TSFS04, Elektriska drivsystem, 6 hp
Föreläsning 7 - Synkronmaskinen

Andreas Thomasson

Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet
andreas.thomasson@isy.liu.se

2018-02-07

Dagens föreläsning

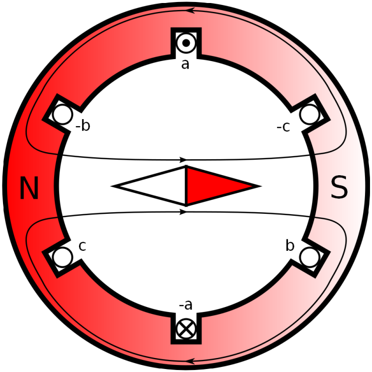
- Repetition av synkronmaskinen
- Modellering
- Parametrisering

Repetition av synkronmaskinen

Synkronmotorn - repetition

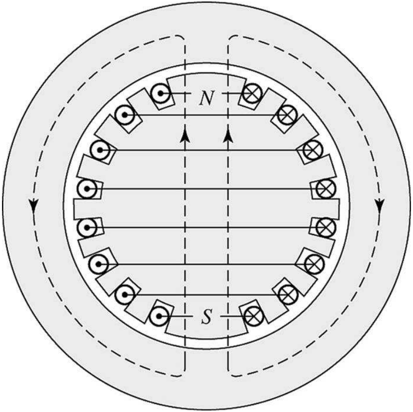
Karaktäriserande drag:

- Rotorn fix polaritet, pm eller likströmsspole.
- Statorn genererar roterande magnetfält.
- Trefasmaskinen i sitt enklaste utförande har 3 lindningar: a, b och c.
- Rotorn roterar synkront med flödet, därav namnet.



Synkronmaskinen - konstruktionsprinciper

Tvåpolig cylindrisk rotor med utbredda lindningar:



Vi kommer att studera maskiner med cylindrisk rotor.

Moment-lastvinkelkaraktäristik

Momentet ges av:

$$T = \frac{\pi}{2}\left(\frac{p}{2}\right)^2 \Phi_R F_f \sin\delta_{\mathrm{RF}}$$

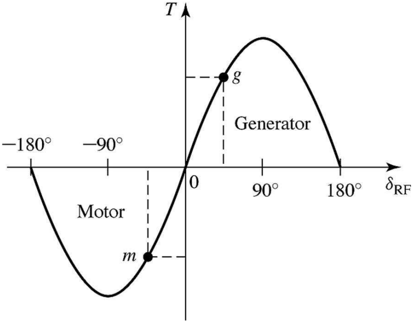
Φ_R = resulterande luftgapsflödet/pol
F_f = mmk:n genererad av fältlindningen
δ_{RF} = vinkeln mellan mmk-vågen F_f och magnetaxeln Φ_R.

Momentet verkar för att likrikta fälten.

δ_{RF} kallas för lastvinkel.

När rotorn ej är synkroniserad, medelmoment = 0.

Går inte att starta genom att lägga på en växelström med fix frekvens.

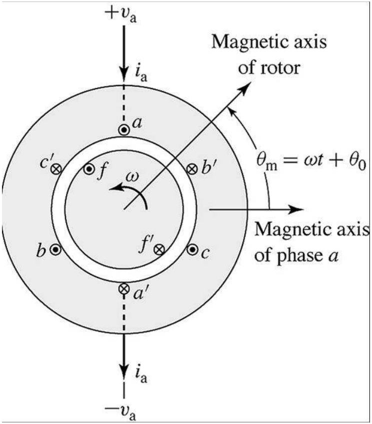


Modellering

Modellering

Syfte: Härleda en ekvivalent krets som modellerar ström-spänningskaraktäristik i stationär drift.

Geometri:



aa', bb', cc' och ff' representerar utbredda lindningar.

