Mer än halvvägs i kursen…

- Drivsystemens mekanik
- Elektromekaniska omvandlare
- Likströmsmaskinen stationärt
- Modulation av kraftelektroniska omvandlare
- Vektorer
- Asynkronmaskinen
  - Sinusmatad, mjukstartad
  - Frekvensomvandlare, vektorer, dynamik
- Synkronmaskinen
  - Servomotorreglering
  - Generatordrift stationärt
- Varvtalsreglering
- Strömreglering
- Allmänt om drivsystem
  - Motorval
  - Exempel
- Simuleringar med matlab/simulink
- Tentaplugg!

F8: Synkronmaskinen (Kap 9)

Synkronmaskinen som generator

- SMs största tillämpning är som generator
- Finns i de flesta kraftverk för storskalig elenergiproduktion
- En typisk generator i kärnkraftverk och vattenkraftverk har
  - många poler dvs är långsamtroterande
  - utpräglade poler i rotorn
- För gasturbiner används s k turbomaskiner dvs snabbroterande synkrongeneratorer med
  - få poler
  - cylindrisk rotor
- Stora generatorer är ofta elektriskt magnetiserade, men det finns permanentmagnetiserade synkronmaskiner (PMSM) upp till några 100 kW

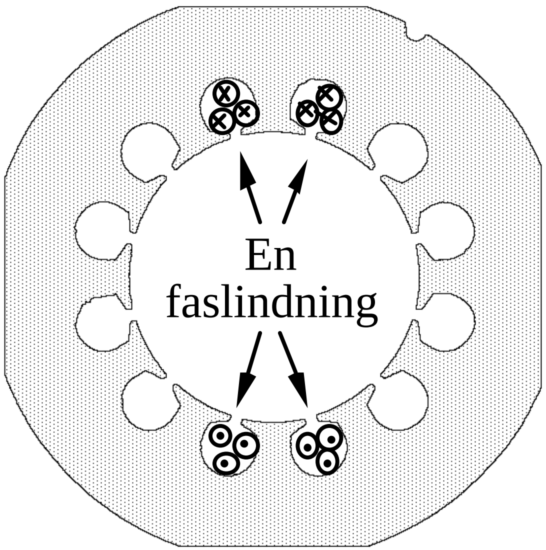
Synkronmaskinen som motor

- Synkronmaskiner används också för elektriska drivsystem

- Exempel:
  - traktionsdrifter (lok, elfordon)
  - industriella motordrifter (valsverk, gruvspel, hissar)
  - servosystem (positionsreglering)

Mekaniskt utförande
Statorn

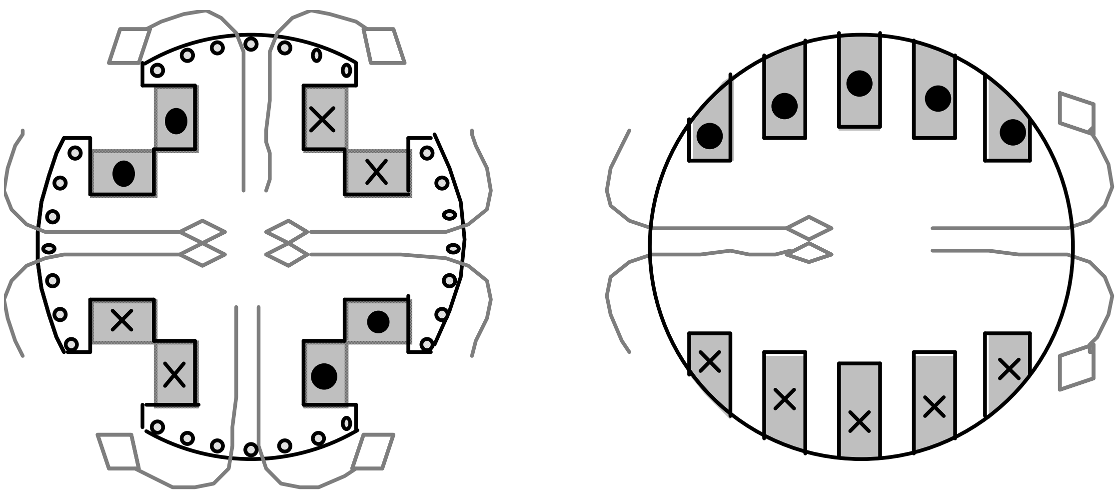
- Statorplåtarna ser ut som motsvarigheten hos en asynkronmaskin.
- Oftast är lindningarna sinusformigt utbredda (liksom hos AM).
- För mindre synkronmaskiner går inte detta eftersom antalet statorspår är för litet (som i Figur 9.1 nedan).



Figur 9.1. Statorplåt för synkronmaskin.

