

Fö 10 - TSFS11 Energitekniska System Synkronmaskinen

Christofer Sundström

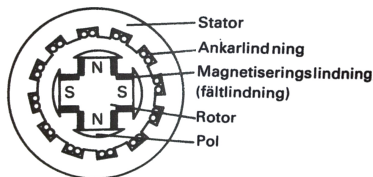
7 maj 2018

- 1 Uppbyggnad och arbetsätt
 - Konstruktion
 - Roterande flöde, repetition
 - Arbetsprincip
- 2 Magnetisering av rotorn
 - Ytterpolmaskin
 - Dämplindning och asynkron start
- 3 Infasning
- 4 Elektriska egenskaper
 - Kretsschema motor och generator drift
 - Över- och undermagnetisering
 - Aktiv effekt
 - Reaktiv effekt
 - Sammanfattning motor och generator drift
- 5 Beräkningsexempel

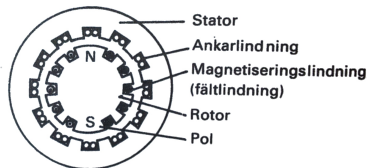
Synkronmaskinen, uppbyggnad

En synkronmaskin är uppbyggd på samma sätt som en asynkronmaskin fast med likströmsmagnetiserad rotor.

Rotorn som alltså har fix nord- och sydpol följer det roterande magnetfältet synkront.



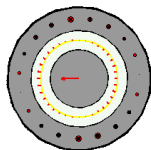
Figur 7.41 a. Fyrpolig synkronmaskin med utpräglade poler.



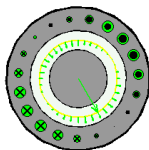
Figur 7.41 b. Tvåpolig synkronmaskin med cylindrisk rotor.

Synkronmaskinen går att köra både som motor och generator även om den i särklass vanligaste användningen är som generator.

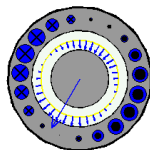
Roterande flöde, repetition



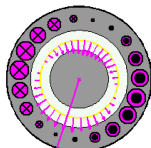
Phase A



Phase B

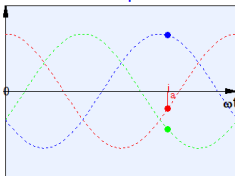


Phase C

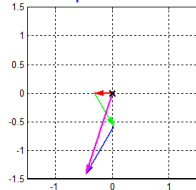


Resultant

Balanced three-phase currents



Blue vectors



Ögonblicksbild av

<http://www.ece.umn.edu/users/riaz/animations/abcvec.gif>

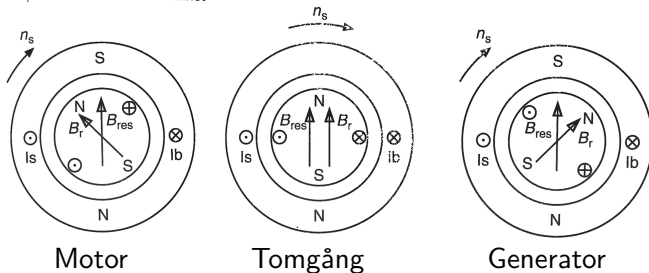
Synkronmaskinens arbetsprincip

- Vid motordrift släpas rotorn runt av det roterande fältet i statorn.
- Vid generatordrift inducerar rotorn istället ett roterande flöde i statorn.
- Medelmomentet på en stillastående rotor är noll räknat över ett helt varv.
- Direktstart är därför endast möjlig för mycket små synkronmotorer som hinner varva upp till synkront varvtal på mindre än en halv period.
- För att starta och koppla in en större synkronmaskin till nätet måste någon typ av infasning utföras.
- Vid överlast säger man att motorn *faller ur* och motorn tappar då helt synkroniseringen.

Synkronmaskinen som motor och generator

B_{res} = Statorflödets flödestäthet

B_r = Rotorflödets flödestäthet



Figur: Ögonblicksbild av rotor- och resulterade flöde för synkronmaskinens olika driftstillstånd. För motordrift ligger rotorflödet efter det resulterande flödet och vid generatordrift före.

