

TSFS04, Elektriska drivsystem, 6 hp

Föreläsning 9 - Induktions/Asynkron-maskinen

Mattias Krysander

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

2012-02-21

Dagens föreläsning

- ▶ Introduktion
- ▶ Kretsmodellering
- ▶ Effektflöde
- ▶ Parametrisering baserad på tomgångsprov samt prov med låst rotor.

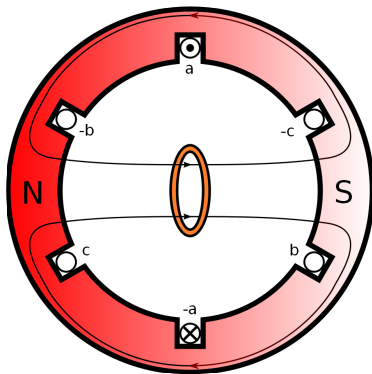
— Einführung —

Asynkronmotorns popularitet beror på

- ▶ självstartande
- ▶ robust och pålitlig
- ▶ billig i inköp och underhåll
- ▶ standardiserad, det går enkelt att byta motor av olika fabrikat

Asynkronmotorn - funktionsprincip

- ▶ Som synkronmaskinen fast rotorn består av en kortsluten ledare 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 vinkelhastigheten var något lägre, därav namnet asynkronmotor.



Rotorkonstruktion

Det finns två typer av rotorkonstruktioner

- ▶ Släpringade maskiner/Lindning med släpring
Lindad med samma antal poler som statorlindningarna.
Ändarna på lindningarna är anslutna till isolerade släpringar
varför rotorspänningarna är tillgängliga utanför maskinen.
- ▶ Kortslutna maskiner/Burlindning
Ledande stänger nersänkta i spår i rotorjärnet. Stängerna
kortsluts på rotorcyklernas basytor.

Burlindningen är helt dominerande tack vare sin enkelhet.



Eftersläpning/slipp

Vid belastning är rotorns mekaniska vinkelhastighet ω_m mindre än fältets (mekaniska) vinkelhastighet ω_s (relativt statorn) som kallas för den synkrona vinkelhastigheten.

Relativa eftersläpning (fractional slip) eller bara eftersläpning definieras som

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$$

Vinkelhastigheten som fältet rör sig med i förhållande till rotorn är

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m$$

Förhållandet mellan vinkelhastigheterna kan uttryckas med slippet som

$$\omega_r = s\omega_s$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_s$$

Normalt är $2\% \leq s \leq 6\%$ men vid start är $s = 1$.

Statorns och rotns elektriska vinkelhastigheter

Antag en motor med p poler där rotorströmmen har vinkelhastighet ω_e och slippet är s . Vad är rotns elektriska vinkelhastighet ω_{re} ?

Den mekaniska vinkelhastigheten som flödet roterar med relativt rotn är ω_r och då inducerar det en spänning med vinkelhastighet

$$\begin{aligned}\omega_{re} &= \frac{p}{2}\omega_r = / \omega_r = s\omega_s / = \\ &= \frac{p}{2}s\omega_s = / \omega_s = \frac{2}{p}\omega_e / = \\ &= s\omega_e\end{aligned}$$

Alltså, den elektriska vinkelhastigheten/frekvensen i rotn är slippet multiplicerat med den elektriska vinkelhastigheten/frekvensen i statorn.

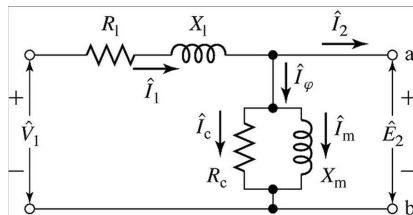
— Kretsmodellering —

Kretsmodellering

Vi söker en modell av en asynkronmotor per ekvivalent Y-fas som givet en elektrisk vinkelhastighet ω_e (typiskt motsvarande märkfrekvens) på statorspänningen relaterar fasspänning $\hat{V}_1$ och linjeströmmen $\hat{I}_1$ med den elektromekaniska effektomvandling P_{mech} och rotorns mekaniska vinkelhastighet ω_m .

