Elektriska drivsystem
Föreläsning 8 - Analys och styrning av synkronmaskinen

Mattias Krysander

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

2010-11-18

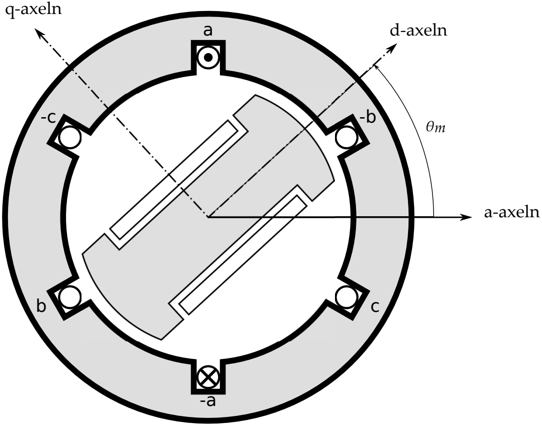
Dagens föreläsning

- dq0-transformationen
  - Överför statorkoordinater till rotorkoordinater.
  - Storheter som t ex strömmar, induktanser blir konstanter i dq0-koordinater.
  - Grundläggande för modellering och analys av rotorer med utpräglade poler.
  - Grundläggande för styrning av synkronmaskiner.
- Analys av maskiner med utpräglade poler
  - Reluktansmoment
- Styrning av synkronmaskiner

dq0-transformationen

dq0-transformationen

dq0-transformationen transformerar storheter från fasernas magnetiska axlar a,b,c till axlarna d,q,0 relaterade till rotorn vid ett viss vinkel θ_m



- Längsaxeln (d-axeln) längs fältlindningens axel
- Tvärledsaxel (q-axel) vinkelrät mot fältlindningens axel
- Nollföljdsaxel (0-axel)

dq0-transformationen

Parks (1929) transformation:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix}}_{=:S_{dq0}(t)} = \underbrace{\frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}}_{=:T(\theta_{me})} \underbrace{\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}}_{=:S_{abc}(t)}$$

$$T^{-1}(\theta_{me}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me}) & 1 \\ \cos(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

Transformation av balanserad 3-fasström

Transformationen av en balanserad 3-fasström

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos \omega t \quad i_b = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad i_c = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

till dq0-koordinater definierad av en rotorn som roterar med hastigheten ω och med d-axeln δ radianer från a-axeln vid $t = 0$, dvs $\theta_{me} = \omega t + \delta$, tecknas

$$i_{dq0}(t) = T(\omega t + \delta) i_{abc}(t)$$

vilket ger

$$i_d = \sqrt{2} I_a \cos \delta \qquad i_q = -\sqrt{2} I_a \sin \delta \qquad i_0 = 0$$

Notera att tillskillnad från i_{abc} så är i_{dq0} konstant eftersom en betraktare i det roterande koordinatsystemet uppfatta flödet skapat av ankarlindningarna som konstant och riktat i d-axelns riktning.

dq0-transformering av grundekvationerna

Vi ska nu transformera

- Ekvationen för sammanlänkat flöde $\lambda = Li$.
- Spänningsekvationen $v = Ri + \frac{d\lambda}{dt}$
- Effektenekvationen $p = vi$
- Momentekvationen

Sammanlänkade flödet

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

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

Vi ska nu se hur de olika induktanserna som i förra föreläsningen togs fram för fallet med cylindrisk rotor kan utökas till fallet med utpräglade poler.

Induktanser som inte förändras

Liksom i fallet för cylindrisk rotor ger symmetri att rotorns självinduktans är konstant, dvs

$$\mathcal{L}_{ff} = L_{ff}$$

Likaså rotor-statorömseinduktansen förblir oförändrad, dvs

$$\mathcal{L}_{af} = L_{af} \cos(\theta_{me})$$
$$\mathcal{L}_{bf} = L_{af} \cos(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3})$$
$$\mathcal{L}_{cf} = L_{af} \cos(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3})$$

Induktanser som måste kompletteras

Statorlindningarnas självinduktanser

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

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

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

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

Induktanser som måste kompletteras

Statorlindningarnas självinduktanser

$$\mathcal{L}_{aa} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me})$$

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

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

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

Induktanser som måste kompletteras

Statorlindningarnas självinduktanser

$$\mathcal{L}_{aa} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me})$$
$$\mathcal{L}_{bb} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} + \frac{2\pi}{3})$$
$$\mathcal{L}_{cc} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} - \frac{2\pi}{3})$$

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

Induktanser som måste kompletteras

Statorlindningarnas självinduktanser

$$\mathcal{L}_{aa} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me})$$
$$\mathcal{L}_{bb} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} + \frac{2\pi}{3})$$
$$\mathcal{L}_{cc} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} - \frac{2\pi}{3})$$

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

Ömseinduktanserna mellan fasernas lindningar

$$\mathcal{L}_{bc} = -\frac{1}{2}L_{aa0}$$
$$\mathcal{L}_{ab} = -\frac{1}{2}L_{aa0}$$
$$\mathcal{L}_{ac} = -\frac{1}{2}L_{aa0}$$

