

Elektriska drivsystem

Föreläsning 7 - Synkronmaskinen

Mattias Krysander

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

2010-11-11

Dagens föreläsning

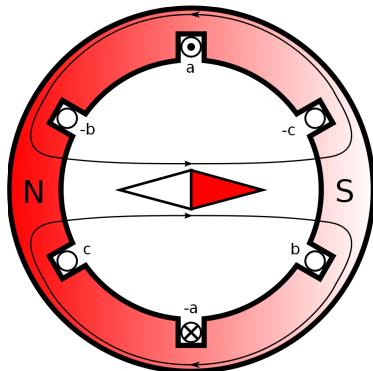
- ▶ Introduktion av synkronmaskinen
- ▶ Modellering
- ▶ Parametrisering
- ▶ Förluster och verkningsgrad
- ▶ Effektbetraktelser

— Introduktion av synkronmaskinen —

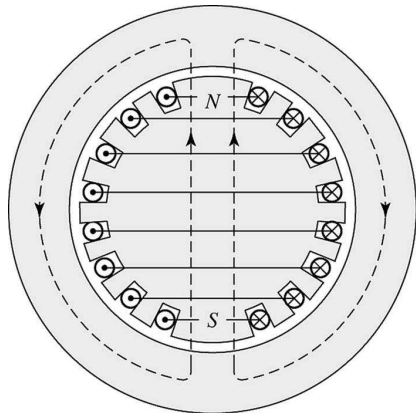
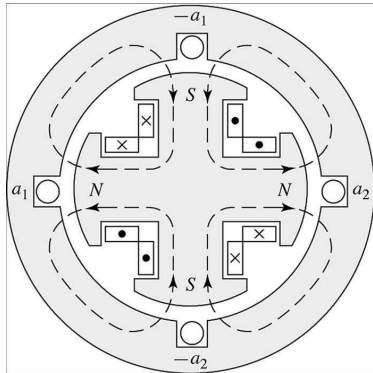
Synkronmotorn - repetition

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



a) Fyrpolig rotor med utpräglade poler.

b) Tvåpolig cylindrisk rotor och utbredda lindningar.

Utpräglade poler används oftast då poltalet är högt medan cylindrisk rotor då poltalet är lågt.

Idag ska vi studera maskiner med cylindrisk rotor.

Excitering

Likström i fältlindningen på upp till 4000 A.

- ▶ dc-generator inkopplad på axeln + släpring
- ▶ likriktning mha kraftelektronik + släpring
- ▶ borstlösa system med ac-generator och likriktande kraftelektronik på axeln och rotorn.

Moment-lastvinkelkaraktäristik

Momentet ges av:

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

Φ_R = resulterande luftgapsflödet/pol

F_f = mmk:n genererad av fältlindningen

δ_{RF} = vinkeln mellan mmk-vågen F_f och magnetaxeln Φ_R .

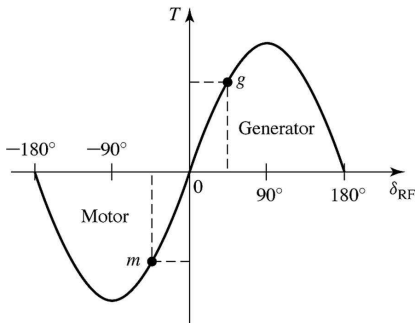
Momentet verkar för att likrikta fälten.

δ_{RF} kallas för lastvinkel.

Maximimoment.

När rotorn ej är synkroniserad, medelmoment = 0.

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

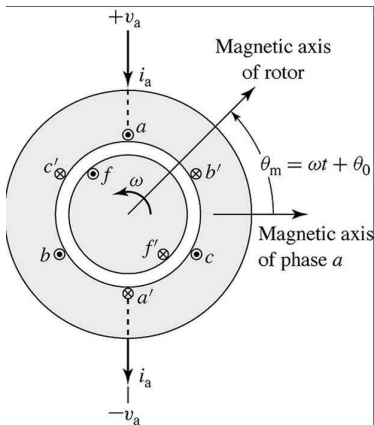


— Modelling —

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:

$$\lambda_a = \mathcal{L}_{aa}i_a + \mathcal{L}_{ab}i_b + \mathcal{L}_{ac}i_c + \mathcal{L}_{af}i_f$$

$$\lambda_b = \mathcal{L}_{ba}i_a + \mathcal{L}_{bb}i_b + \mathcal{L}_{bc}i_c + \mathcal{L}_{bf}i_f$$

$$\lambda_c = \mathcal{L}_{ca}i_a + \mathcal{L}_{cb}i_b + \mathcal{L}_{cc}i_c + \mathcal{L}_{cf}i_f$$

$$\lambda_f = \mathcal{L}_{fa}i_a + \mathcal{L}_{fb}i_b + \mathcal{L}_{fc}i_c + \mathcal{L}_{ff}i_f$$

Matrisen \mathcal{L} är symmetrisk.