Sammanlänkade flödet

Det sammanlänkade flödet för maskinen kan uttryckas som en funktion av olika induktanser och strömmar enligt:

$$\begin{aligned}
\lambda_a &= \mathcal{L}_{aa} i_a + \mathcal{L}_{ab} i_b + \mathcal{L}_{ac} i_c + \mathcal{L}_{af} i_f \\
\lambda_b &= \mathcal{L}_{ba} i_a + \mathcal{L}_{bb} i_b + \mathcal{L}_{bc} i_c + \mathcal{L}_{bf} i_f \\
\lambda_c &= \mathcal{L}_{ca} i_a + \mathcal{L}_{cb} i_b + \mathcal{L}_{cc} i_c + \mathcal{L}_{cf} i_f \\
\lambda_f &= \mathcal{L}_{fa} i_a + \mathcal{L}_{fb} i_b + \mathcal{L}_{fc} i_c + \mathcal{L}_{ff} i_f
\end{aligned}$$

Matrisen $\mathcal{L}$ är symmetrisk.
Vi ska nu ser hur de olika induktanserna kan parametriseras för fallet med cylindrisk rotor.

Parametrarna kan sedan bestämmas antingen från mätdata eller från motorns dimensioner och material.

Rotorlindningens självinduktans

Tack vare symmetri är rotorns självinduktans konstant, dvs

$$\mathcal{L}_{ff} = L_{ff} = L_{ff0} + L_{fl}$$

där L_{ff0} representerar induktansen som skapas av grundtonen av mmk-vågen i luftgapet och L_{fl} av fältlindningens läckflöde.

Ömseinduktansen mellan rotorlindningen och statorlindningarna

Betrakta fas *a*. Ömseinduktansen varierar cykliskt som

$$\mathcal{L}_{af} = L_{af} \cos \theta_{me}$$

Vid stationär drift är rotorns orientering

$$\theta_m = \omega t + \delta_0$$

vilket omräknat i elektrisk vinkel blir

$$\theta_{me} = \frac{p}{2}\theta_m = \omega_e t + \delta_{e0}$$

där $\omega_e = (p/2)\omega$ och $\delta_{e0} = (p/2)\delta_0$.

Sammanfattningvis blir ömseinduktansen:

$$\mathcal{L}_{af} = L_{af} \cos(\omega_e t + \delta_{e0})$$

Ömseinduktanserna $\mathcal{L}_{bf}$ och $\mathcal{L}_{cf}$ härleds analogt.

Statorlindningarnas induktanser

Statorlindningarnas självinduktanser är konstanta och lika, dvs

$$\mathcal{L}_{aa} = \mathcal{L}_{bb} = \mathcal{L}_{cc} = L_{aa} = L_{aa0} + L_{al}$$

där L_{aa0} ges av luftgapsflödet och L_{al} av läckflödet.

Ömseinduktanserna mellan fasernas lindningar är tack vare symmetri konstanta och kan approximeras med

$$\mathcal{L}_{ab} = \mathcal{L}_{ac} = \mathcal{L}_{bc} = L_{aa0} \cos(2\pi/3) = -\frac{1}{2} L_{aa0}$$

Sammanlänkade flödet för statorlindningarna

Det sammanlänkade flödet för fas a blir

$$\begin{aligned}\lambda_a &= (L_{aa0} + L_{al})i_a - \frac{1}{2}L_{aa0}i_b - \frac{1}{2}L_{aa0}i_c + \mathcal{L}_{af}i_f = \\ &= \underbrace{(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al})}_{=:L_s}i_a - \frac{1}{2}L_{aa0}(\underbrace{i_a + i_b + i_c}_{=0}) + \mathcal{L}_{af}i_f = \\ &= L_s i_a + \mathcal{L}_{af}i_f\end{aligned}$$

där L_s är den effektiva självinduktansen för fas a under balanserad trefas och stationär drift. L_s kallas för synkroninduktansen.