Statormodell

Statorkretsen modelleras exakt som primärsidan på en transformator. Reaktanserna anges för ω_e :



$\hat{I}_c$ - ström till järnförlust

R_c - magnetiseringsresistans

$\hat{I}_m$ - magnetiserande ström

X_m/L_m - magnetiseringsreaktans/induktans

$\hat{E}_2$ - inducerad spänning av det resulterande luftgapsflödet

$\hat{V}_1$ - fasspänningen

$\hat{I}_1$ - statorström

R_1 - statorns resistans

X_1 - statorns läckreaktans

$\hat{I}_2$ - lastström

$\hat{I}_\varphi$ - tomgångsström

Det totala luftgapsflödet och inducerade spänningar

Det resulterande luftgapsflödet kan skrivas

$$\hat{\Lambda}_r = L_m \hat{I}_m$$

Den av luftgapsflödet inducerade spänningen i statorn $\hat{E}_2$ kan tecknas

$$\hat{E}_2 = j\omega_e \hat{\Lambda}_r = j\omega_e L_m \hat{I}_m = jX_m \hat{I}_m$$

Den av luftgapsflödet inducerade spänningen i rotorn kan tecknas

$$\begin{aligned} j\omega_{re} \hat{\Lambda}_r &= j\omega_{re} L_m \hat{I}_m = / \omega_{re} = s\omega_e / = \\ &= s \underbrace{j\omega_e L_m \hat{I}_m}_{=\hat{E}_2} = s\hat{E}_2 \end{aligned}$$

Rotormodell

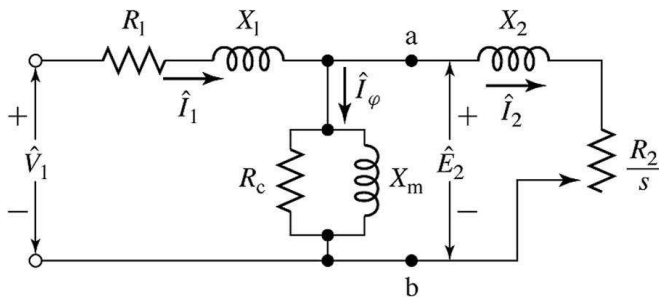
Den inducerade spänningen $s\hat{E}_2$ i rotorn fördelas över rotorns lindningsresistans R_2 och läckinduktans L_2 refererad till statorsidan:

$$\begin{aligned} s\hat{E}_2 &= \hat{I}_2(R_2 + j\omega_{re}L_2) = / \omega_{re} = s\omega_e / = \\ &= \hat{I}_2(R_2 + js\omega_e L_2) = \hat{I}_2(R_2 + jX_2) \end{aligned}$$

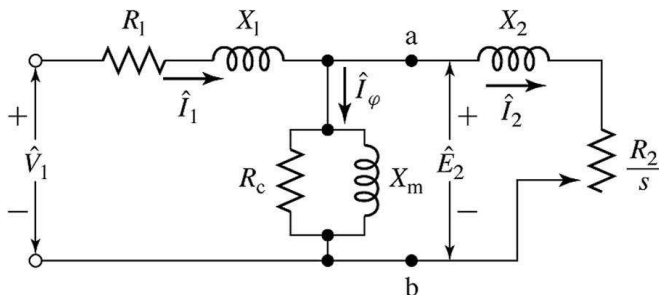
I statorkretsen ska en ekvivalent rotorkrets med spänning $\hat{E}_2$ och ström $\hat{I}_2$ infogas. Delas rotorekvationen med s erhålls

$$\hat{E}_2 = \hat{I}_2\left(\frac{R_2}{s} + jX_2\right)$$

vilket ger



Elektrisk modell av asynkronmaskinen



Alla strömmar och spänningar är hänfödda till statorsidan och alla har samma vinkelhastighet ω_e .

Det går inte att beräkna rotorströmmen från modellen eftersom det effektiva lindningstalet inte normalt sätt är känt.

Vid analys baserad på modellen är det viktigt för noggrannheten att använda värden på resistanser och reaktanser för liknande arbetsområde (lindningstemperatur, mättningsgrad).

Elektromekaniska kopplingen sker i R_2/s . Det ska vi studera nu.