Vi ska nu se hur de olika induktanserna kan parametreras 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

$$\mathcal{L}_{ff} = L_{ff} = L_{ff0} + L_{f1}$$

där L_{ff0} representerar induktansen som skapas av grundtonen av mmk-vågen i luftgapet och L_{f1} 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

$$\mathcal{L}_{aa} = \mathcal{L}_{bb} = \mathcal{L}_{cc} = L_{aa} = L_{aa0} + L_{a1}$$

där L_{aa0} ges av luftgapsflödet och L_{a1} 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

$$\begin{aligned}\lambda_a &= (L_{aa0} + L_{a1})i_a - \frac{1}{2}L_{aa0}i_b - \frac{1}{2}L_{aa0}i_c + \mathcal{L}_{af}i_f = \\ &= \underbrace{\left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{a1}\right)}_{=:L_s}i_a - \frac{1}{2}L_{aa0}\underbrace{(i_a + i_b + i_c)}_{=0} + \mathcal{L}_{af}i_f = \\ &= L_s i_a + \mathcal{L}_{af} i_f\end{aligned}$$

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 genererad enbart av a -fasen.

Sammanlänkade flödet

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

$$\lambda_a = L_s i_a + \mathcal{L}_{af} i_f$$

$$\lambda_b = L_s i_b + \mathcal{L}_{bf} i_f$$

$$\lambda_c = L_s i_c + \mathcal{L}_{cf} i_f$$

$$\lambda_f = \mathcal{L}_{af} i_a + \mathcal{L}_{bf} i_b + \mathcal{L}_{cf} i_c + L_{ff} i_f$$

där

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

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

$$\mathcal{L}_{cf} = L_{af} \cos(\omega_e t + \delta_{e0} + \frac{2\pi}{3})$$

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

Ankarkretsen

Ankarspänningen i fas a är

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

Komplexa storheter

Den inducerade spänningen e_{af} är en sinusvåg med vinkelhastighet ω_e vilket är samma vinkelhastighet som matningsspänningen v_a har.

Alla storheter varierar sinusformat med samma frekvens, dvs komplexa storheter som beskriver fas och effektivvärden kan modellera systemet.

Den inducerade spänningen

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

blir omvandlad till komplex storhet

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

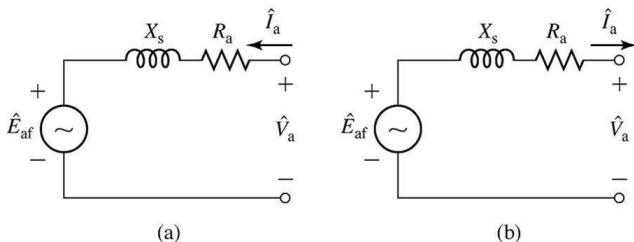
Komplexa modell

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.

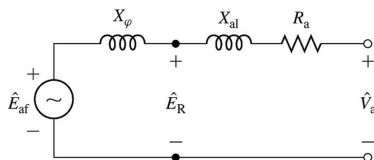
Synkronreaktansens beståndsdelar

Ibland delas synkronreaktansen X_s upp enligt

$$X_s = \omega_e L_s = \omega_e L_{a1} + \omega_e \left(\frac{3}{2} L_{aa0} \right) =: X_{a1} + X_\varphi$$

där X_{a1} är läckreaktansen och X_φ magnetiseringsreaktansen.

Krets som beskriver uppdelningen.



\hat{E}_R är den spänningen som induceras av det resulterande luftgapsflödet och kallas ibland för luftgapsspänning eller spänning bakom läckreaktansen.

Exempel

Givet: En 60Hz, 3-fas-synkronmotors ankarlindning är kopplad till en huvudspänning på 460V (fas till fas), 120 A med effektfaktor 0.95 eftersläpning. Fältströmmen är 47 A, synkronreaktansen 1.68 Ω /fas och ankarlindningens resistans försumbar.

Sökt: Inducerad spänning E_{af} , amplituden på ömseinduktansen L_{af} mellan fält och ankarlindning, och ineffekten till motorn.

Lösning: Inducerad spänning

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a - jX_s \hat{I}_a \quad (1)$$

Låt spänningen \hat{V}_a vara reell, dvs

$$\hat{V}_a = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265.6, \text{ V fasspänningens effektivvärde}$$

Strömmen ligger efter, dvs

$$\hat{I}_a = 120e^{-j \arccos(0.95)} = 120e^{-j18.2^\circ}, \text{ A rms}$$

Insättning i (1) ger $\hat{E}_{af} = 278.8e^{-j43.4^\circ}$ V rms

Exempel

Ömseinduktansen är

$$L_{af} = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{\omega_e I_f} = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{2\pi f_e I_f} = 22.3 \text{ mH}$$

Ineffekten är

$$\begin{aligned} P_{in} &= 3V_a I_a \cos \varphi = 90.8 \text{ kW} = \\ &= /1 \text{ elektrisk hästkraft} = 746 \text{ W/} = 122 \text{ hk} \end{aligned}$$

Effektfaktorn styrs av fältströmmen - exempel

Givet: Antag samma ineffekt och spänningsmatning som i förra exemplet.