Induktanser som måste kompletteras

Statorlindningarnas självinduktanser

$$\mathcal{L}_{aa} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me})$$
$$\mathcal{L}_{bb} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} + \frac{2\pi}{3})$$
$$\mathcal{L}_{cc} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} - \frac{2\pi}{3})$$

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

Ömseinduktanserna mellan fasernas lindningar

$$\mathcal{L}_{bc} = -\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2}\cos(2\theta_{me})$$
$$\mathcal{L}_{ab} = -\frac{1}{2}L_{aa0}$$
$$\mathcal{L}_{ac} = -\frac{1}{2}L_{aa0}$$

Induktanser som måste kompletteras

Statorlindningarnas självinduktanser

$$\mathcal{L}_{aa} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me})$$
$$\mathcal{L}_{bb} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} + \frac{2\pi}{3})$$
$$\mathcal{L}_{cc} = L_{aa0} + L_{a1} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} - \frac{2\pi}{3})$$

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

Ömseinduktanserna mellan fasernas lindningar

$$\mathcal{L}_{bc} = -\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2}\cos(2\theta_{me})$$
$$\mathcal{L}_{ab} = -\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} - \frac{2\pi}{3})$$
$$\mathcal{L}_{ac} = -\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2}\cos(2\theta_{me} + \frac{2\pi}{3})$$

Sammanlänkande flödet i dq0-koordinater

Vi kan nu teckna det sammanlänkade flödet som

$$\begin{aligned}\lambda_{abc} &= \mathcal{L}_{ss}(\theta_{me})i_{abc} + \mathcal{L}_{sf}(\theta_{me})i_f \\ \lambda_f &= \mathcal{L}_{fs}(\theta_{me})i_{abc} + \mathcal{L}_{ff}\, i_f\end{aligned}$$

Om vi transformerar de sammanlänkande flödena och strömmarna till dq0-axlarna blir strömmar och induktanser konstanta. Om vi applicerar följande transformationer

$$\lambda_{dq0} = T\lambda_{abc} \qquad\qquad i_{abc} = T^{-1}i_{dq0}$$

fås

$$\begin{aligned}\lambda_{dq0} &= T\lambda_{abc} = T\mathcal{L}_{ss}i_{abc} + T\mathcal{L}_{sf}\, i_f = T\mathcal{L}_{ss}T^{-1}i_{dq0} + T\mathcal{L}_{sf}\, i_f \\ \lambda_f &= \mathcal{L}_{fs}T^{-1}i_{dq0} + \mathcal{L}_{ff}\, i_f\end{aligned}$$

Sammanlänkande flödet i dq0-koordinater

Resultatet av transformationen blir

$$
\begin{aligned}
\lambda_d &= L_d i_d + L_{af} i_f \\
\lambda_q &= L_q i_q \\
\lambda_0 &= L_0 i_0 \\
\lambda_f &= \frac{3}{2} L_{af} i_d + L_{ff} i_f
\end{aligned}
$$

där

$$
\begin{aligned}
L_d &= L_{a1} + \frac{3}{2}(L_{aa0} + L_{g2}) \\
L_q &= L_{a1} + \frac{3}{2}(L_{aa0} - L_{g2}) \\
L_0 &= L_{a1}
\end{aligned}
$$

Storheterna L_d och L_q kallas för längs- resp. tvär-axelsynkron-induktansen och motsvarande reaktanser $X_d = \omega_e L_d$ och $X_q = \omega_e L_q$ för längs- resp. tvär-axelsynkronreaktansen. Observera att induktanserna inte beror på vinkeln.

Transformation av spänningsekvationerna

Antag fix rotationshastighet $\theta_{me} = \omega_{me} t$ samt strömriktning positiv för motordrift.

På matrisform blir spänningsekvationerna i abc-koordinater:

$$v_{abc} = R_a i_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt}$$

Följande transformationer

$$v_{dq0} = T v_{abc} \qquad i_{abc} = T^{-1} i_{dq0} \qquad \lambda_{abc} = T^{-1} \lambda_{dq0}$$

ger

$$v_{dq0} = T v_{abc} = R_a T T^{-1} i_{dq0} + T\left(T^{-1} \frac{d\lambda_{dq0}}{dt} + \frac{dT^{-1}}{dt} \lambda_{dq0}\right) =$$
$$= R_a i_{dq0} + \frac{d\lambda_{dq0}}{dt} + T \frac{dT^{-1}}{d\theta_{me}} \underbrace{\frac{d\theta_{me}}{dt}}_{=\omega_{me}} \lambda_{dq0}$$

Transformation av spänningsekvationerna

Resultatet blir:

$$v_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{me}\lambda_q$$
$$v_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{me}\lambda_d$$
$$v_0 = R_a i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt}$$
$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt}$$

$-\omega_{me}\lambda_q$ och $\omega_{me}\lambda_d$ är inducerad spänning skapad av rotation.