Koefficienten 1.5 beskriver att den totala mmk-vågens amplitud blir 1.5 ggr den generarad enbart av a-fasen.

Sammanlänkade flödet

Det sammanlänkade flödet för maskinen kan uttryckas som en funktion av olika induktanser och strömmar enligt:

$$\begin{aligned}
\lambda_a &= L_s i_a + \mathcal{L}_{af} i_f \\
\lambda_b &= L_s i_b + \mathcal{L}_{bf} i_f \\
\lambda_c &= L_s i_c + \mathcal{L}_{cf} i_f \\
\lambda_f &= \mathcal{L}_{af} i_a + \mathcal{L}_{bf} i_b + \mathcal{L}_{cf} i_c + L_{ff} i_f
\end{aligned}$$

där

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{af} &= L_{af} \cos(\omega_e t + \delta_{e0}) \\
\mathcal{L}_{bf} &= L_{af} \cos(\omega_e t + \delta_{e0} - \frac{2\pi}{3}) \\
\mathcal{L}_{cf} &= L_{af} \cos(\omega_e t + \delta_{e0} + \frac{2\pi}{3})
\end{aligned}$$

dvs det finns bara tre modellparametrar: L_s, L_{af} och L_{ff}.

Ankarkretsen

Ankarspänningen i fas a är

$$
\begin{aligned}
v_a &= R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = /\lambda_a = L_s i_a + \mathcal{L}_{af} i_f, i_f = I_f \text{ är konstant}/ = \\
&= R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} L_{af} I_f \cos(\omega_e t + \delta_{e0}) = \\
&= R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} \underbrace{-\omega_e L_{af} I_f \sin(\omega_e t + \delta_{e0})}_{=:e_{af}} = \\
&= R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_{af}
\end{aligned}
$$

e_{af}, v_a, i_a är sinusvågor med vinkelhastighet ω_e vilket möjliggör komplex representation.

Komplexa storheter

Antag att rotorns magnetiska huvudaxel ligger δ_{e0} elektriska radianer före statorvågen, dvs

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos \omega_e t$$

där I_a är ankarströmmens effektivvärde. Den komplexa storheten är $\hat{I}_a = I_a$.

Den inducerade spänningen kan skrivas

$$\begin{aligned} e_{af} &= -\omega_e L_{af} I_f \sin(\omega_e t + \delta_{e0}) = \\ &= \omega_e L_{af} I_f \cos(\frac{\pi}{2} + \omega_e t + \delta_{e0}) \end{aligned}$$

vilket omvandlad till komplex storhet blir

$$\hat{E}_{af} = \left(\frac{\omega_e L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \right) e^{j(\frac{\pi}{2} + \delta_{e0})}$$

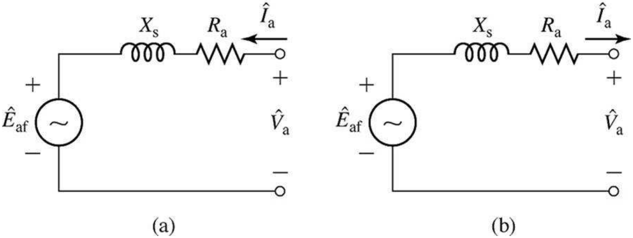
Komplex modell

Sammantaget blir modellen

$$\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

där X_s kallas för synkronreaktansen.