Mekaniskt utförande
Rotorn (I)

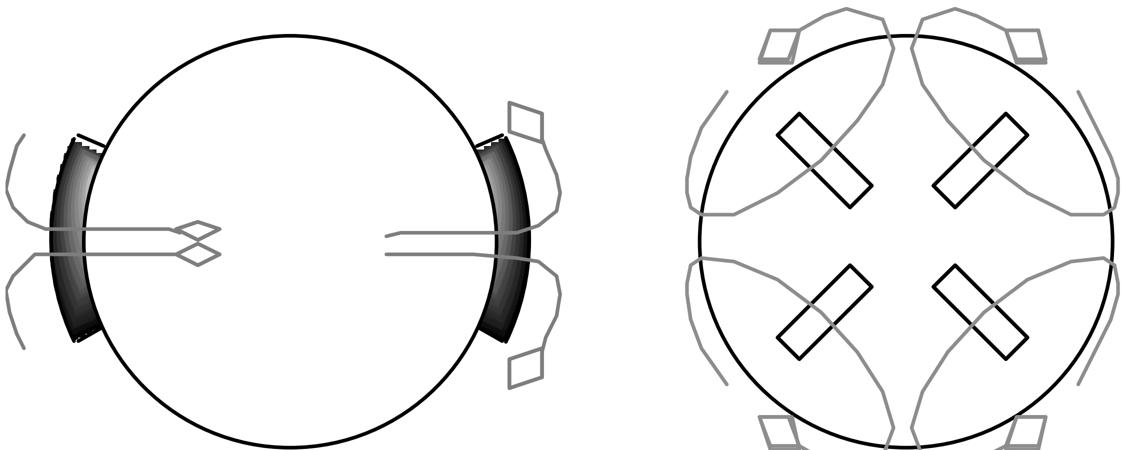
- De elektriskt magnetiserade synkronmaskinerna (EMSM) har magnetiseringslindningen förlagd i rotorn.
- Långsamtroterande generatorer har utpräglade poler i rotorn dvs en koncentrerad lindning.
- Turbomaskiner har icke-utpräglade poler i roton dvs magnetiseringslindningen är utbredd och förlagd i spår.



Figur 9.2. Rotor med utpräglade poler (th) och turborotor (tv).

Mekaniskt utförande
Rotorn (II)

- De permanentmagnetiserade synkronmaskinerna kan vara byggda med utanpåliggande eller djupt monterade magneter.
- De mest använda magnetmaterialen är Samarium-Cobolt och Neodymium-Boron-Järn.
- Den relativa permeabiliteten hos permanentmagneterna är låg ($\mu_r \approx 1$) vilket ger låg magnetiseringsinduktans L_m.



Figur 9.3. Rotor med ytmonterade och djupt monterade magneter.

Matematisk modell (I)

- Den elektriskt magnetiserade synkronmaskinen
  - används oftast som nätansluten generator
  - går därmed i stationär drift
  - modelleras stationärt

- Den permanentmagnetiserade synkronmaskinen
  - används ofta i transient drift (servo och högdynamiska applikationer)
  - Modelleras i transient hänseende

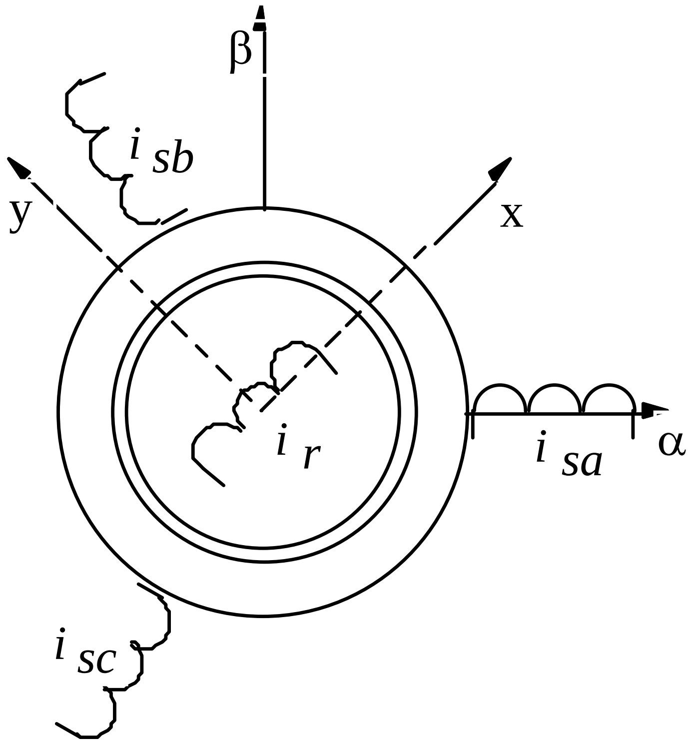
- Dämplindningar (burlindning motsvarande typisk AM-rotor) används för att dämpa inverkan av transienter framförallt i elektriskt magnetiserade generatorer. Eftersom vi studerar dessa i stationär drift behöver vi ej ta hänsyn till närvaron av dämplindningar.

Matematisk modell (II)

- I rotorn skapas magnetfältet huvudsakligen av
  - en magnetiseringslindning om magnetiseringsflödet går att ändra
  - eller en permanentmagnet om magnetiseringsflödet ej går att ändra

- Statorns lindningar är trefasiga som i asynkronmaskinen.
- Statorlindningen är ankarlindning eller arbetslindning (eftersom emk induceras i denna lindning)

Matematisk modell (III)



Figur 9.4. Synkronmaskinmodell med trefasig ankarlindning i statorn och enfasig fältlindning i rotorn.