Momentaneffekt och moment i dq0-variabler

Effektsambandet

$$p_s = v_{abc}^T i_{abc}$$

ger effekten i dq0-koordinater som

$$p_s = (T^{-1} v_{dq0})^T (T^{-1} i_{dq0}) = v_{dq0}^T T^{-T} T^{-1} i_{dq0} =$$
$$= \Big/ \, T^{-1} = T^T \begin{bmatrix} 3/2 \\ 3/2 \\ 3 \end{bmatrix} \Big/ = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q + 2 v_0 i_0)$$

Moment som vill accelerera rotorn härleds enligt

$$T_{\text{mech}} = \frac{p_s}{\omega_m} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)\frac{-\omega_{me}\lambda_q i_d + \omega_{me}\lambda_d i_q}{\omega_{me}} =$$
$$= \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)(-\lambda_q i_d + \lambda_d i_q)$$

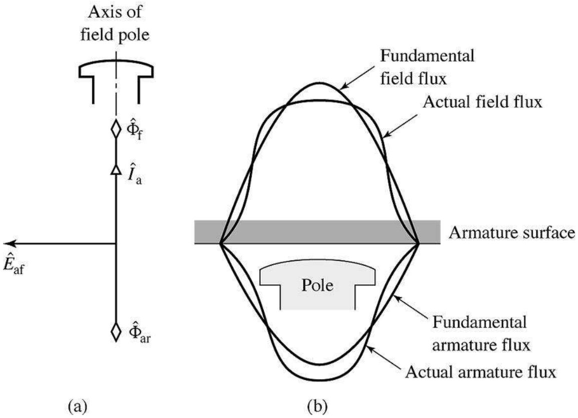
Analys av maskiner med utpräglade poler

Analys av maskiner med utpräglade poler

- Flöde och mmk-vågor
- Visardiagram
- Beräkning av inducerad spänning
- Effektvinkelkaraktäristik

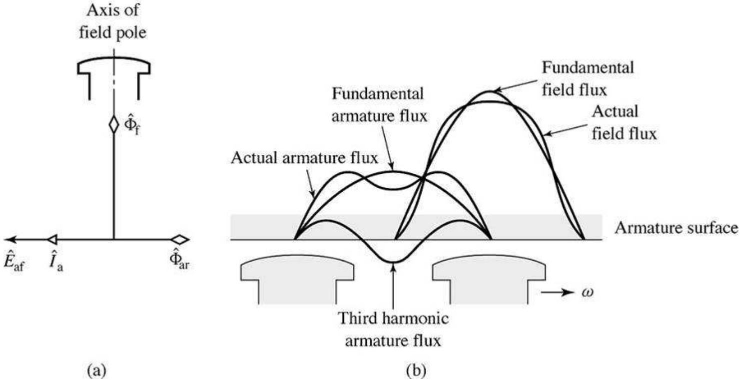
Flöde och mmk-våg i d-axelns riktning

- Fältlindningens magnetiska flöde $\hat{\Phi}_f$ är riktat i rotorns längsriktning, dvs i längsaxeln eller d-axelns riktning.
- Eftersom den inducerad spänning $\hat{E}_{af} \sim \frac{d\hat{\Phi}_f}{dt}$ så ligger den 90° före $\hat{\Phi}_f$, dvs i tväraxelns eller q-axelns riktning.
- För generatorfallet är $\hat{I}_a$ och $\hat{\Phi}_{ar}$ motriktade.



Flöde och mmk-våg i q-axelns riktning

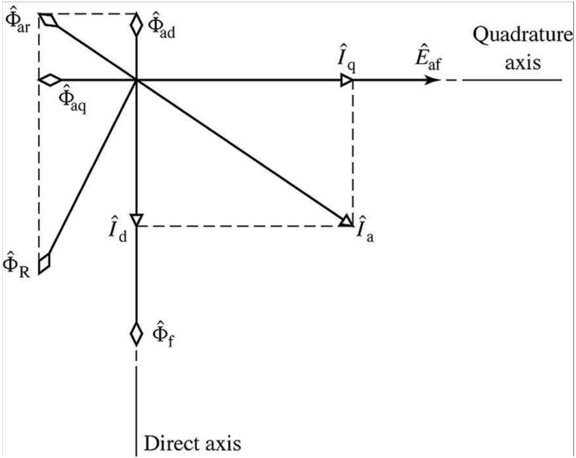
- När $\hat{I}_a$ är i fas med $\hat{E}_{af}$ ligger $\hat{\Phi}_{ar}$ i q-axelns riktning.
- Reluktansen är mycket större i q-axelns riktning eftersom luftgapet är större.
- Vi betraktar endast grundtoner.



Visardiagram för en generator med utpräglade poler

Visardiagram för en generator med eftersläpande ström. Här antas generatorn vara omättad och då gäller att

$$\hat{\Phi}_{ar} = \hat{\Phi}_{ad} + \hat{\Phi}_{aq} \qquad \hat{\Phi}_R = \hat{\Phi}_{ar} + \hat{\Phi}_f$$



Synkronreaktansens uppdelning i dq-komponenter

Enligt tidigare har synkronreaktansen X_s delats upp i X_d i d-axelns riktning och X_q i q-axelns riktning, dvs synkronreaktansens spänningsfall är

$$j\hat{I}_d X_d + j\hat{I}_q X_q$$

där X_q typiskt är i intervallet $0.6X_d \leq X_q \leq 0.7X_d$.

För fallet med cylindrisk rotor är $X_d = X_q = X_s$.

Pss som för X_s kan X_d och X_q anges både för mättade och omättade förhållanden.