Sökt: Fältströmmen som ger effektfaktorn 1.

Lösning: \hat{V}_a given sedan tidigare. Då effektfaktorn är 1 blir ankarströmmen

$$\hat{I}_a = \frac{P_{in}}{3V_a} = 114 \text{ A}$$

Den inducerade spänningen blir

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a - jX_s \hat{I}_a = 328e^{-j35.8^\circ}, \text{ V rms fas till 0:a}$$

Fältströmmen ska väljas enligt

$$I_f = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{\omega_e L_{af}} = 55.2 \text{ A}$$

Effektfaktorn kan påverkas genom att justera fältströmmen.

— 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

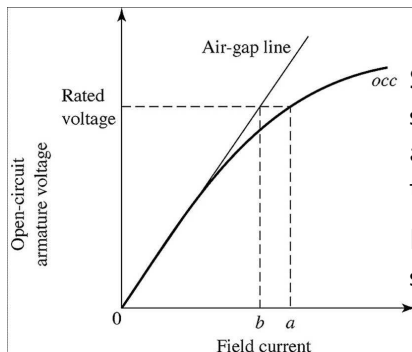
$$\hat{E}_{af} = j \left(\frac{\omega_e L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \right) e^{j\delta_{e0}}$$

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

- ▶ två tester öppen och sluten ankarlindning.
- ▶ fungerar även för icke-cylindriska rotor

Tomgångsprov - mättningskaraktäristik



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

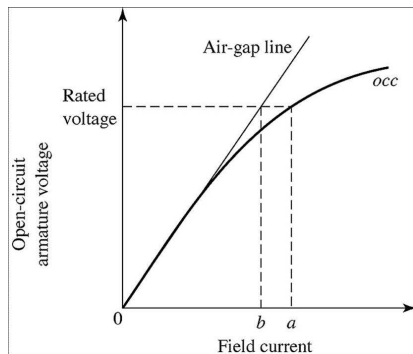
Motsvarar dc-motorns magnetiseringskurva.

Linjens lutning relaterar till ömseinduktansen enligt

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

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

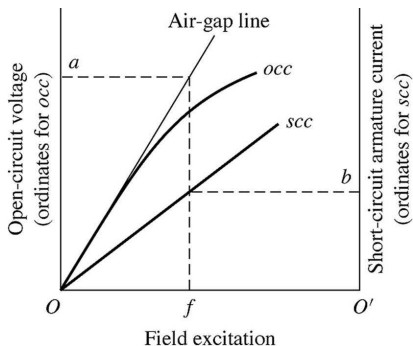
Tomgångsprov - mättningskaraktäristik



Ibland approximeras magnetiseringskurvan med en induktans som stämmer för märkspänning.

Belastningsprov - kortslutningskaraktäristik

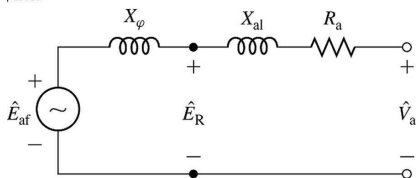
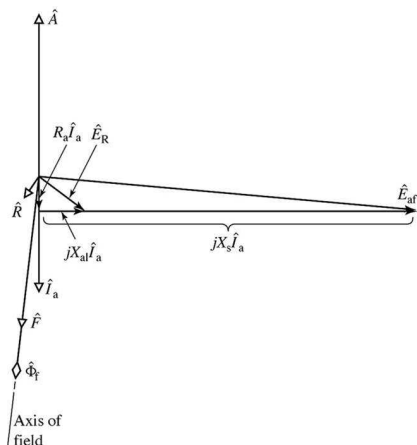
Kortslut alla faser, vrid rotorn med fixt varvtal, strömsätt fältlindningen, mät ankarströmmen.



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

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

Järnet omättat under belastningsprov



- ▶ Ansätt \hat{I}_a . $R_a \ll X_s$.
- ▶ Enligt \hat{E}_{af} ges av $(R_a + jX_s)\hat{I}_a$.
- ▶ mmk-vektor \hat{F} för fältlindningen 90° efter \hat{E}_{af}
- ▶ luftgapsspänningen $\hat{E}_R = (R_a + jX_{a1})\hat{I}_a$, där $X_{a1} \approx 0.15X_s$
- ▶ resulterande mmk-vågen \hat{R} är 90° efter \hat{E}_R
- ▶ mmk-vektorn \hat{A} är parallell med \hat{I}_a , men motriktad vid generatordrift. $\hat{R} = \hat{A} + \hat{F}$
- ▶ Slutsats: \hat{R} bara ca 15% av obelastat fall, $\hat{R} \approx 0.15\hat{F}$, dvs järnet är omättat.