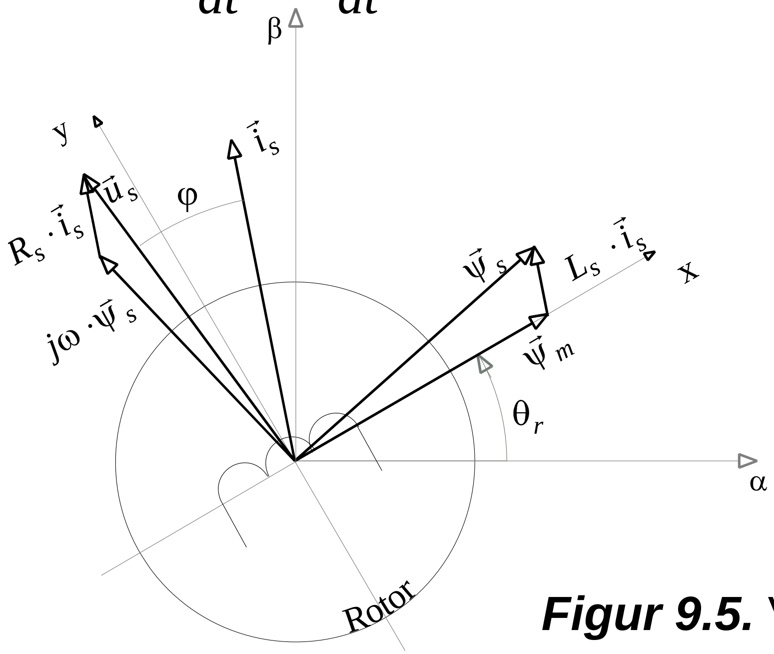
Matematisk modell (IV)
Generell transient modell

Statorekvationen uttryckt på vektorform i **statorkoordinater** ($\alpha\beta$)

$$\frac{d\vec{\psi}_s^{\,s}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\vec{\psi}_\delta^{\,s} + L_{s\lambda}\cdot\vec{i}_s^{\,s}\right) = \frac{d\vec{\psi}_\delta^{\,s}}{dt} + L_{s\lambda}\cdot\frac{d\vec{i}_s^{\,s}}{dt} = \vec{u}_s^{\,s} - R_s\cdot\vec{i}_s^{\,s}$$

Rotorekvationen uttryckt på vektorform i **rotorkoordinater** (xy)

$$\frac{d\vec{\psi}_r^{\,xy}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\vec{\psi}_\delta^{\,xy} + L_{r\lambda}\cdot\vec{i}_r^{\,xy}\right) = \frac{d\vec{\psi}_\delta^{\,xy}}{dt} + L_{r\lambda}\cdot\frac{d\vec{i}_r^{\,xy}}{dt} = \vec{u}_r^{\,xy} - R_r\cdot\vec{i}_r^{\,xy}$$



Figur 9.5. Vektorer i synkronmaskinen

Matematisk modell (V)
Generell transient modell

- De olika koordinatsystemen som används för elektriska maskiner är
  - $\alpha\beta$ (stationära)
  - *dq* (med magnetiseringsflödet som referens)

    d står för direct och *q* för quadrature (på tvären) vilket syftar på rotorns poler i det fall de är utpräglade.

    I kursmaterialet används dock beteckningen *xy*-systemet
  - *xy* (roterande med rotorn, x-axeln i magnetflödets riktning)

- För synkronmaskinen sammanfaller *dq*- och *xy*-systemen

- Vi ska uttrycka statorekvationen och rotorekvationen i xy-systemet
  - för den stationära modellen tex generatorer
  - för den transienta modellen tex servo-applikationer

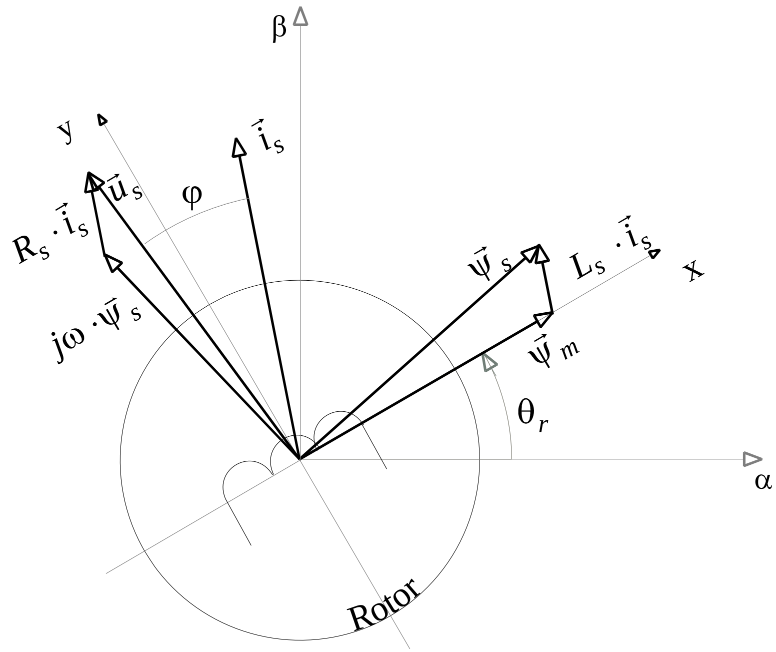
Matematisk modell (VI)
Generell transient modell