Ekvivalenta kretsar för synkronmaskinen:

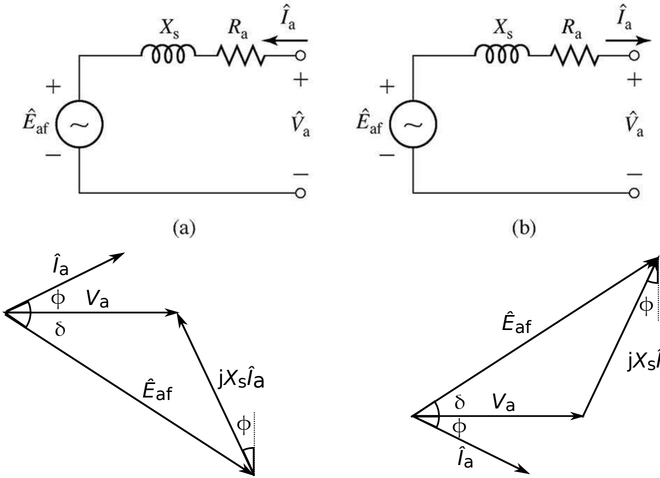


a) motordrift, b) generatordrift

Kretsarna beskriver fasspänning av en fas vid balanserad trefas.

Visardiagram

Antag att $R_a \approx 0$, dvs $\hat{V}_a = \pm jX_s\hat{I}_a + \hat{E}_{af}$



Motor: $\hat{V}_a$ leder $\hat{E}_{af}$

Generator: $\hat{E}_{af}$ leder $\hat{V}_a$

Parametrisering

Parametrisering

Parametrisera modellen

$$\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

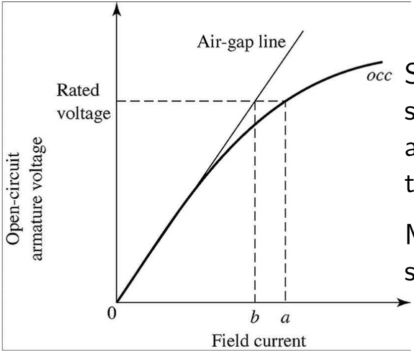
där $X_s = \omega_e L_s$ och

$$\hat{E}_{af} = j \left(\frac{\omega_e L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \right) e^{j\delta_{e0}}$$

- R_a kan mätas då motorn är urkopplad.
- Funktionen $E_{af} = f(I_f)$ kan skattas då $I_a = 0$. $\Rightarrow$ Mät spänningen då ankarkretsen är öppen. Tomgångsprov.
- Reaktansen X_s kan skattas genom att mäta strömmen då ankarkretsen kortsluts. Belastningsprov.

I både $X_s = \omega_e L_s$ och $\omega_e L_{af}/\sqrt{2}$ ingår induktanser som bara är konstanter då järnet inte är magnetiskt mättat.

Tomgångsprov - mättningskaraktäristik



Spänning E_{af} över ankarlindning som induceras med fältström I_f, ankarlindningen öppen och rotationshastighet ω_e fix.

Motsvarar dc-motorns magnetiseringskurva.

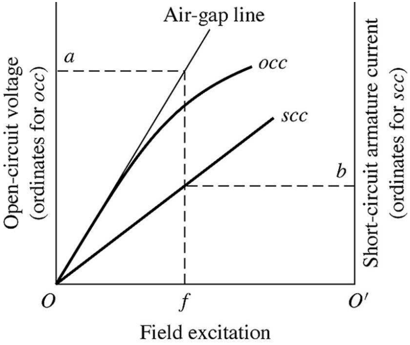
Linjens lutning relaterar till ömseinduktansen enligt

$$L_{af} = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{\omega_e I_f}$$

Vid mättning minskar således induktansen, dvs den magnetiska kopplingen mellan rotor och stator minskar.

Belastningsprov - kortslutningskaraktäristik

Kortslut alla faser, vrid rotorn med fixt varvtal, strömsätt fältlindningen, mät ankarströmmen. Maskinen omättad vid märkström.



Eftersom alla faser är kortslutna är $V_a = 0$, dvs

$$\hat{E}_{af} = (R_a + jX_s)\hat{I}_a$$

Omättade synkronreaktansen

För att bestämma X_s används

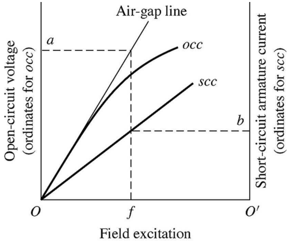
$$E_{af} = I_a \sqrt{R_a^2 + X_{s,u}^2}$$

där $X_{s,u}$ anger den omättade synkronreaktansen.

