

Elektriska drivsystem

Föreläsning 9 - Induktions/Asynkron-maskinen

Mattias Krysander

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

2010-11-25

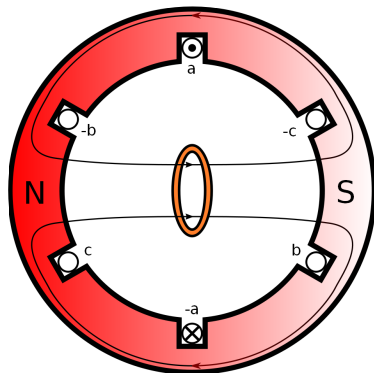
Dagens föreläsning

- ▶ Introduktion
- ▶ Strömmar och flöden i induktionsmaskiner
- ▶ Kretsmodellering
- ▶ Effekt och moment
- ▶ Parametrisering baserad på tomgångsprov samt prov med låst rotor.
- ▶ Moment-varvtalskaraktäristik

— Introdution —

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 helt dominerande tack vare sin enkelhet.



Eftersläpning/slipp

Vid belastning är rotorns mekaniska vinkelhastighet ω_m mindre än fältets vinkelhastighet ω_s 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

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

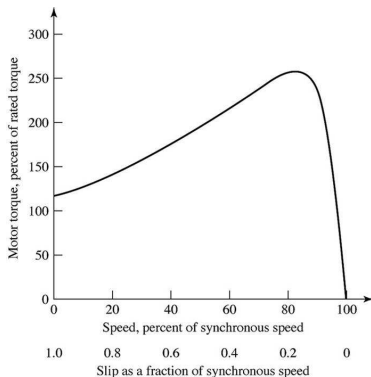
Förhållandet mellan vinkelhastigheterna kan uttryckas med slippet som

$$\omega_r = s\omega_s$$

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

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

Karaktäriserande egenskaper

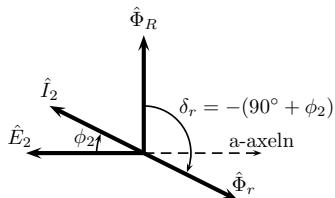
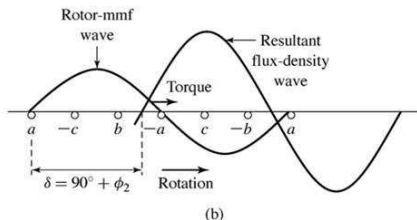
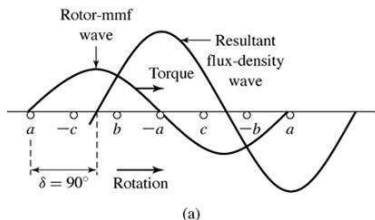


Vi kommer visa att:

- ▶ För små slipp är momentet approx. proportionellt mot slippet.
- ▶ Det finns ett maximalt moment som är ca 2 ggr större än märkmoment.
- ▶ Maxmomentet antas vid ett slipp som är proportionellt mot resistansen i statorlindningen.

—— Strömmar och flöden ——

Mmk i släpningade maskiner



Ekvationen för rotorn:

$$\hat{E}_2 = \hat{I}_2(R_2 + j \overbrace{\omega_s S} = \omega_r L_2)$$

Då s är liten, så är effektfaktorvinkeln ϕ_2 liten.

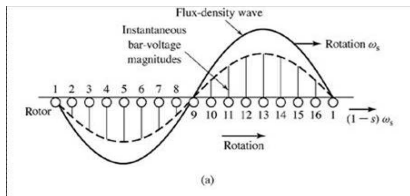
Då är lastvinkeln $\delta_r = -90^\circ$ vilket maximerar momentet enligt

$$T = -K\Phi_R I_2 \sin \delta_r$$

Vid större slipp blir lastvinkeln mer negativ och momentet avtar.