Samband mellan statorspänning, ström samt flöde på vektorform, i statorkoordinater och i rotorkoordinater:

$$\vec{u}_s^{\,s} = \vec{u}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r}$$

$$\vec{i}_s^{\,s} = \vec{i}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r}$$

$$\vec{\psi}_s^{\,s} = \vec{\psi}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r}$$



Figur 9.5. Vektorer i synkronmaskinen

Insättning i statorekvationen ger:

$$\frac{d\left(\vec{\psi}_\delta^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r}\right)}{dt} + L_{s\lambda} \cdot \frac{d\left(\vec{i}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r}\right)}{dt} = \vec{u}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r} - R_s \cdot \vec{i}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{d\vec{\psi}_\delta^{\,xy}}{dt} + j\frac{d\theta_r}{dt} \cdot \vec{\psi}_\delta^{\,xy} + L_{s\lambda} \cdot \frac{d\vec{i}_s^{\,xy}}{dt} + j\frac{d\theta_r}{dt} \cdot L_{s\lambda} \cdot \vec{i}_s^{\,xy} = \vec{u}_s^{\,xy} - R_s \cdot \vec{i}_s^{\,xy}$$

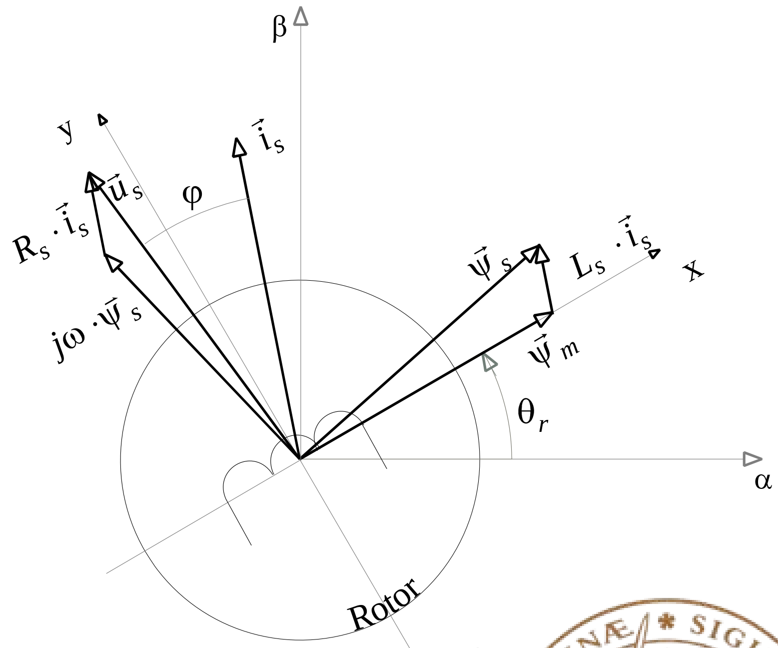
Matematisk modell (VII)
Generell transient modell

Synkronmaskinmodell i rotorkoordinater

$$\frac{d\vec{\psi}_{\delta}^{xy}}{dt} + j\omega \cdot \vec{\psi}_{\delta}^{xy} + L_{s\lambda} \cdot \frac{d\vec{i}_s^{xy}}{dt} + j\omega \cdot L_{s\lambda} \cdot \vec{i}_s^{xy} = \vec{u}_s^{xy} - R_s \cdot \vec{i}_s^{xy}$$

$$\frac{d\vec{\psi}_{\delta}^{xy}}{dt} + L_{r\lambda} \cdot \frac{d\vec{i}_r^{xy}}{dt} = \vec{u}_r^{xy} - R_r \cdot \vec{i}_r^{xy}$$

$$T = \vec{\psi}_{\delta} \times \vec{i}_s = \left(\psi_m + L_m \cdot \vec{i}_s\right) \times \vec{i}_s = \ldots = \psi_m \cdot i_{sy}$$



Figur 9.5. Vektorer i synkronmaskinen

Matematisk modell (VIII)

Transient modell av permanent magnetiserad SM

Permanentmagnetiserad synkronmaskin endast statorekvationen är av intresse

$$\vec{u}_s^{xy} = R_s \cdot \vec{i}_s^{xy} + \frac{d\vec{\psi}_\delta^{xy}}{dt} + j\omega \cdot \vec{\psi}_\delta^{xy} + L_{s\lambda} \cdot \frac{d\vec{i}_s^{xy}}{dt} + j\omega \cdot L_{s\lambda} \cdot \vec{i}_s^{xy}$$

Luftgapsflödet och statorflödet ges av

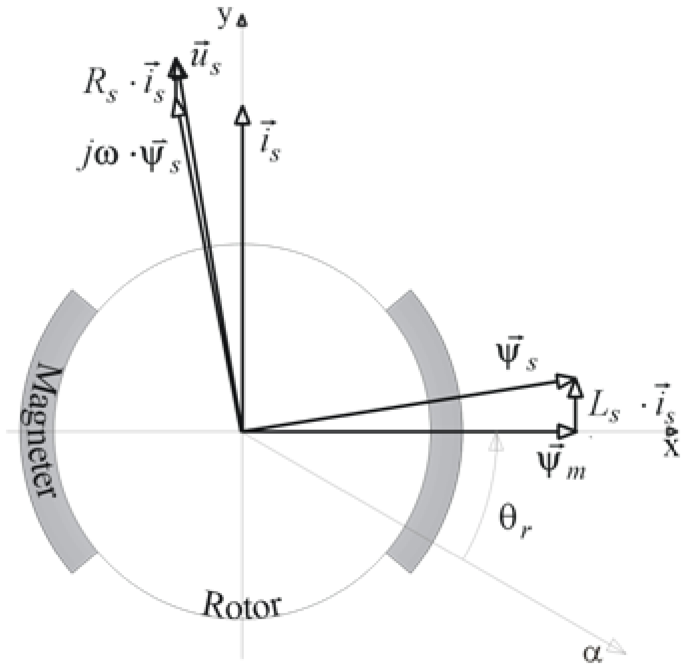
$$\vec{\psi}_\delta = \psi_m + L_m \cdot \vec{i}_s$$