Omättade synkronreaktansen

För att bestämma X_s används

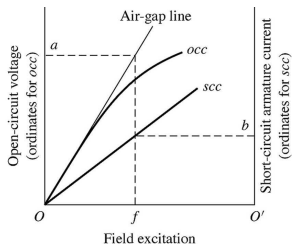
$$E_{af} = I_a \sqrt{R_a^2 + X_{s,u}^2}$$

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

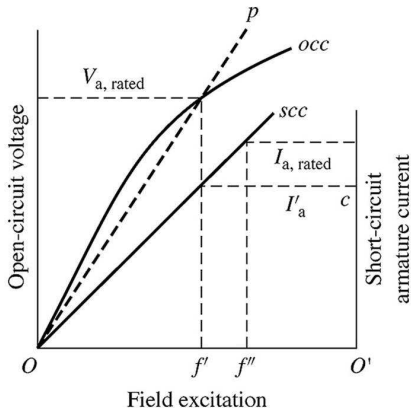
$$X_{s,u} = \frac{V_{a,ag}(I_f)}{I_{a,sc}(I_f)}, \text{ för godtycklig } I_f$$

Mättade synkronreaktansen

På liknande sätt approximeras mätningen som med en motsvarande induktans vid märkspänning enligt

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

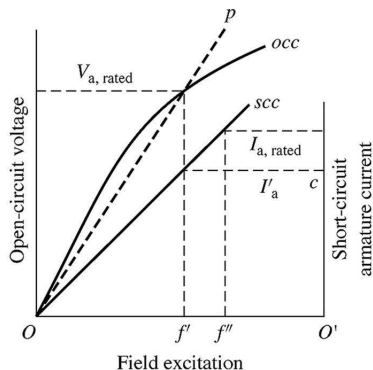
där beteckningarna förklaras i figuren.



Short circuit ratio (SCR)

$$\begin{aligned} SCR &= \frac{\text{fältström som krävs för att uppnå märkspänning i öppen krets}}{\text{fältström som krävs för att uppnå märkström i slutna krets}} \\ &= \frac{f'}{f''} = \frac{AFNL}{AFSC} \end{aligned}$$

där beteckningarna f' och f'' förklaras i figuren.



Ju större SCR desto mindre inverkan har förändringar i ankarströmmen på flödesstyrkan och desto stabilare är maskinen.

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	Spänningarna i tabellen anges som fas till fas spänningar.
oc $V_{a,ag}$ [V]	202	-	
sc I_a [A]	118	152	

Sökt: Mättad och omättad synkronreaktans samt SCR.

Lösning:

$$X_{s,u} = \frac{202/\sqrt{3}}{118} \Omega/\text{fas} \quad X_s = \frac{220/\sqrt{3}}{152} \Omega/\text{fas} \quad SCR = \frac{2.84}{2.20}$$

Nämnumraren i SCR-kvoten ges av tabellen och

$$I_{a,\text{rated}} = \frac{45000/3}{220/\sqrt{3}} = 118 \text{ A}$$

— Förluster och verkningsgrad —

Förluster

- ▶ Mekaniska förluster, varvtalsberoende
 - ▶ Friktionsförluster P_{fric}
 - ▶ Ventilationsförluster P_{winding}
- ▶ Kopparförluster (resistiva förluster $i^2 R$)
 - ▶ ankarlindningen P_{Ra}
 - ▶ fältlindningen P_{Rf}
- ▶ Järnförluster P_{core}
 - ▶ hystres
 - ▶ virvelströmsförluster

Nu ska vi se hur man med de två testen kan bestämma förlusterna.

Tomgångsförluster eller rotationsförluster

Vid tomgångsprov flyter ingen ström i ankarlindningen dvs belastningsförlusterna är 0.

Om den mekaniskt tillförda effekten P_{mech} mäts under ett tomgångsprov gäller att rotationsförlusterna för tomgångsfallet kan uttryckas som

$$P_{\text{mech}} = \underbrace{P_{\text{core}} + P_{\text{fric}} + P_{\text{winding}}}_{\text{tomgångsförluster}}$$

Järnförluster (virvelströmmar och hystres) är approximativt proportionell mot den inducerade spänningen, dvs $P_{\text{core}} \sim E_{\text{af}}^2$.