Mmk i burlindande maskiner

Spänningen inducerad i stavarna

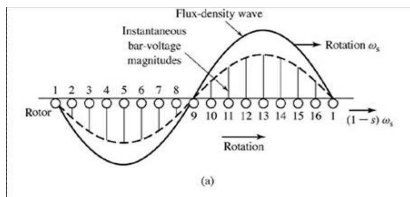


Storleken av den inducerade spänningen kan inses genom att applicera en variant av Lorentz lag. Låt \hat{x} peka åt höger, \hat{y} uppåt och \hat{z} utåt. Fixera origo så att det följer med vågen och betrakta inducerad spänning i en stav i position x med längd h . Den inducerade spänningen som räknas positiv om den bortre ändan har högre potential ges av

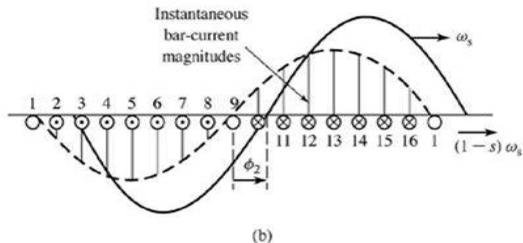
$$E(x) = \int_{\text{framända}}^{\text{bortända}} (-\omega_r r \hat{x} \times B(x) \hat{y}) \cdot -\hat{z} dz = \omega_r r B(x) h$$

Mmk i burlindande maskiner

Spänningen inducerad i stavarna



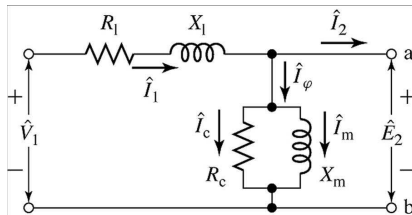
Om effektfaktorvinkeln i rotorlindningen är ϕ_2 så ges strömmen av



— Kretsmodellering —

Statormodell

Statorkretsen modelleras exakt som primärsidan på en transformator:



\hat{V}_1 - fasspänningen
 \hat{I}_1 - statorström
 R_1 - statorns resistans
 X_1 - statorns läckreaktans
 \hat{I}_2 - lastström
 \hat{I}_φ - tomgångsström

\hat{I}_c - ström till järnförlust

R_c - magnetiseringsresistans

\hat{I}_m - magnetiserande ström

X_m - magnetiseringsreaktans

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

Återstår att modellera rotorn.

Rotormodell - ekvivalent krets

Antag först att slippet är $s = 1$. Då är $\omega_r = \omega_s$ och rotorn kan modelleras som

$$\hat{E}_2 = \hat{I}_2(R_2 + \underbrace{j\omega_s L_2}_{=: X_2})$$

där R_2 och X_2 är rotorns resistans resp. läckreaktans hänförd till statorsidan vid ω_s .

Anta nu att s är fri och att rotorn beskrivs av $\hat{E}_{2s} = \hat{I}_2(R_2 + jX_{2s})$. Sätt vi in att läckreaktansen är

$$X_{2s} = \omega_r L_2 = / \omega_r = s\omega_s / = s\omega_s L_2 = sX_2$$

samt att den inducerade spänningen är

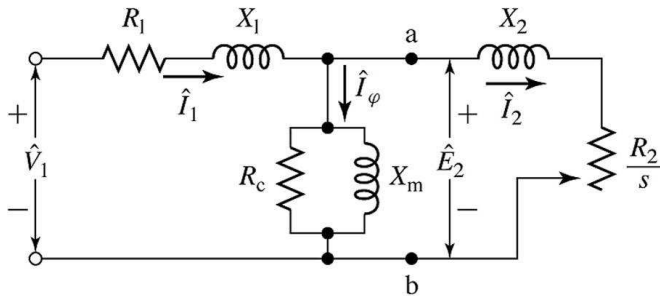
$$\hat{E}_{2s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \hat{E}_s = / \omega_r = s\omega_s / = s\hat{E}_2$$

så får vi att

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

Efasmodell av induktionsmaskin

Den ekvivalenta kretsen för en induktionsmotor.



Alla storheter är hänfödda till statorsidan och alla har samma vinkelhastighet ω_s .

Det går inte att beräkna statorströmmen 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, mätningsgrad).