$$\vec{\psi}_s = \vec{\psi}_\delta + L_{s\lambda} \cdot \vec{i}_s$$

Statorekvationen ges av (OBS $L_s = L_m + L_{s\lambda}$)

$$\vec{u}_s^{xy} = R_s \cdot \vec{i}_s^{xy} + L_s \cdot \frac{d\vec{i}_s^{xy}}{dt} + j\omega \cdot L_s \cdot \vec{i}_s^{xy} + j\omega \cdot \psi_m$$

Statorekvationen ovan går att använda nästan ”som den är” för motorstyrning i elektriska drivsystem!



Figur 9.6. PMSM i rotorkoordinater

Matematisk modell (IX)
Synkronmaskinen i drivsystem

- Det är endast strömkomponenten i *y*-riktningen som bildar vridmoment. Strömbörvärdena blir
- $$\begin{cases} i_{sx}^{*} = 0 \\ i_{sy}^{*} = T^{*} / \psi_m \end{cases}$$
- Detta kallas tvärströmsreglering
- Regulatorns arbetsgång:

  Strömbörvärdena ovan => spänningsbörvärden i *xy*-koordinater =>spänningsbörvärden i $\alpha\beta$-koordinater => spänningsbörvärden i *abc*-koordinater => triangelvågsmodulatorn

Matematisk modell (X)

Synkronmaskinen i drivsystem

Regulatorn är i princip alltid tidsdiskret (man använder samplade mätstorheter) eftersom regulatorn är implementerad i en microprocessor (digital signalprocessor, DSP).

Statorekvationen i rotorkoordinater:

$$\vec{u}_s^{xy} = R_s \cdot \vec{i}_s^{xy} + L_s \cdot \frac{d\vec{i}_s^{xy}}{dt} + j\omega \cdot L_s \cdot \vec{i}_s^{xy} + j\omega \cdot \psi_m$$

Kan tolkas som en strömregulator (endast *P*-del här) enligt:

$$\vec{u}_s^* = R_s \cdot \vec{i}_s^* + L_s \cdot \frac{\left(\vec{i}_s^* - \vec{i}_s\right)}{T_s} + j\omega \cdot L_s \cdot \vec{i}_s^* + j\omega \cdot \vec{\psi}_m \qquad \vec{i}_s^* = \frac{T^*}{\psi_m}$$

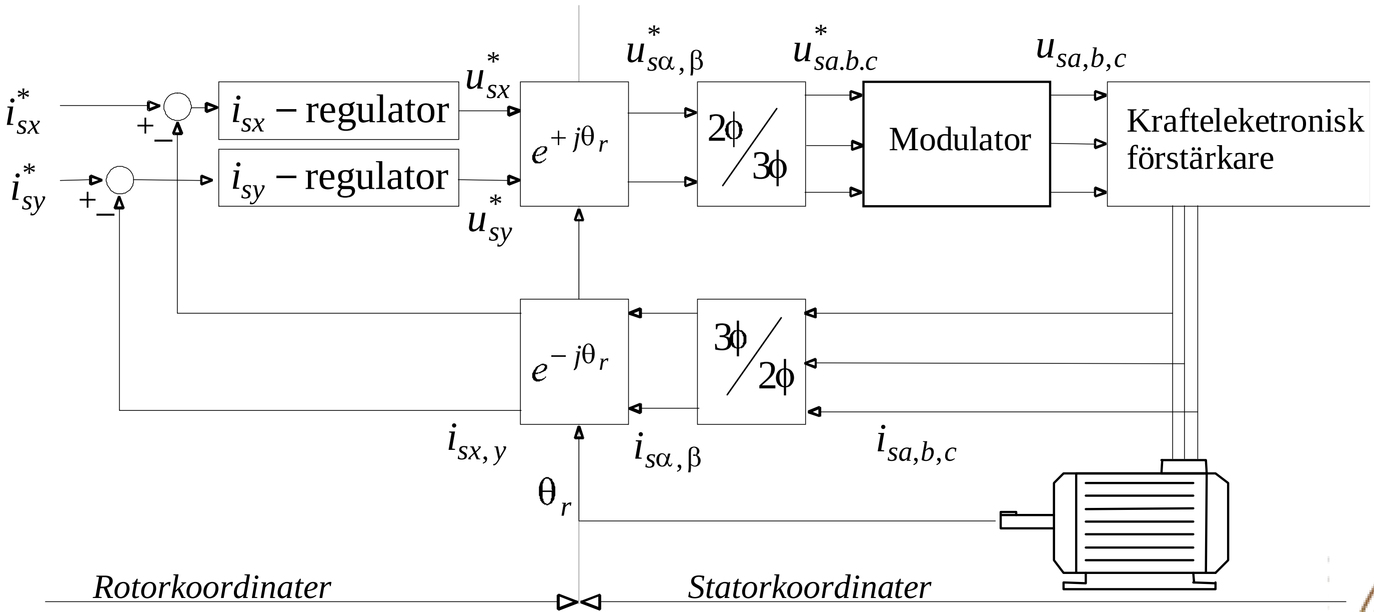
Uttrycket ovan gäller för en dead-beat regulator. Vi kommer att härleda fler uttryck för denna typ av regulator när vi studerar strömreglering.