Den inducerade spänningen

Den inducerade spänningen för generatorfallet beräknas enligt

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + R_a\hat{I}_a + j\hat{I}_d X_d + j\hat{I}_q X_q$$

där R_a, X_d, X_q, I_a, V_a samt effektfaktorvinkeln

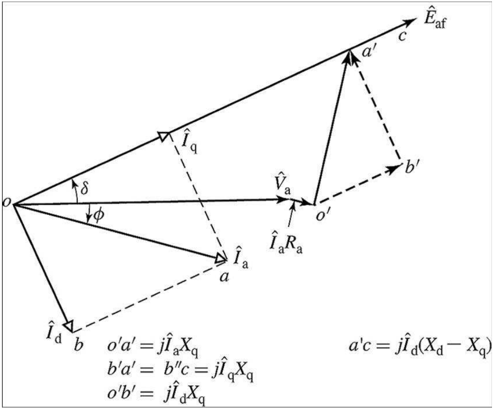
$$\phi = \text{vinkel}(\hat{I}_a) - \text{vinkel}(\hat{V}_a)$$

antas kända.

För att göra uppdelningen av $\hat{I}_a$ behövs riktningen på tväraxeln, dvs riktningen på $\hat{E}_{af}$.

Riktningen på $\hat{E}_{af}$

Betrakta följande visardiagram:



Vi ska visa att $\hat{E}_{af}$ och

$$\hat{V}_a + R_a\hat{I}_a + jX_a\hat{I}_a$$

har samma fasvinkel.

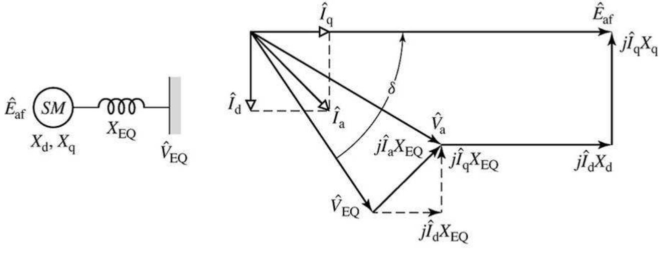
Konstruera $o'a'$ som den vektor som är vinkelrät mot $\hat{I}_a R_a$ och som når fram till skärningspunkten med $\hat{E}_{af}$. Vidare, dela upp $o'a'$ i dess dq-komponenter $b'a'$ och $o'b'$.

Trianglarna $o'a'b'$ och oab är likformig vilket ger

$$|o'a'| = \frac{|b'a'|}{|ba|}|oa| = \frac{|j\hat{I}_q X_q|}{|\hat{I}_q|}|\hat{I}_a| = X_q|\hat{I}_a| \quad \Rightarrow \quad o'a' = jX_q\hat{I}_a$$

Effektvinkelkaraktäristik

Betrakta en maskin inkopplad till ett oändligt starkt nät enligt



(a) (b)

där resistanser är försummade.

Effekten av extern impedans inkluderas enligt

$$X_{dT} = X_d + X_{EQ}$$
$$X_{qT} = X_q + X_{EQ}$$

Levererad effekt är

$$P = I_d V_d + I_q V_q = I_d V_{EQ} \sin\delta + I_q V_{EQ} \cos\delta$$

Effektvinkelkaraktäristik

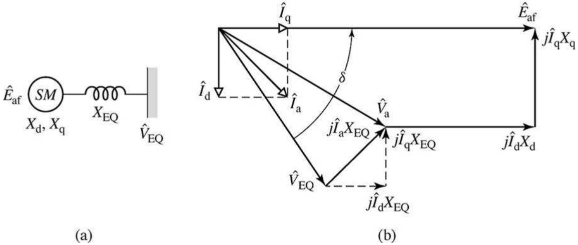
Strömmarna i $P = I_d V_{EQ} \sin\delta + I_q V_{EQ} \cos\delta$ kan enligt figuren uttryckas som

$$I_d = \frac{E_{af} - V_{EQ}\cos\delta}{X_{dT}} \qquad\qquad I_q = \frac{V_{EQ}\sin\delta}{X_{qT}}$$

Substitution i effektuttrycket ger

$$P = \frac{E_{af} - V_{EQ}\cos\delta}{X_{dT}} V_{EQ}\sin\delta + \frac{V_{EQ}\sin\delta}{X_{qT}} V_{EQ}\cos\delta =$$

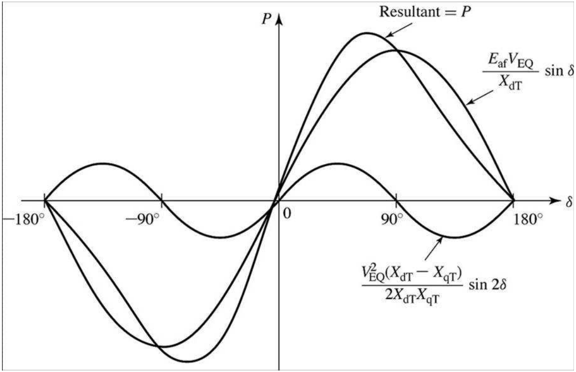
$$= \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_{dT}}\sin\delta + V_{EQ}^2 \frac{X_{dT} - X_{qT}}{2X_{dT}X_{qT}} \underbrace{2\sin\delta\cos\delta}_{=\sin 2\delta}$$



Effektvinkelkaraktäristik

Effekten kan uttryckas mha av spänningar, reaktanser och effektvinkel enligt

$$P = \frac{E_{af} V_{EQ}}{X_{dT}} \sin\delta + V_{EQ}^2 \frac{X_{dT} - X_{qT}}{2X_{dT}X_{qT}} \sin 2\delta$$



Reluktansmomentet gör maskinen styvare. Maxmoment något större och antas för en effektvinkel δ mindre än 90°.