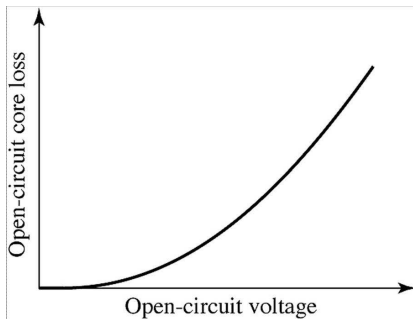
Då $I_f = 0$ erhålls bara friktions- och ventilations-förlusterna, dvs $P_{\text{mech}}(I_f = 0) = P_{\text{fric}} + P_{\text{winding}}$.

Tomgångsförluster eller rotationsförluster

Det betyder att järnförlusterna kan beräknas enligt

$$P_{\text{core}} = P_{\text{mech}}(I_f) - P_{\text{mech}}(I_f = 0)$$

Eftersom $V_a = E_{af}$ i tomgångsfallet kan järnförlusten som funktion av den inducerade spänningen E_{af} beräknas empiriskt:



Belastningsförluster

Under ett belastningsprov är resulterande mmk:n liten, dvs

$$\Rightarrow P_{\text{core}} \approx 0.$$

Då kan den mekaniska effekten uttryckas som

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{fric}} + P_{\text{windage}} + P_{\text{scll}}$$

där P_{scll} står för short-circuit load-losses.

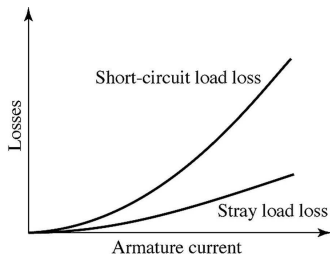
Eftersom $P_{\text{fric}} + P_{\text{windage}}$ har bestämts i tomgångsprovet, så kan belastningsförlusterna P_{scll} beräknas från mätningar.

Belastningsförluster

Belastningsförlusterna $P_{scII} = P_{Ra} + P_{stray}$ kan delas in i

- ▶ resistiva förluster i ankarlindningen $P_a = I_a^2 R_a$
- ▶ tillsatsförluster P_{stray} orsakade av skinneffekt och virvelströmmar i ledarna samt läckflöden runt ankarlindningarna.

Uppdelning kan ge följande karaktäristik:



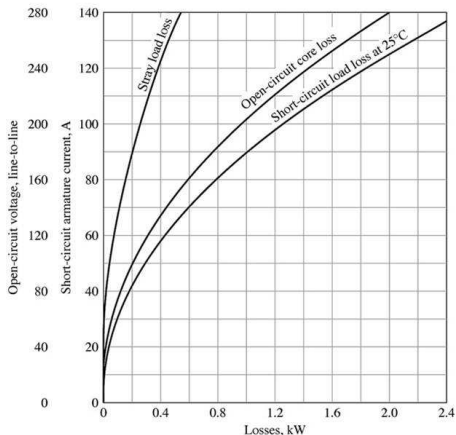
Om man antar att $P_{stray} \sim I_a^2$ så kan belastningsförlusterna uttryckas som

$$P_{scII} = R_{a,eff} I_{sc}^2$$

där $R_{a,eff}$ är den ur förlustsynpunkt ekvivalenta resistansen.

Verkningsgrad - exempel

Beräkna verkningsgraden för en 3-fas 45 kVA, 230 V, synkronmotor när den körs med märkspänning och märkeffekt i ankarkretsen, 0.8 (lag) i effektfaktor och $I_f = 5.5$ A. Antag att lindningarnas temperatur är 75° C. Följande förluster har skattats:



Friction and windage loss = 0.91 kW
Armature dc resistance at 25°C = 0.0335Ω per phase
Field-winding resistance at 25°C = 29.8Ω

Verkningsgrad - exempel

Verkningsgraden bestäms som

$$\nu = \frac{P_{in} - P_{losses}}{P_{in}}$$

där

$$P_{losses} = P_{Ra} + P_{Rf} + P_{stray} + P_{core} + P_{fric} + P_{winding}$$

Resistiva förluster

För att bestämma de resistiva förlusterna måste resistanserna temperaturkorrigeras enligt

$$R_{a,75} = R_{a,25} \frac{234.5 + 75}{234.5 + 25} \quad R_{f,75} = R_{f,25} \frac{234.5 + 75}{234.5 + 25}$$

De resistiva förlusterna blir då

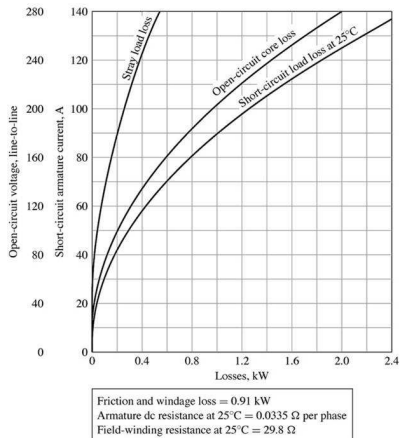
$$P_{Ra} = 3R_{a,75}I_a^2 = 1.53 \text{ kW} \quad P_{Rf} = R_{f,75}I_f^2 = 1.07 \text{ kW}$$

där I_a ges av skenbar effekt och spänning enligt:

$$I_a = \frac{45000/3}{230/\sqrt{3}} = 113 \text{ A}$$

Eventuella förluster i exciteringssystem såsom t ex i potentiometrar räknas inte in motorns förluster enligt American National Standards Institute - ANSI.