—— Effekt och moment ——

Statorns effektförbrukning

Statorns effektförbrukning i en motor med n_{ph} faser är

$$P_{in} = P_{R1} + P_{core} + P_{gap}$$

där

- ▶ P_{in} är elektriska ineffekten

$$P_{in} = n_{ph} V_1 I_1 \cos \phi_1$$

- ▶ P_{R1} är resistiva förluster i statorlindningen kopplad till resistansen R_1 enligt:

$$P_{R1} = n_{ph} I_1^2 R_1$$

- ▶ P_{core} är ommagnetiseringsförluster eller järnförluster kopplade till R_c enligt:

$$P_{core} = n_{ph} \frac{E_2^2}{R_c}$$

- ▶ P_{gap} är effekten som levereras över luftgapet

$$P_{gap} = n_{ph} E_2 I_2 \cos \phi_2 = n_{ph} \frac{R_2}{s} I_2^2$$

Rotorns effektlöde

Rotorns effektlöde ges av

$$P_{\text{gap}} = P_{\text{rotor}} + P_{\text{mech}}$$

där $P_{\text{rotor}} = P_{R2}$ är effektförlusten i rotorlindningen och P_{mech} den elektromekaniska effektomvandlingen.

Från den ekvivalenta kretsen fås

$$P_{\text{gap}} = n_{ph} I_2^2 \frac{R_2}{s} \qquad P_{\text{rotor}} = n_{ph} I_2^2 R_2$$

vilket ger att den elektromekaniska effektomvandlingen är

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{gap}} - P_{\text{rotor}} = n_{ph} I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}$$

Effekterna i rotorn fördelas alltså enligt

$$P_{\text{mech}} = (1-s)P_{\text{gap}} \qquad P_{\text{rotor}} = sP_{\text{gap}}$$

Rotorförlusten är proportionell mot slippet.

Elektromekanisk effektomvandling

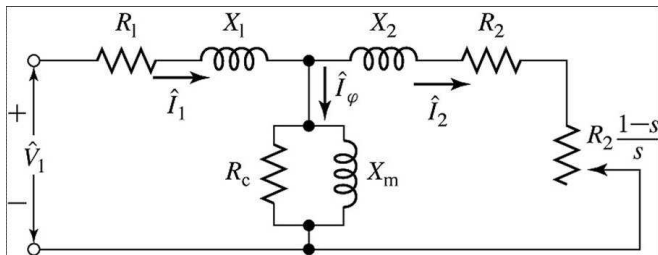
Genom att dela upp R_2/s i kretsen till R_2 resp.

$$R_2 \frac{1-s}{s}$$

så kan effekten levererad till R_2 tolkas som de resistiva förlusterna i rotorn och effekten levererad till

$$R_2 \frac{1-s}{s}$$

som den elektromekaniska effektomvandlingen.



Mekanisk uteffekt/moment

Det elektromekaniska momentet ges av

$$\begin{aligned} T_{\text{mech}} &= \frac{P_{\text{mech}}}{\omega_m} = P_{\text{mech}} / (1 - s)\omega_s = (1 - s)P_{\text{gap}} / (1 - s)\omega_s = \\ &= \frac{P_{\text{gap}}}{\omega_s} = n_{ph} I_2^2 \frac{R_2}{s\omega_s} \end{aligned}$$

Momentet/effekten på den utgående axel kan uttryckas

$$T_{\text{shaft}} = T_{\text{mech}} - T_{\text{rot}} \qquad P_{\text{shaft}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rot}}$$

där T_{rot} och P_{rot} inkluderar friktion, ventilation, samt eventuella tillsatsförluster.

Ibland kan även järnförlusterna inkluderas i P_{rot} och den ekvivalenta kretsen förenklas i detta fall genom att ta bort R_c .

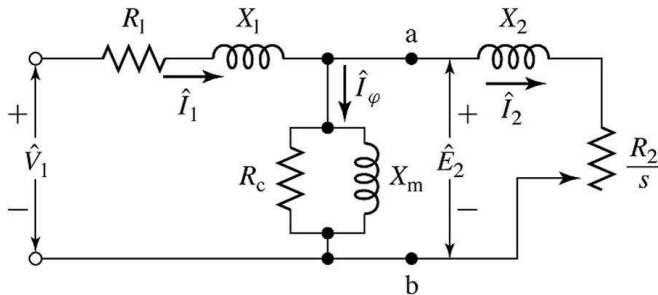
—— Parametrisering av modellen ——

Parametrisering av modellen

Modellens parametrar bestäms baserat på data från

- ▶ ett tomgångsprov
- ▶ ett prov med låst rotor, samt
- ▶ mätning av statorns lindningsresistans R_1

I analysen kommer järnförlusterna att inkluderas i rotationsförlusterna P_{rot} och därmed utgår resistansen R_c ur kretsen nedan:



Tomgångsprov

Tomgångsprovet ger information om motorns magnetiseringsström samt tomgångsförlust.