Matematisk modell (XI)

Synkronmaskinen i drivsystem

Regulatorn skriven på komponentform:

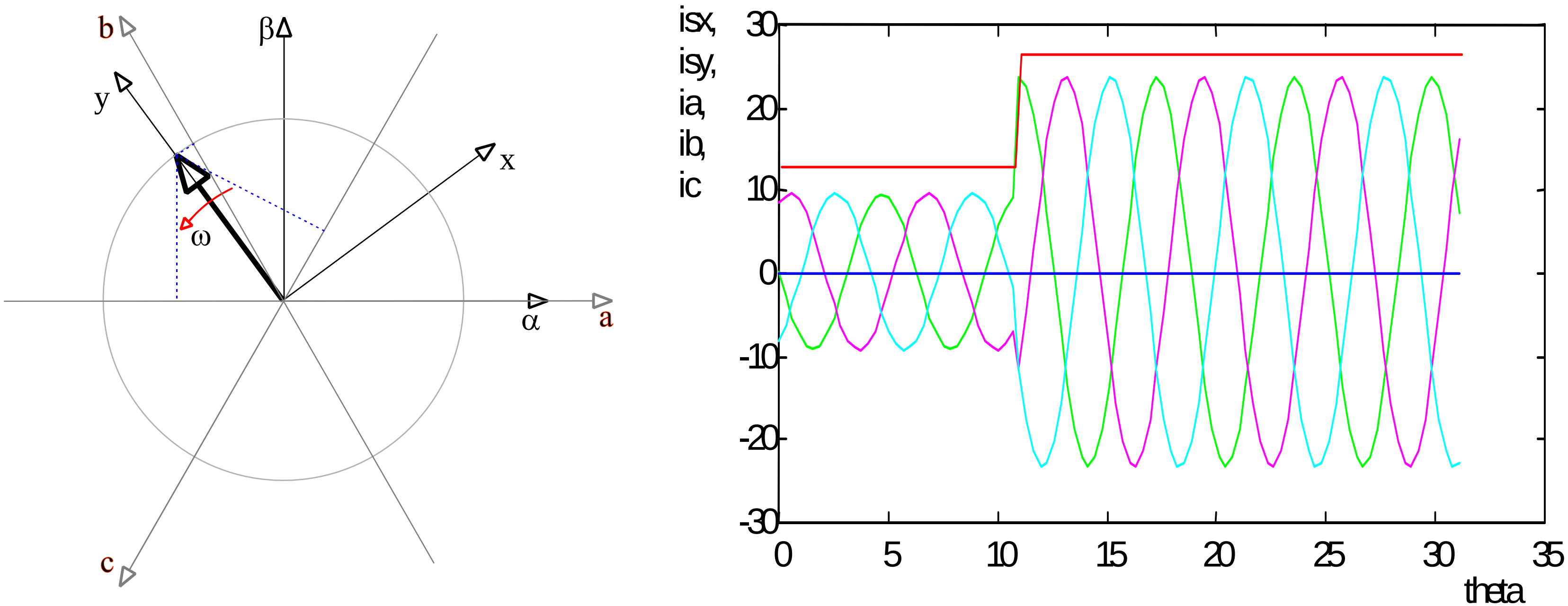
$$
\begin{cases}
u_{sx}^{*} = R_s \cdot i_{sx} + L_s \cdot \dfrac{\left(i_{sx}^{*} - i_{sx}\right)}{T_s} - \omega \cdot L_s \cdot i_{sy} \\
u_{sy}^{*} = R_s \cdot i_{sy} + L_s \cdot \dfrac{\left(i_{sy}^{*} - i_{sy}\right)}{T_s} + \omega \cdot L_s \cdot i_{sx} + \omega \cdot \psi_m
\end{cases}
\quad \text{där} \quad
\begin{cases}
i_{sx}^{*} = 0 \\
i_{sy}^{*} = \dfrac{T^{*}}{\psi_m}
\end{cases}
$$



Figur 9.7. Reglersystem för vektorreglering av PMSM

Matematisk modell (XII)
Synkronmaskinen i drivsystem

Exempel: Statorströmmen hos en PMSM gör ett steg i y-led från 10 till 25 A. Strömmen i x-led är noll under hela förloppet.



Figur 9.8. Momentsteg i abc- och xy-koordinater, utgående från rotorvarvtalet 500 rpm. Fasstorheterna, både i xy-kooordinater och i trefassystemet är projektionen av den roterande vektorn på respektive axel. Notera att i_{sy} är större än fasstorheternas toppvärden. Det beror på effektinvariant trefas-tvåfasomvandling, se appendix *B*.

