment genereras av vinkelskillnaden mellan två mmk-vågor.