Provet utförs normalt genom att lägga en balanserad multifasspänning över statorterminalen. Märkspänning samt märkfrekvens används oftast.

Mätningarna utförs när motorn är obelastad, varmkörd och lagren har smorts ordentligt.

Mätsignaler:

- ▶ $V_{1,nl}$ = fasspänning (No Load) [V]
- ▶ $I_{1,nl}$ = linjeström [A]
- ▶ P_{nl} = den totala elektriska ineffekten [W]

Tomgångsförlusten

Ineffekten är:

$$P_{\text{in}} = P_{R1} + P_{R2} + P_{\text{rot}} + P_{\text{shaft}}$$

För tomgångsfallet gäller att

- ▶ $P_{R2} \approx 0$ eftersom strömmen i rotorn liten.
- ▶ $P_{\text{shaft}} = 0$ eftersom motorn är obelastad.

dvs

$$P_{\text{nl}} = P_{R1} + P_{\text{rot}}$$

Rotationsförlusterna blir

$$P_{\text{rot}} = P_{\text{nl}} - n_{\text{ph}} I_{1,\text{nl}}^2 R_1$$

Notera att R_1 varierar med temperatur varför resistansen bör mätas direkt efter körningen.

Rotationsförlusterna antas ofta vara oberoende av last.

Tomgångsreaktansen

Tomgångsimpedansen kan approximeras till

$$\begin{aligned} Z_{nl} &= R_1 + jX_1 + (jX_m // (\frac{R_2}{s_{nl}} + jX_2)) \approx \\ &\approx /s_{nl} \text{ liten} \Rightarrow \frac{R_2}{s_{nl}} \text{ stor} / \approx \\ &\approx R_1 + j(X_1 + X_m) \end{aligned}$$

Tomgångsreaktansen är alltså approximativt

$$X_{nl} = X_1 + X_m$$

som kan beräknas från mätdata mha sambanden:

$$X_{nl} = \frac{Q_{nl}}{n_{ph} I_{1,nl}^2}, \quad Q_{nl} = \sqrt{S_{nl}^2 - P_{nl}^2}, \quad S_{nl} = n_{ph} V_{1,nl} I_{1,nl} \quad (1)$$

Prov med låst rotor

Prov med låst rotor ger information om läckimpedanserna.

Provet utförs genom att låsa fast rotorn så att slippet är $s = 1$ samt att lägga en balanserad multifasspänning över statorterminalen.

Mätningarna utförs med en ström och frekvens som motsvarar den ström och frekvens som prestandan sedan ska utvärderas i.

- ▶ För att analysera startförhållande $s = 1$, normal startfrekvens och startström.
- ▶ För att analysera normal stationär drift (s litet), minska frekvensen till ca 25% av märkfrekvens samt spänningen så att märkström flyter i statorlindningen.

Mätsignaler:

- ▶ $V_{1,bl}$ = fasspänning (Blocked Rotor) [V]
- ▶ $I_{1,bl}$ = linjeström [A]
- ▶ P_{bl} = den totala elektriska ineffekten [W]
- ▶ f_{bl} = elektrisk frekvens vid provet [Hz]

Impedansen för fallet med låst rotor

Resistansen R_{bl} samt reaktansen X_{bl} vid märkfrekvens $f_{e,\text{rated}}$ för mätfallet kan beräknas från mätdata.