Matematisk modell (XIII)
Stationär modell av EMSM

I **stationärtillstånd** gäller att luftgapsflödets belopp är konstant och att statorströmmens komponenter i xy-systemet är konstanta, dvs derivatorna statorekvationen uttryckt i **rotorkoordinater** är noll:

$$j\omega \cdot \vec{\psi}_{\delta}^{xy} + j\omega \cdot L_{s\lambda} \cdot \vec{i}_s^{xy} = \vec{u}_s^{xy} - R_s \cdot \vec{i}_s^{xy}$$

Statorlindningens självinduktans är $L_s = L_m + L_{s\lambda}$
Luftgapsflödet ges av $\vec{\psi}_{\delta} = \vec{\psi}_m + L_m \cdot \vec{i}_s$

Bidraget från statorströmmen kallas ankarreaktion. Statorflödet roterar med samma hastighet som den matande spänningen (i $\alpha\beta$-systemet) dvs ω.

I stationäritet gäller alltså:

$$j\omega \cdot \psi_m + j\omega \cdot \left(L_m + L_{s\lambda}\right) \cdot \vec{i}_s^{xy} = \vec{e}_s^{xy} + j\omega \cdot L_s \cdot \vec{i}_s^{xy} = \vec{u}_s^{xy} - R_s \cdot \vec{i}_s^{xy}$$

Matematisk modell (XIV)
Stationär modell av EMSM

Eftersom koordinatsystemet roterar med samma hastighet som både flödesvektorn och rotorn så är alla storheter likstorheter. Eftersom stationärtillstånd råder så är dessutom alla derivator noll. Därför kan man uttrycka storheterna i effektivvärdesskala i stället för toppvärdesskala.

$$\begin{cases} \vec{u}_s^{\,s} = \sqrt{3} \cdot \overline{U}_s e^{j\theta_r} = \vec{u}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r} \\ \vec{i}_s^{\,s} = \sqrt{3} \cdot \overline{I}_s \cdot e^{j\theta_r} = \vec{i}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r} \\ \vec{\psi}_s^{\,s} = \sqrt{3} \cdot \overline{\Psi}_s \cdot e^{j\theta_r} = \vec{\psi}_s^{\,xy} \cdot e^{j\theta_r} \end{cases}$$

Dessa effektivvärdesstorheter sätts in i

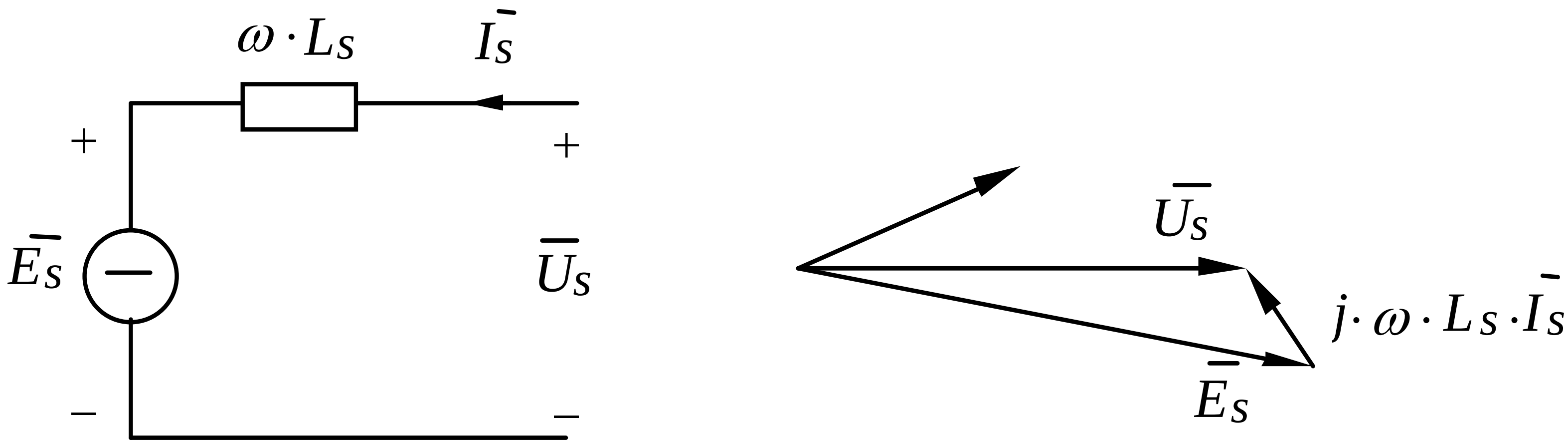
$$j\omega \cdot \psi_m + j\omega \cdot (L_m + L_{s\lambda}) \cdot \vec{i}_s^{\,xy} = \vec{e}_s^{\,xy} + j\omega \cdot L_s \cdot \vec{i}_s^{\,xy} = \vec{u}_s^{\,xy} - R_s \cdot \vec{i}_s^{\,xy}$$

Vilket ger:

$$\overline{U}_s = R_s \cdot \overline{I}_s + j\omega L_s \cdot \overline{I}_s + \overline{E}_s$$

Matematisk modell (XV)
Stationär modell av EMSM

Detta leder till en synkronmaskinmodell som ofta används i trefasberäkningar (klassisk elkraftteknik), dvs en modell som kan åskådliggöras med visare och visardiagram. Observera att figuren nedan visar **motoriskt** referensval).