— Effekt och moment —

Elektromekanisk effekt

Låt P_{gap} vara effekten som överförs till rotorn, P_{rotor} effektförlusten i rotorlindningen, P_{mech} den mekaniska effekten, samt n_{ph} totalt antal statorfaser.

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 mekaniska effekten 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 effekt

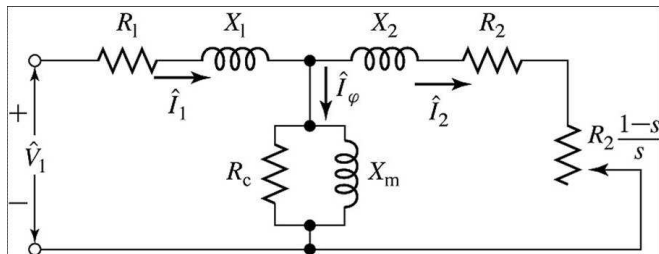
Genom att dela upp R_2/s i kretsen till R_2 resp.

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

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 effekten.



Elektromekaniskt moment

Det elektromekaniska momentet ges av

$$\begin{aligned} T_{\text{mech}} &= \frac{P_{\text{mech}}}{\omega_m} = P_{\text{mech}} / \omega_m = (1 - s)P_{\text{gap}}, \omega_m = (1 - s)\omega_s / = \\ &= \frac{P_{\text{gap}}}{\omega_s} = n_{ph} l_2^2 \frac{R_2}{s\omega_s} \end{aligned}$$

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.

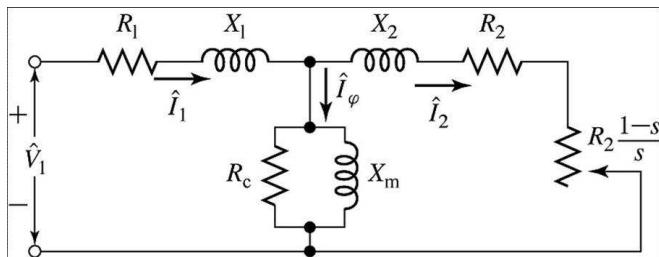
Ibland kan även järnförlusterna inkluderas i P_{rot} och den ekvivalenta kretsen förenklas i detta fall genom att ta bort R_C .

Härnäst ska vi eliminera l_2 i momentuttrycket och ersätta det med en funktion av terminalspänning.

Moment

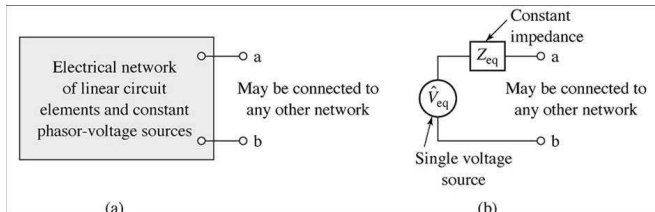
Vi ska härleda ett momentuttryck som funktion av terminalspänning istället för strömmen genom rotorrenen.

Egentligen bara att räkna på, men för att få ett snyggt uttryck som vi kan analysera kommer vi att försumma R_c .

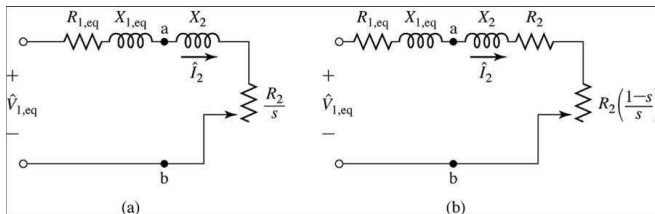


Förenkling av statorsidan

Thevins sats:

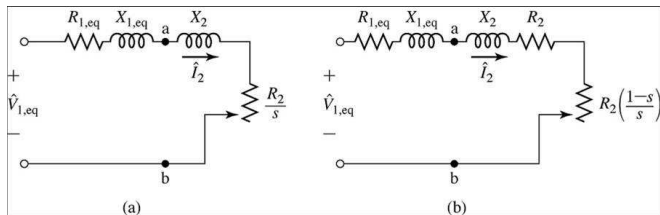


applicerad på statorsidan:



$$\hat{V}_{1,eq} = \hat{V}_1 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)}, \quad Z_{1,eq} = (jX_m // Z_1) = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