Övriga förluster



$$P_{\text{stray}}(I_a = 113) = 0.37 \text{ kW}$$

$$P_{\text{core}}(V_a = 230) = 1.3 \text{ kW}$$

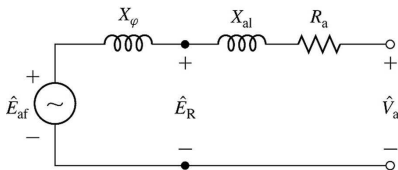
$$P_{\text{fric}} + P_{\text{winding}} = 0.91 \text{ kW}$$

Tillsatsförlusterna behöver inte temperaturkorrigeras.

Principiellt är det fel att bestämma järnförlusterna på ovanstående sätt, men i praktiken är det vanligt förekommande.

Järnförlusterna vid last

Isf att betrakta mmk-vågen producerad av fältlindningen bör den resulterande mmk-vågen för både stator och rotor användas.



Antag att läckreaktansen är $X_{a1} = 0.215 \Omega/\text{fas}$.

Luftgapsspänningen blir

$$\begin{aligned} E_R &= |\hat{V}_a - jX_{a1}\hat{I}_a| = \left| \frac{230}{\sqrt{3}} - j \cdot 0.215 \cdot I_a(0.8 - j0.6) \right| = \\ &= 119 \text{ V fasspänning} = 208 \text{ V huvudspänning} \end{aligned}$$

vilket motsvarar en $P_{\text{core}} = 1.04 \text{ kW}$

Verkningsgraden

Ineffekten är effekten matad i ankarkretsen + effekten i fältkretsen, dvs

$$P_{in} = 45 \cdot 0.8 + P_{Rf} = 37.1 \text{ kW}$$

Uteffekten blir

$$P_{out} = P_{in} - P_{losses} = 37.1 - 4.92 = 32.2 \text{ kW}$$

vilket ger verkningsgraden

$$\nu = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 86.7\%$$

— Effektbetraktelser —

Effektbegränsning

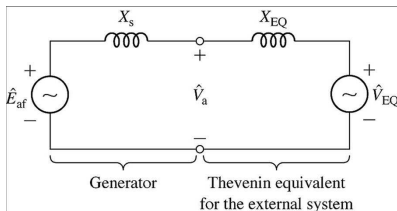
Hur mycket effekt kan synkrogeneratorn/motorn leverera?

Two variants:

- ▶ Tillfällig maxeffekt dimensionerad av det största momentet som maskinen klarar av för att bibehålla synkroniserad rotation.
- ▶ Maxeffekt under långvarig stationär drift dimensionerad av termiska betraktelser i lindningarna.

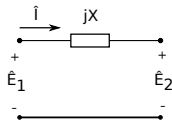
Effektbegränsning

Hur mycket effekt kan synkrogeneratorn/motorn leverera?



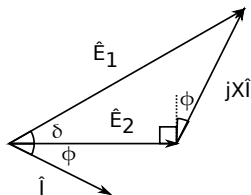
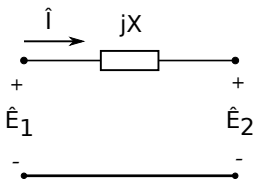
Krets för en synkrogenerator kopplad till ett externt system modellerat som en reaktans i serie med en spänningskälla.

För att beräkna hur mycket effekt som generatoren kan leverera betrakta det generellare problemet att visa begränsningarna av effektflöde genom en seriellt kopplad reaktans.



Effektöverföring

I boken betraktas en generell impedans, här försummas resistansen vilken ofta är liten i jmf med reaktansen.



Sinussatsen ger

$$\frac{\sin \delta}{XI} = \frac{\sin(\pi/2 + \phi)}{E_1} = \frac{\cos \phi}{E_1} \quad \Leftrightarrow \quad I \cos \phi = \frac{E_1}{X} \sin \delta$$

Effekten kan då uttryckas som

$$P_1 = P_2 = E_2 I \cos \phi = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta$$

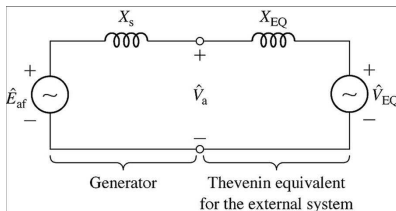
där δ kallas för synkronmaskinens effektvinkel.