Permanentmagnetiserad (PM) synkronmaskin

PM synkronmaskiner kallas ofta för borstlösa motorer eller borstlösa likströmsmotorer, eftersom de har liknande hastighet-momentkarakteristik som dc-maskiner. De kan ses som en utochinvänd likströmsmaskin.

- Kan analyseras som en elektriskt exciterad motor med fix fältström.
- Stegmotor, där lindningarna exciteras med stegformade strömmar och rotorn rör sig mellan olika jämviktslägen.

Styrning av synkronmaskinen

Naiv princip för hastighetsreglering

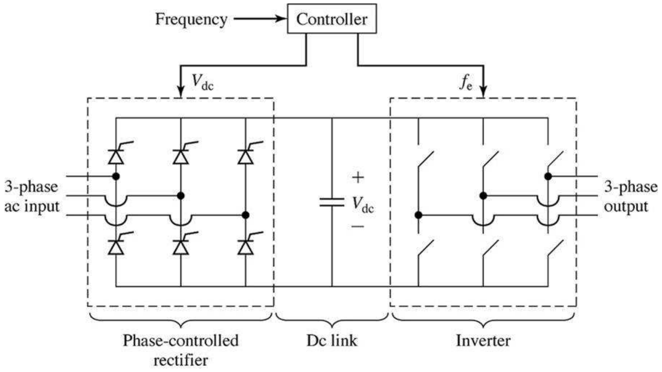
Hastighetsstyrning i sin enklaste form ges av

$$\omega_s = \frac{2}{p}\omega_e$$

där ω_s är rotorns vinkelhastighet och ω_e den elektriska vinkelhastigheten.

Hastighetsstyrning kan alltså åstadkommas mha styrning av den pålagda spänningens frekvens.

Kraftelektronik för varvtalsstyrning



För att skapa en styrbar frekvens och amplitud på spänningen används typiskt en fasstyrd likriktare med spänningsstyvt mellanled följt av en växelriktare som antingen genererar en stegformad växelspänning eller en pulsbreddsmodulerad vågform med variabel frekvens.

Amplituden måste styras när frekvensen ändras

Amplituden måste justeras när frekvensen ändras enligt följande:

Om vi försummar resistansen R_a och applicerar spänningen V_a med frekvensen f_e så gäller

$$V_a = kB_{\text{peak}} f_e \qquad\qquad V_{\text{rated}} = kB_{\text{rated}} f_{\text{rated}}$$

där B_{peak} är det resulterande maximala flödestätheten.

Om $V_a = V_{\text{rated}}$ så blir

$$B_{\text{peak}} = \frac{V_{\text{rated}}}{kf_e} = \frac{f_{\text{rated}}}{f_e} B_{\text{rated}}$$

dvs flödestätheten ökar då frekvensen sänks vilket kan skada maskinen.

Principer för hastighetsstyrning

För frekvenser under märkfrekvens styrs oftast maskinen med konstant maxflöde, dvs $B_{\text{peak}} = B_{\text{rated}}$.

Detta tillsammans med

$$V_a = kB_{\text{peak}} f_e \qquad\qquad V_{\text{rated}} = kB_{\text{rated}} f_{\text{rated}}$$

ger att

$$V_a = kB_{\text{rated}} f_e = \frac{f_e}{f_{\text{rated}}} V_{\text{rated}}$$

Denna princip används ner till frekvenser där R_a får signifikant betydelse.

För frekvenser större än märkfrekvens fixeras spänningen $V_a = V_{\text{rated}}$ så att inte märkspänningen överskrids.

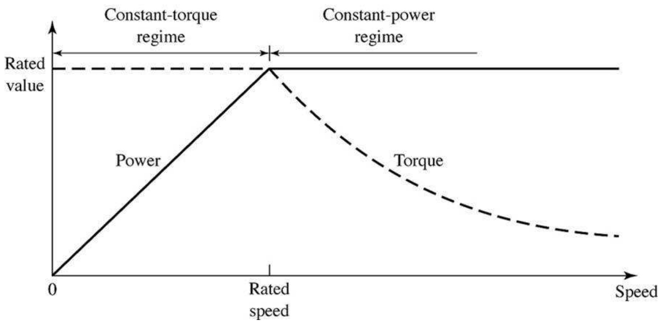
Styrningsmoder

Maxeffekten för frekvenser under märkfrekvens är

$$P_{\max}(f_e) = V_a I_{\text{rated}} = /V_a = \frac{f_e}{f_{\text{rated}}} V_{\text{rated}}/ = \frac{f_e}{f_{\text{rated}}} P_{\text{rated}}$$

För frekvenser över märkfrekvens gäller

$$P_{\max}(f_e) = V_{\text{rated}} I_{\text{rated}} = P_{\text{rated}}$$



Naiv varvtalsstyrning

Hastighetsstyrning via frekvensreglering fungerar inte om frekvensen ska förändras nämnvärt eftersom vid ändring av frekvensen förloras synkroniseringen.