Figur 9.9. Synkronmaskinmodell med visardiagram för en fas i stationärtillstånd.

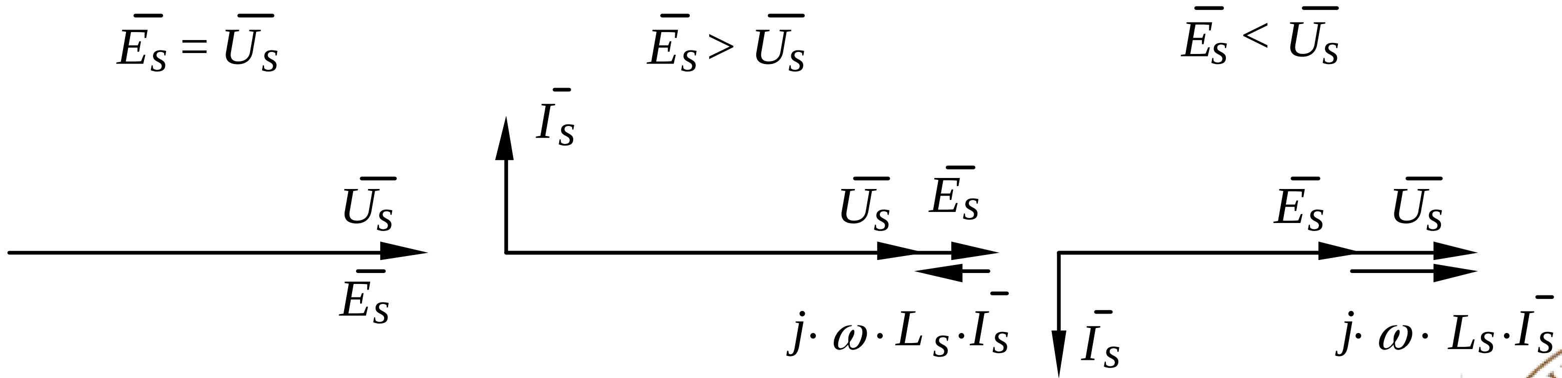
Matematisk modell (XVI)

Olika drifttillstånd vid fast anslutning till nätet

Den inducerade spänningen används för att styra den reaktiva effekten. Den inducerade spänningen ändras genom att ändra magnetiseringsströmmen för en nätansluten generator.

$$\left|\overline{E}_s\right| = \omega \cdot \psi_m = \omega \cdot L_m \cdot I_m$$

Alltså kan man få maskinen att både producera och generera reaktiv effekt beroende på om man över- eller undermagnetiserar maskinen.

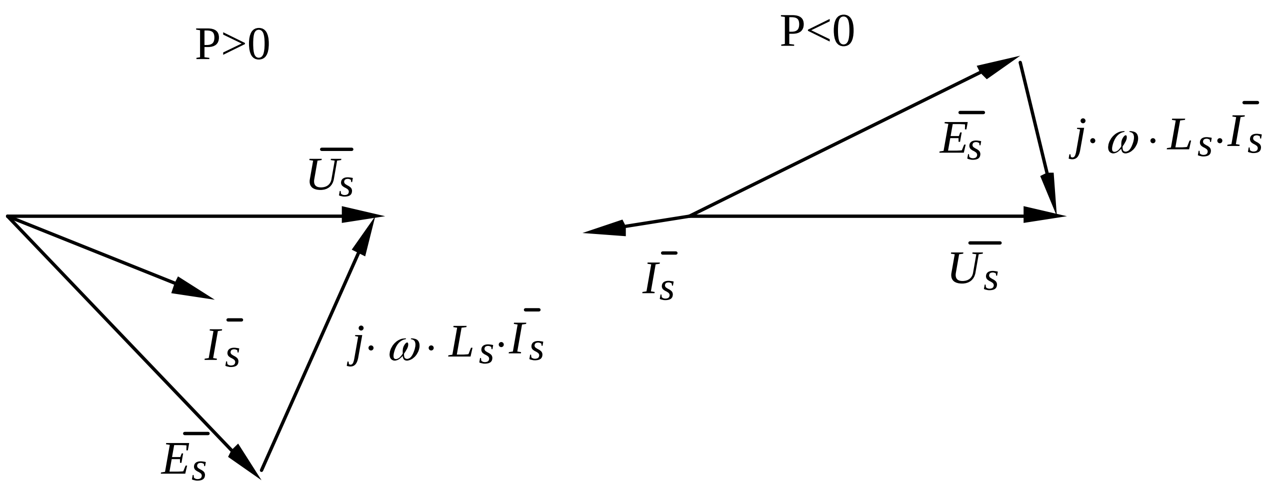


Figur 9.10. Olika driftsfall med tomgående synkronmaskin.

Matematisk modell (XVII)
Olika drifttillstånd vid fast anslutning till nätet

När synkronmaskinen belastas dvs då maskinen genererar eller konsumerar aktiv effekt så visar det sig att maskinen även genererar eller konsumerar reaktiv effekt även om den är magnetiserad så att den reaktiva effekten är noll i tomgång.

Detta beror på närvaro av maskinens statorinduktans:



Figur 9.11. Synkronmaskinen vid motor- och generatordrift. Obs motoriskt referensval. Effekten positiv in i maskinen!