Resistansen är

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{n_{ph} I_{1,bl}^2} \quad (2)$$

Reaktansen vid märkfrekvens är

$$X_{bl} = \left(\frac{f_{e,\text{rated}}}{f_{bl}} \right) \left(\frac{Q_{bl}}{n_{ph} I_{1,bl}^2} \right), \quad Q_{bl} = \sqrt{S_{bl}^2 - P_{bl}^2}, \quad S_{bl} = n_{ph} V_{1,bl} I_{1,bl} \quad (3)$$

Impedansen för fallet med låst rotor uttryckt i modellparametrar

Impedansen vid låst rotor $s_{bl} = 1$ är

$$\begin{aligned} Z_{bl} &= R_1 + jX_1 + (jX_m // (R_2 + jX_2)) = \\ &= \left/ Z_t = \frac{|Z_1|^2 Z_2 + |Z_2|^2 Z_1}{|Z_1 + Z_2|^2} \right/ = \\ &= R_1 + jX_1 + \frac{X_m^2(R_2 + jX_2) + (R_2^2 + X_2^2)jX_m}{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2} = \\ &= R_1 + R_2 \frac{X_m^2}{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2} + j \left(X_1 + \frac{X_m^2 X_2 + (R_2^2 + X_2^2)X_m}{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2} \right) = \\ &= \left/ R_2^2, R_2 \ll X_m \right/ = \underbrace{R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2}_{=R_{bl}} + j \underbrace{\left(X_1 + X_2 \frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)}_{=X_{bl}} \end{aligned}$$

Parameterbestämning

Det sista sambandet som krävs för att bestämma X_1 , X_2 , X_m , R_2 är:

$$X_1 = kX_2$$

där konstanten k kan beräknas enligt IEEE Standard 112:

Motorklass	Beskrivning	$\frac{X_1}{X_1+X_2}$	$\frac{X_2}{X_1+X_2}$
A	Normalt startmoment och startström	0.5	0.5
B	Normalt startmoment, låg startström	0.4	0.6
C	Högt startmoment, låg startström	0.3	0.7
D	Högt startmoment, stort slip	0.5	0.5
Lindad rotor		0.5	0.5

Om motorklassningen är okänd används oftast att $X_1 = X_2$.

Parameterbestämning

Sammanfattningsvis så kan R_1 bestämmas direkt från mätning.
Reaktanserna X_1 , X_2 och X_m löses ut ur

$$X_1 = kX_2$$

$$X_{nl} = X_1 + X_m$$

$$X_{bl} = X_1 + X_2 \frac{X_m}{X_2 + X_m}$$

och R_2 bestäms slutligen ur

$$R_{bl} = R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2 \Leftrightarrow R_2 = (R_{bl} - R_1) \left(\frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2 \quad (4)$$

Lösning av ekvationssystemet då $X_1 = X_2$

$$X_2 = X_1 \quad (5)$$

$$X_{nl} = X_1 + X_m \quad (6)$$

$$X_{bl} = X_1 + X_2 \frac{X_m}{X_2 + X_m} \quad (7)$$

Substitution av X_2 från (5) och X_m från (6) i (7) ger

$$X_1 = X_{nl} \pm \sqrt{X_{nl}^2 - X_{nl}X_{bl}} \quad (8)$$

Notera att (6) ger att $X_1 < X_{nl}$ varför den mindre av de två lösningarna är den sökta. De andra reaktanserna ges av (5) och (6) enligt:

$$X_2 = X_1 \quad (9)$$

$$X_m = X_{nl} - X_1 = X_{nl} - kX_2 \quad (10)$$

Bestämning av motorparametrarna steg för steg

1. Gör tomgångsprov och mät $V_{1,nl}$, $I_{1,nl}$, P_{nl}
2. Mät R_1
3. Gör prov med låst rotor och mät $V_{1,bl}$, $I_{1,bl}$, P_{bl} , f_{bl}
4. Beräkna X_{nl} med (1)
5. Beräkna R_{bl} med (2)
6. Beräkna X_{bl} med (3)
7. Bestäm k i $X_1 = kX_2$ enligt tabell om motorklassen är känd, annars använd $k = 1$.
8. Beräkna X_1 med (8)
9. Beräkna X_2 med (9)
10. Beräkna X_m med (10)
11. Beräkna R_2 med (4)

Sammanfattning

- ▶ Rotor burlindad eller släpringad.
- ▶ Rotorn roterar ej i synkron vinkelhastighet, ty $\omega_m = \omega_s(1 - s)$.
- ▶ Kretsmodellering genom generaliserad transformator.
- ▶ Effekt ges av den ekvivalenta kretsen.
- ▶ Parametrisering baserad på tomgångsprov samt prov med låst rotor.