Effekt för generatorfallet

Appliceras sambandet

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta$$

på kretsen



fås

$$P = \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \sin \delta$$

där P är effekt överförd från generatören per fas till systemet.

Kommentarer

Kretsvarianten på momentekvationen beskriver i princip samma sak vid konstant varvtal och cylindrisk rotor:

$$P = \frac{\hat{E}_{af} \hat{V}_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \sin \delta \qquad T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_R F_f \sin \delta_{RF}$$

Maximalt moment fås då $\sin \delta = 1$, men i praktiken så måste δ vara betydligt mindre än $\pi/2$ för att få stabil drift.

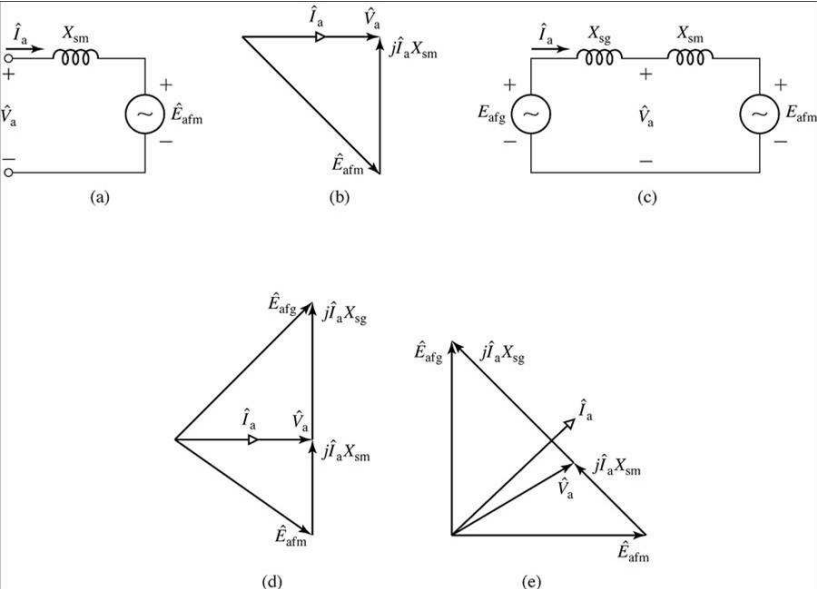
Maxeffekt - exempel

Givet: En 2000 hk, 2300 V, 3-fas, Y-kopplad, 30-polig, 60 Hz synkronmotor har synkronreaktansen $1.95 \Omega/\text{fas}$. Alla förluster kan försummas.

Sökt: Beräkna maximal effekt och moment då motorn är matad med ett 60 Hz 2300 V, oändligt starkt nät (fix spänning och frekvens) och fältströmmen är vald så att effektfaktorn är 1 för märkeffekten.

Maxeffekt - exempel lösning

Kretsar och visardiagram tillhörande exemplet.



Maxeffekt

Krets a) och visardiagrammet b) i föregående oh beskriver fallet då märkeffekten genereras med effektfaktor 1.

Märkspänning:

$$V_{a,rated} = \frac{2300}{\sqrt{3}} \text{ V fasspänning}$$

Eftersom förlusterna försummas blir märkströmmen

$$I_{a,rated} = \frac{P_{rated}}{V_{a,rated}} = \frac{2000 \cdot 0.746/3}{2300/\sqrt{3}} = 374 \text{ A/fas}$$

Då kan den inducerade spänningen beräknas enligt

$$E_{afm} = |V_{a,rated} + jX_{sm}I_{a,rated}|$$

Eftersom $V_{a,rated}$ och E_{afm} är fixa då δ varierar fås maxeffekten då $\sin \delta = 1$, dvs

$$P_{max} = \frac{V_{a,rated}E_{afm}}{X_{sm}} = 1032 \text{ kW/fas} = 3096 \text{ kW}$$

Maxmoment

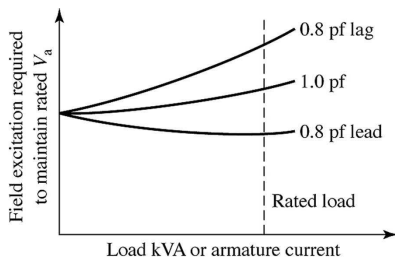
Maxmomentet blir

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{P_{\max}}{\omega_s} = \frac{P_{\max}}{2\pi f_e} = \left(\frac{2}{p}\right) 2\pi f_e, p = 30, f_e = 60 / = \\ &= \frac{P_{\max} p}{4\pi f_e} = 132.2 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Kompoundingkurva

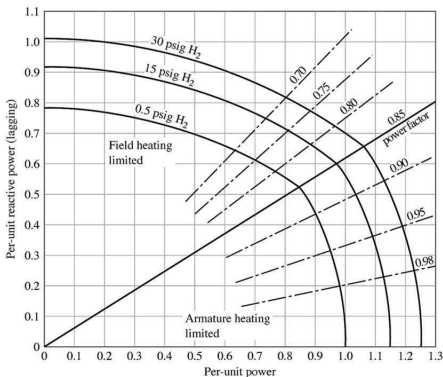
Betrakta en generator med konstant varvtal, märkspänning över terminalen, och last med fix effektfaktor.