Om man kör på med den diskuterade metoden är start ett stort problem som ibland löses med en kortsluten lindning för att få en induktiv effekt. Om lasten är liten kommer rotorn att synkroniseras när fältlindningen gradvis exciteras.

Vid mer dynamisk drift måste mer avancerad styrning användas som syftar till att direkt styra förhållandet mellan stator- och rotorflödet vilket leder till momentreglering. Detta ska vi studera härnäst.

Momentreglering

Momentreglering av synkronmaskiner kallas ofta för vektorstyrning.

I denna metod används dq0-transformerade storheter.

Modellantaganden

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{af} i_f$$
$$\lambda_q = L_q i_q$$
$$\lambda_0 = L_0 i_0$$
$$\lambda_f = \frac{3}{2} L_{af} i_d + L_{ff} i_f$$

$$v_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q$$
$$v_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e \lambda_d$$
$$v_0 = R_a i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt}$$
$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt}$$

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d)$$

- Balanserad 3-fas vilket leder till att alla nollföljdsstorheter är 0 och motsvarande ekvationer kan ignoreras.

Modellantaganden

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{af} i_f$$
$$\lambda_q = L_q i_q$$

$$\lambda_f = \frac{3}{2} L_{af} i_d + L_{ff} i_f$$

$$v_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q$$
$$v_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e \lambda_d$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt}$$

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d)$$

- Balanserad 3-fas vilket leder till att alla nollföljdsstorheter är 0 och motsvarande ekvationer kan ignoreras.
- Stationär drift under elektrisk rotationshastighet ω_e, ger konstanta strömmar $i_d = i_D$, $i_q = i_Q$ och $i_f = i_F$,

Modellantaganden

$$\lambda_d = L_d i_D + L_{af} i_F$$
$$\lambda_q = L_q i_Q$$

$$\lambda_f = \frac{3}{2} L_{af} i_D + L_{ff} i_F$$

$$v_d = R_a i_D + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_q$$
$$v_q = R_a i_Q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e \lambda_d$$

$$v_f = R_f i_F + \frac{d\lambda_f}{dt}$$

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)\left(\lambda_d i_Q - \lambda_q i_D\right)$$

- Balanserad 3-fas vilket leder till att alla nollföljdsstorheter är 0 och motsvarande ekvationer kan ignoreras.
- Stationär drift under elektrisk rotationshastighet ω_e, ger konstanta strömmar $i_d = i_D$, $i_q = i_Q$ och $i_f = i_F$, samt konstanta sammanlänkade flöden $\lambda_d = \lambda_D$, $\lambda_q = \lambda_Q$ och $\lambda_f = \lambda_F$.

Modellantaganden

$$\lambda_D = L_d i_D + L_{af} i_F$$
$$\lambda_Q = L_q i_Q$$

$$\lambda_F = \frac{3}{2} L_{af} i_D + L_{ff} i_F$$

$$v_d = R_a i_D \qquad - \omega_e \lambda_q$$

$$v_q = R_a i_Q \qquad + \omega_e \lambda_d$$

$$v_f = R_f i_F$$

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\lambda_D i_Q - \lambda_Q i_D)$$

- Balanserad 3-fas vilket leder till att alla nollföljdsstorheter är 0 och motsvarande ekvationer kan ignoreras.
- Stationär drift under elektrisk rotationshastighet ω_e, ger konstanta strömmar $i_d = i_D$, $i_q = i_Q$ och $i_f = i_F$, samt konstanta sammanlänkade flöden $\lambda_d = \lambda_D$, $\lambda_q = \lambda_Q$ och $\lambda_f = \lambda_F$.
- Ankarresistansen R_a försummas.

Modellantaganden

$$\lambda_D = L_d i_D + L_{af} i_F$$
$$\lambda_Q = L_q i_Q$$

$$\lambda_F = \frac{3}{2} L_{af} i_D + L_{ff} i_F$$

$$v_d = \qquad - \omega_e \lambda_q$$

$$v_q = \qquad + \omega_e \lambda_d$$

$$v_f = R_f i_F$$

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda_D i_Q - \lambda_Q i_D)$$

- Balanserad 3-fas vilket leder till att alla nollföljdsstorheter är 0 och motsvarande ekvationer kan ignoreras.
- Stationär drift under elektrisk rotationshastighet ω_e, ger konstanta strömmar $i_d = i_D$, $i_q = i_Q$ och $i_f = i_F$, samt konstanta sammanlänkade flöden $\lambda_d = \lambda_D$, $\lambda_q = \lambda_Q$ och $\lambda_f = \lambda_F$.
- Ankarresistansen R_a försummas.
- Cylindrisk rotor, dvs $L_d = L_q = L_s$.