Moment



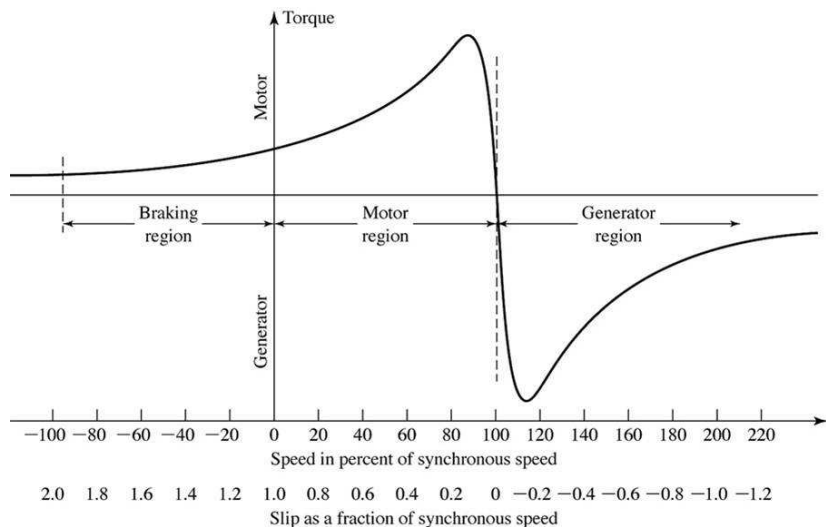
Ohms lag ger

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_{1,eq}}{Z_{1,eq} + R_2/s + jX_2}$$

Insättning av strömmen i momentformeln ger

$$T_{\text{mech}} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{ph} V_{1,eq}^2 (R_2/s)}{(R_{1,eq} + (R_2/s))^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} \right]$$

Momentkurvan



$$T_{\text{mech}} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{ph} V_{1,eq}^2 (R_2/s)}{(R_{1,eq} + (R_2/s))^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} \right]$$

Slipp som genererar maximalt moment

$$T_{\text{mech}} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{ph} V_{1,eq}^2 (R_2/s)}{(R_{1,eq} + (R_2/s))^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} \right]$$

Låt $\xi = R_2/s$, $K = \frac{1}{\omega_s} n_{ph} V_{1,eq}^2$. Då kan T_{mech} samt dess derivata skrivas

$$T_{\text{mech}}(\xi) = K \frac{\xi}{(R_{1,eq} + \xi)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$
$$\frac{dT_{\text{mech}}}{d\xi} = K \frac{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2 - \xi^2}{((R_{1,eq} + \xi)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2)^2}$$

Slippet som ger maximalt moment fås genom att lösa $dT_{\text{mech}}(\xi_{\text{max}})/d\xi = 0$ till

$$\xi_{\text{max}} = \frac{R_2}{s_{\text{maxT}}} = \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

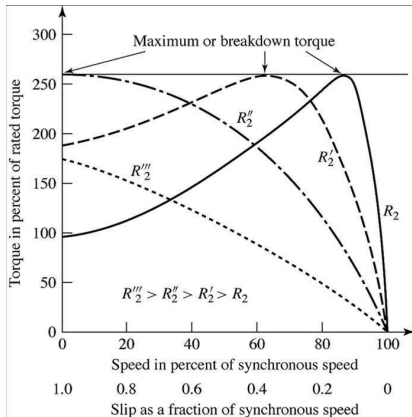
Maximalt moment

Sätter vi in det beräknade slippet i momentekvationen erhålls maxmomentet

$$T_{\text{mech}}(\xi_{\text{max}}) = \dots = \frac{1}{2\omega_s} \left[\frac{n_{ph} V_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}} \right]$$

Rotorresistansens inverkan på momentet

Som vi har satt tidigare kan momentet ses som en funktion av $\xi = R_2/s$. En ändring av R_2 kommer därför bara att skala momentkurvan längs slippaxeln



Speciellt gäller att maxmomentet är oberoende av R_2 men infaller för ett slipp proportionellt mot rotorlindningens resistans, $s = \frac{R_2}{\xi_{\max}}$.