Eftersom järnet är omättat gäller

$$V_{a,ag} = E_{af} = \frac{\omega_e L_{af,u} I_f}{\sqrt{2}}$$

där $V_{a,ag}$ kan beräknas från tomgångsprovets (air-gap line) luftgapslinje för samma I_f som används vid belastningsprovet.



Försummas R_a blir sambandet

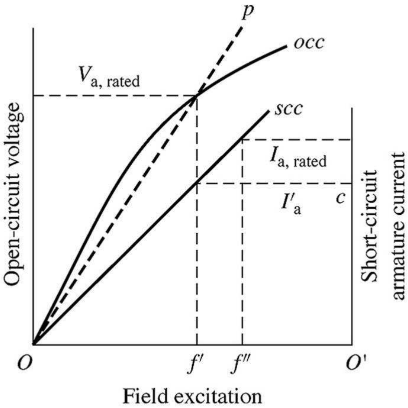
$$X_{s,u} = \frac{V_{a,ag}(I_f)}{I_{a,sc}(I_f)}, \text{ för godtycklig } I_f$$

Mättade synkronreaktansen

På liknande sätt approximeras mättningen med en motsvarande induktans vid märkspänning enligt

$$X_s = \frac{V_{a,\text{rated}}}{I'_a}$$

där beteckningarna förklaras i figuren.



Exempel

Givet: Följande data är inhämtat på en 60 Hz, 45 kVA, 220 V huvudspänning, 3-fas, Y-kopplad, 6-polig synkronmaskin.

I_f [A]	2.20	2.84
oc V_a [V]	-	220
oc $V_{a,ag}$ [V]	202	-
sc I_a [A]	118	152

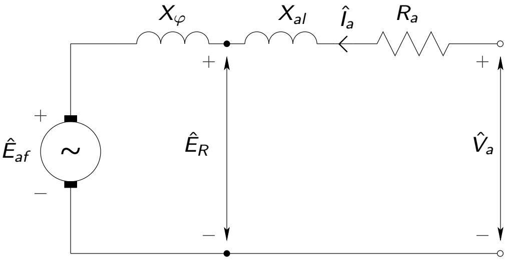
Spänningarna i tabellen anges som fas till fas spänningar.

Sökt: Mättad och omättad synkronreaktans.**Lösning:**

$$X_{s,u} = \frac{202/\sqrt{3}}{118}\ \Omega/\text{fas} \qquad X_s = \frac{220/\sqrt{3}}{152}\ \Omega/\text{fas}$$

Sammanfattning: Ekvivalent krets för synkronmotor

Ekvivalent krets, motorreferensriktning



$$\hat{V}_\mathrm{a} = R_\mathrm{a}\hat{I}_\mathrm{a} + jX_\mathrm{s}\hat{I}_\mathrm{a} + \hat{E}_\mathrm{af}$$

$$\hat{E}_\mathrm{af} = j\left(\frac{\omega_\mathrm{e} L_\mathrm{af} I_f}{\sqrt{2}}\right) e^{j\delta_{e0}}$$

$$\hat{E}_\mathrm{R} = \hat{V}_\mathrm{a} - \hat{I}_\mathrm{a}\left(R_\mathrm{a} + jX_\mathrm{al}\right)$$

$$X_\mathrm{s} = X_\mathrm{al} + X_\varphi$$

Här är $X_\mathrm{al} = \omega L_\mathrm{al}$ *läckreaktansen* och $X_\varphi = \omega\left(\frac{3}{2}L_{aa0}\right)$ är *magnetiseringsreaktansen* medan $\hat{E}_\mathrm{R}$ är luftgapsspänningen.