Modellantaganden

$$\lambda_D = L_s i_D + L_{af} i_F$$
$$\lambda_Q = L_s i_Q$$

$$\lambda_F = \frac{3}{2} L_{af} i_D + L_{ff} i_F$$

$$v_d = \qquad - \omega_e \lambda_q$$

$$v_q = \qquad + \omega_e \lambda_d$$

$$v_f = R_f i_F$$

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda_D i_Q - \lambda_Q i_D)$$

- Balanserad 3-fas vilket leder till att alla nollföljdsstorheter är 0 och motsvarande ekvationer kan ignoreras.
- Stationär drift under elektrisk rotationshastighet ω_e, ger konstanta strömmar $i_d = i_D$, $i_q = i_Q$ och $i_f = i_F$, samt konstanta sammanlänkade flöden $\lambda_d = \lambda_D$, $\lambda_q = \lambda_Q$ och $\lambda_f = \lambda_F$.
- Ankarresistansen R_a försummas.
- Cylindrisk rotor, dvs $L_d = L_q = L_s$.

Ekvationerna sammantaget

$$\begin{aligned}
\lambda_D &= L_s i_D + L_{af} i_F \\
\lambda_Q &= L_s i_Q \\
\lambda_F &= \frac{3}{2} L_{af} i_D + L_{ff} i_F
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_d &= -\omega_e \lambda_q \\
v_q &= \omega_e \lambda_d \\
v_f &= R_f i_F
\end{aligned}$$

Momentet kan förenklas till

$$\begin{aligned}
T_{\text{mech}} &= \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)(\lambda_D i_Q - \lambda_Q i_D) = \\
&= \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)((L_s i_D + L_{af} i_F) i_Q - L_s i_Q i_D) = \\
&= \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right) L_{af} i_F i_Q
\end{aligned}$$

Momentet

Momentetformeln

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right) L_{af}\, i_F\, i_Q$$

säger att momentet är proportionellt mot fältströmmen i_F och ankarströmmens ortogonala komponent i_Q.

Formelen kan jämföras med den för likströmsmaskinen

$$T_{\text{mech}} = K_f\, I_f\, I_a$$

där kommuteringen alltid ser till att $\hat{I}_a$ är ortogonal mot $\hat{I}_f$.

Om $L_{af}\, i_F$ från

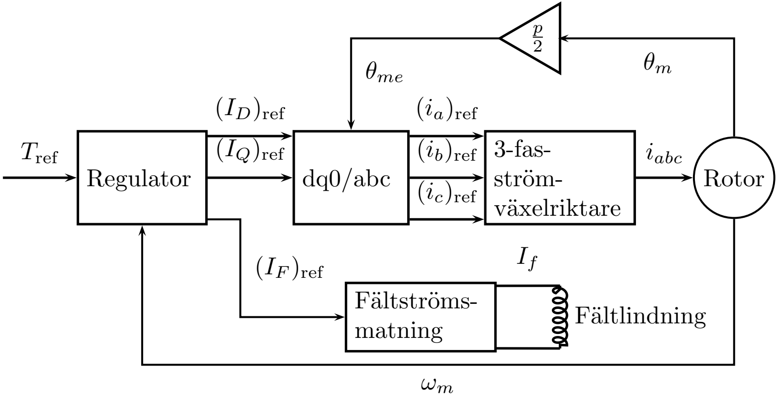
$$E_{af} = \frac{\omega_e L_{af}\, i_F}{\sqrt{2}} \qquad \text{(dc-maskin: } E_a = K_f\, I_f \omega_m\text{)}$$

substitueras in i momentekvationen fås

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{\sqrt{2}}\right)\frac{E_{af}\, i_Q}{\omega_e} \qquad \text{(dc-maskin: } T_{\text{mech}} = \frac{E_a I_a}{\omega_m}\text{)}$$

vilket ytterligare stärker analogin till likströmsmaskinsfallet.

Vektorstyrning



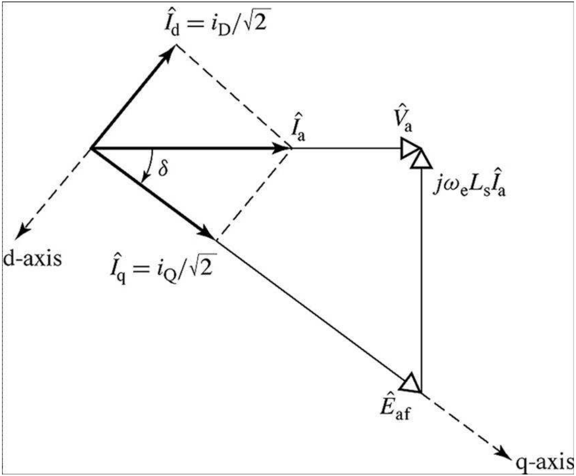
Vektorstyrning - villkor

I vektorstyrning regleras tre oberoende variabler i_F, i_Q och i_D.

Tre typiska villkor är

- Följa ett referensmoment T_{ref}.
- Köra motorn med märkflöde i rotorn.
- Effektfaktor 1.

Visardiagram som visar situationen



Vektorstyrning - algoritm

Steg 1. Givet ω_m beräkna ankarspänningen som motsvarar märkflöde

$$V_a = V_{a,\text{rated}} \frac{\omega_m}{\omega_{m,\text{rated}}}$$

Steg 2. Givet T_{ref} beräkna ankarströmmen

$$I_a = \frac{P_{\text{ref}}}{3V_a} = \frac{T_{\text{ref}}\omega_m}{3V_a}$$

Steg 3. Beräkna effektvinkeln δ enligt

$$\delta = -\arctan\left(\frac{\omega_e L_s I_a}{V_a}\right)$$

där $\omega_e = (p/2)\omega_m$.