Hastighet-momentkaraktäristik

Burlindade motorer har mer eller mindre konstant varvtal för given terminalspänning.

Vartalet på släpningade motorer kan styras genom att variera resistansen i rotorkretsen genom en externt inkopplad potentiometer.

Det blir naturligtvis förluster i potentiometern men förlusteffekten värmer i alla fall inte motorn.

Mer sofistikerad styrning i nästa föreläsning.

— Parametrisering —

Parametrisering

Nu ska vi se hur man kan bestämma modellens parametrar baserat på

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

Tomgångsprov

Tomgångsprovet ger information om magnetiseringsström samt tomgångsförluster.

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

Mätningarna utförs när motorn är varmkörd och lagren har smorts tillräckligt.

Mätsignaler:

- ▶ $V_{1,nl}$ = fasspänningen [V]
- ▶ $I_{1,nl}$ = fasströmmen [A]
- ▶ P_{nl} = den totala elektriska ineffekten [W]

Rotationsförluster

Rotationsförlusterna beräknas enligt

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

Här har återigen järnförlusterna räknats in i rotationsförlusterna.

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

Rotationsförlusterna antas ofta vara oberoende av last.

Järnförluster

Järnförluster kan skiljas från övriga rotationsförluster på två sätt.

1. Skatta rotationsförlusterna P'_{rot} (utan järnförluster inkluderade) genom att mäta den effekt som krävs för att dra runt motorn utan excitering i märkhastighet.
2. Om rotorns tröghetsmoment J är känd kan rotationsförlusterna skattas genom att köra motorn i märkhastighet för att sedan stänga av strömmen och mäta motorns inbromsning som då ska följa differentialekvationen

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = -T_{\text{rot}} = -\frac{P'_{\text{rot}}}{\omega_m}$$

Järnförluster

Har rotationsförlusterna bestämts så kan järnförlusterna beräknas enligt

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

och en enkel approximation på motsvarande resistans ges av

$$R_c = \frac{n_{ph} V_{1,nl}^2}{P_{\text{core}}}$$

Statorns självreaktans

Tomgångsimpedansen kan approximeras

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

Tomgångsreaktansen är alltså approximativt

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

som kan beräknas från mätdata mha sambanden:

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

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 multifassspänning 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.

Mätningar:

- ▶ $V_{1,bl}$ = fasspänningen [V]
- ▶ $I_{1,bl}$ = fasströmmen [A]
- ▶ P_{bl} = den totala elektriska ineffekten [W]
- ▶ f_{bl} = frekvensen vid provet [Hz]

Impedansen för fallet med låst rotor

Resistansen R_{bl} samt reaktansen X_{bl} vid märkfrekvens f_s för mätfallet kan beräknas från mätdata.

Resistansen är

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

Reaktansen vid märkfrekvens är

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

Impedansen för fallet med låst rotor uttryckt i modellparametrar

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

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

Bestämning av motorparametrarna

Ur sambanden tidigare kan R_2 beräknas som

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

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

samt X_2 ur

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

$$0 = (X_1 - X_{bl})(X_2 + X_m) + X_2 X_m \Leftrightarrow$$

$$(X_{bl} - X_1)X_m = (X_m + X_1 - X_{bl})X_2 \Leftrightarrow$$

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

Substitueras X_m med $X_m = X_{nl} - X_1$ fås

$$X_2 = (X_{bl} - X_1) \frac{X_{nl} - X_1}{X_{nl} - X_{bl}}$$

Bestämning av motorparametrarna steg för steg

Steg 0. Beräkna X_{nl} , X_{bl} och R_{bl} från mätdata.

Steg 1. Värdena på X_1 och X_2 går inte att identifiera från mätdata. Om motorklassen är känd (se tabell 6.1) så ges en faktor k så att

$$X_1 = kX_2$$

Om motorklassen är okänd så används $k = 1$ som standardvärde.