Fältströmmen som krävs för att bibehålla märkspänning för varierande ankarström kallas för kompoundingkurvan och ser typisk ut som



Effektbegränsning vid långvarig stationär drift

Exempel på en prestandakurva för en vätekyld turbingenerator.

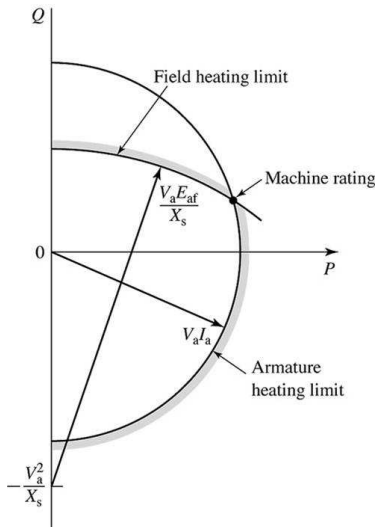


Kurvan visar i vilket effektområde som generatoren kan arbeta vid märkspänning.

Ankarströmmens uppvärmning begränsar maxeffekten för effektfaktor över 0.85, fältströmmen under 0.85.

Högre övertryck ökar kyleffekten varför maxeffekten kan ökas.

Ankarströmsbegränsning



Den skenbara effekten kan tecknas

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_a I_a$$

För fix spänning V_a och maximal ankarström I_a bildar ovanstående samband en cirkel i (P, Q) -planet med radie $V_a I_a$.

Fältströmsbegränsning

Den inducerade spänningen E_{af} begränsas då fältströmmen begränsas.

Effektområdet ges av elimination av I_a i

$$\hat{V}_a \hat{I}_a = P - jQ$$

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

Välj $\hat{V}_a = V_a$ och multiplicera den undre ekvationen med V_a/X_s :

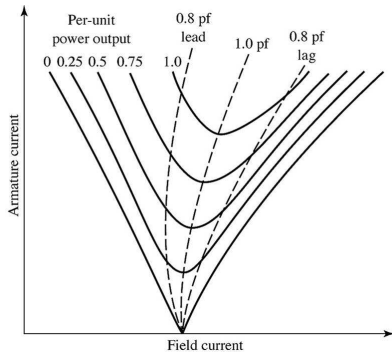
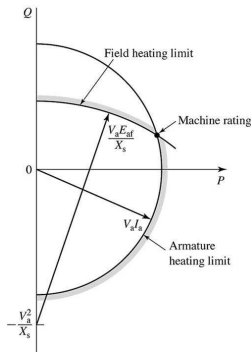
$$\begin{aligned} \frac{V_a}{X_s} \hat{E}_{af} &= \frac{V_a^2}{X_s} + jV_a \hat{I}_a = \frac{V_a^2}{X_s} + j(P - jQ) = \\ &= \left(Q + \frac{V_a^2}{X_s}\right) + jP \end{aligned}$$

Beloppet av VL och HL ger

$$\left(\frac{V_a}{X_s} E_{af}\right)^2 = \left(Q + \frac{V_a^2}{X_s}\right)^2 + P^2$$

som beskriver en cirkel med origo i $(P, Q) = (0, -V_a^2/X_s)$ och radie $V_a E_{af}/X_s$.

Excitering



Figuren till vänster visar kurvor (V-kurvor) för fix effekt och fix terminalspänning sambandet mellan ankarström och fältström.

Till höger om den streckade kurvan som markerar effektfaktor 1 är generatoren överexciterad och till vänster underexciterad.

Sammanfattning

- ▶ Modellerat motorn som ett kretselement.
 - ▶ Räcker att betrakta en fas.
- ▶ Parametrisering
 - ▶ Sambandet $E_{af}(I_f)$ skattas genom tomgångsprov.
 - ▶ Synkronreaktansen X_s skattas genom belastningsprov.
- ▶ Förluster och verkningsgrad
 - ▶ Rotationsförluster vid tomgångsprov.
 - ▶ Belastningsförluster genom belastningsprov.
 - ▶ Verkningsgrad bestäms med P_{in} och P_{losses} enligt ANSI.
- ▶ Effektbetraktelser
 - ▶ Effekt eller (intermittent maxeffekt) kan beräknas mha effektöverföring genom induktiv ledare.
 - ▶ Märkeffekten begränsas av lindningstemperaturen. Resistiva förluster värmer lindningarna varför temperaturbegränsningen ger en strömbegränsning.