Steg 4. Beräkna

$$(i_D)_{\text{ref}} = \sqrt{2} I_a \sin\delta \qquad (i_Q)_{\text{ref}} = \sqrt{2} I_a \cos\delta$$

Steg 5.

$$(i_F)_{\text{ref}} = \frac{2}{3}\left(\frac{2}{p}\right)\frac{T_{\text{ref}}}{L_{af}(i_Q)_{\text{ref}}}$$

Styrning av PM motorer

Den PM synkronmaskinen har bara två oberoende styrvariabler eftersom fältexciteringen sker med permanentmagneter.

Anta en motor där den inducerade spänningen utan last vid märkvarvtal $(\omega_e)_{\text{rated}}$ är $(E_{af})_{\text{rated}}$ då ges magnetisering av

$$\Lambda_{PM} = \frac{\sqrt{2}(E_{af})_{\text{rated}}}{(\omega_e)_{\text{rated}}}$$

där Λ_{PM} är en $L_{af} I_F$ ekvivalent. Två formler berörs av denna faktor, det sammanlänkade flödet för d-axeln

$$\lambda_D = L_s i_D + L_{af} i_F = L_s i_D + \Lambda_{PM}$$

samt momentet

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right) L_{af} i_F i_Q = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right) \Lambda_{PM} i_Q$$

Bestämning av strömmens tväraxelkomponent

Strömmens tväraxelkomponent bestämmer momentet

$$T_{\text{mech}} = \frac{3}{2}\left(\frac{p}{2}\right)\Lambda_{PM} i_Q$$

varför följning av ett referensmoment T_{ref} ger

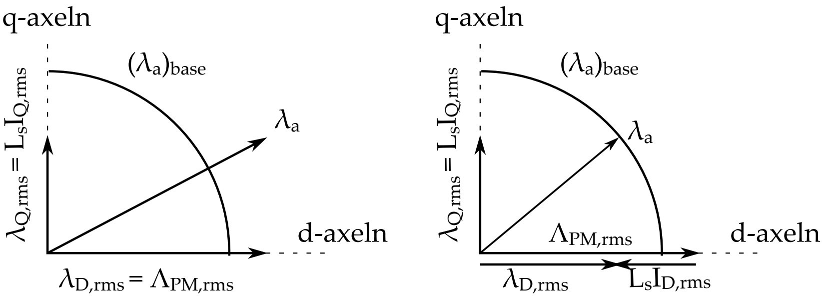
$$(i_Q)_{\text{ref}} = \frac{2}{3}\left(\frac{2}{p}\right)\frac{T_{\text{ref}}}{\Lambda_{PM}}$$

Därefter återstår att bestämma strömmens längsaxelkomponent i_D.

Bestämning av strömmens längsaxelkomponent

Strömmens längsaxelkomponent väljs ofta som

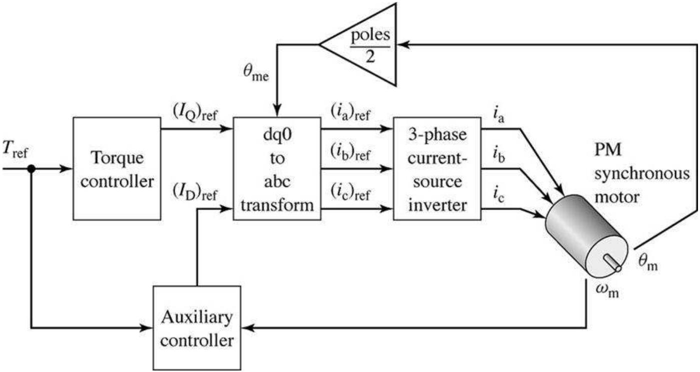
$$(i_D)_{\text{ref}} = \arg_{i_D} \min_{\lambda_a(i_D) \leq (\lambda_a)_{\text{base}}} |i_D|$$



Genom att minimera $|i_D|$ minimeras strömmen $I_a = \sqrt{(i_D^2 + i_Q^2)/2}$ och därmed också kopparförlusterna.

Bivillkoret att begränsa det sammanlänkade flödet ger att motorn inte mättas mer än vad den är designad för. Att välja $i_D \neq 0$ för att minska flödet kallas för <u>fältförsvagning</u>.

Blockdiagram för vektorstyrd PM motor



Sammanfattning

- dq0-transformationen
  - Överför statorkoordinater till rotorkoordinater.
  - Storheter som t ex strömmar, induktanser blir konstanter i dq0-koordinater.
  - Grundläggande för analys av rotorer med utpräglade poler.
  - Grundläggande för vektorstyrning.
- Analys av rotorer med utpräglade poler
  - Reluktans och ström delas upp i en komponent för längsaxeln och en för tväraxeln.
  - Moment/effekt ökar genom en reluktansterm.
  - Maskinen blir styvare, högre moment för samma effektvinkel.
- Styrning av synkronmaskiner
  - Varvtalsstyrning genom att reglera spänningens frekvensen oanvändbart.
  - Vektorstyrning krävs för varvtals/momentstyrning.
  - Typiska reglermål är att följa referensmoment, hålla märkflödet samt effektfaktor 1.
  - Styrvariabler är strömmens längs/tväraxelkomponent samt fältströmmen.