Steg 2. Substituera X_1 mha $X_1 = kX_2$ i

$$X_2 = (X_{bl} - X_1) \frac{X_{nl} - X_1}{X_{nl} - X_{bl}}$$

och beräkna X_2 . Beräkna därefter även X_1 .

Bestämning av motorparametrarna steg för steg

Steg 3. Beräkna $X_m = X_{nl} - X_1$

Steg 4. Beräkna R_2 genom att sätt in i

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

— Moment-varvtalskaraktäristik —

Valet av rotorresistans

Valet av rotorresistansen R_2 en kompromiss:

- ▶ Hög effektivitet kräver litet R_2 .

$$\nu < \nu_{\text{rotor}} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{gap}}} = 1 - s$$

För fixt moment T_{mech} gäller att $s = \xi^{-1}R_2$ för någon konstant ξ , dvs

$$\nu < \nu_{\text{rotor}} = 1 - \xi^{-1}R_2$$

- ▶ Hög startmoment kräver stort R_2 .

Önskvärt: R_2 stor vid höga slipp och liten vid låga slipp.

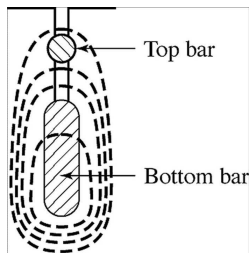
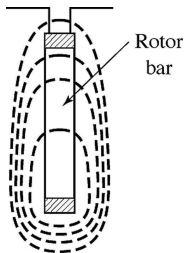
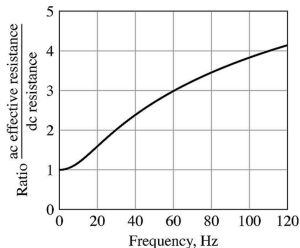
Släpringade motorer

För släpringade motorer kan resistansen varieras med en extern potentiometer så både bra startmoment och hög effektivitet kan uppnås.

Nackdelen med en släpringad motor är den höga kostnaden och komplexiteten i rotorn i jämförelse med en burlindand rotor.

Burlindade motorer

Även en rättkonstruerade burlindade motorer kan uppvisa en rotorresistans som varierar enligt nedan

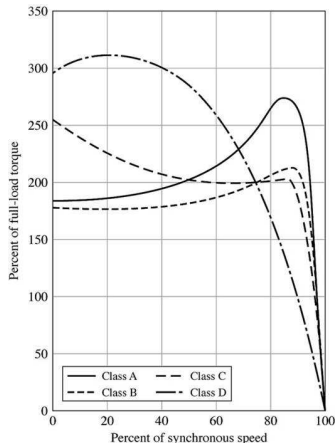


Den effektiva resistansen ökar med frekvens eftersom allt större del av strömmen tvingas upp i de övre skickten av stängerna pga induktiva effekter.

I den vänstra konstruktion används djupa stavar, i den högra dubbel bur.

Typiska moment-varvtalskurvor för burlindade motorer

Klasser:



- A Normalt startmoment, normal startström, lite slipp, R_2 liten, enkelbur.
- B Normalt startmoment, låg startström, lite slipp, dubbel bur eller djupa stavar.
- C Högt startmoment, låg startström, dubbelbur eller djupa stavar med lite större R_2 än i B.
- D Högt startmoment, mycket slipp. Enkelbur ofta av mässing med hög resistans.

Sammanfattning

- ▶ Byggd som bur eller släpringad.
- ▶ Rotorn roterar asynkront med statorströmmarna,
 $\omega_s = \omega_m + \omega_r$, slipp $\omega_r = s\omega_s$.
- ▶ Inducerade strömmar i rotorn ger upphov till en mmk-våg $90^\circ + \phi_2$ efter den resulterande mmk-vågen.
- ▶ Kretsmodellering som en generaliserad transformator.
- ▶ Effekt och moment ges av den ekvivalenta kretsen.
- ▶ Parametrisering baserad på tomgångsprov samt prov med låst rotor.
- ▶ För att få både bra startmoment och hög effektivitet krävs varierande rotorresistans något som kan uppnås både med burlindning och för släpringade motorer.