Momentet från synkronmaskinen blir

$$M = k \cdot B_{res} \cdot B_r \cdot \sin \gamma$$

där B_{res} luftgapsflödets och B_r rotorflödets storlek och γ är vinkeln mellan flödesvektorerna.

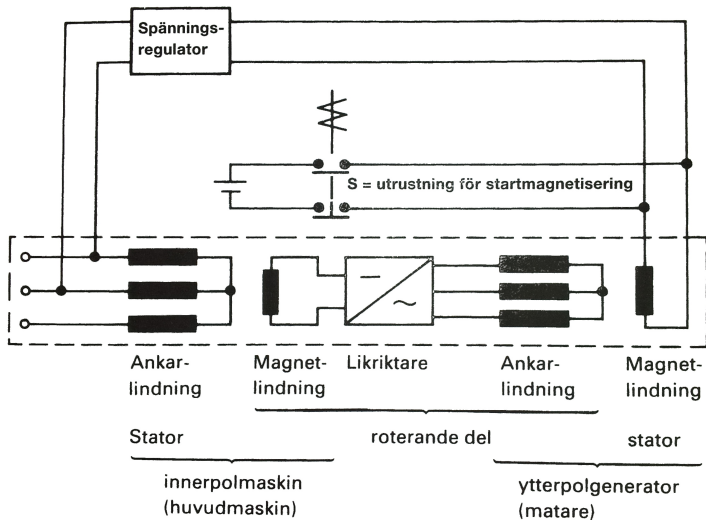
Magnetisering av rotorn

Rotorn hos synkronmaskinen kan bestå av permanentmagnetmaterial alternativt en lindning som magnetiseras med DC-ström.

DC-strömmen som magnetiserar rotorn förs över antingen genom släpplingar eller med hjälp av en s.k. ytterpolmaskin eller matare.

I en ytterpolmaskin har stator och rotor bytt plats så att statorn genererar ett stationärt magnetflöde som rotorn gör om till växelspanning. Växelspanningen inne i rotorn omvandlas sedan till likspanning som magnetiserar rotorn i huvudgeneratorn.

Magnetisering av rotorn, exempel på ytterpolmaskin



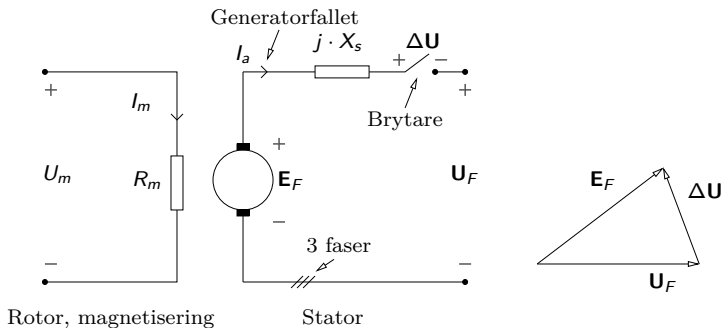
Figur: Principskema över en borstlös synkronmaskin bestående av en innerpolmaskin (Generator) och en ytterpolmaskin (För matning av rotorn)

Dämpblindning och asynkron start

För att hjälpa till med infasning och för att verka hämmande på effektpendlingar så används ibland dämpblindningar som påminner om asynkronmaskinens rotorlindningar.

Vid infasning av en synkronmotor kan alltså maskinen köras som en asynkronmaskin varpå den varvar upp till nära synkront varvtal. För att fullt uppnå det synkrona varvtalet måste dock rotorn magnetiseras. Detta kallas normalt för asynkron start.

Synkronmaskinen, krettschema för infasning



Enkel version av ekvivalent krettschema för synkrogeneratorn. För motorfallet ritas strömpilen istället in i maskinen. Notera att lindningsresistans försummas i figuren.

Längden på E_F (ibland kallad E_r) bestäms av varvtalet och magnetiseringsströmmen I_m . Maskinen kopplas in till nätet när $\Delta U = 0$.

De fyra villkoren som gäller för att ΔU skall vara noll för alla faser samtidigt och under en längre tid är

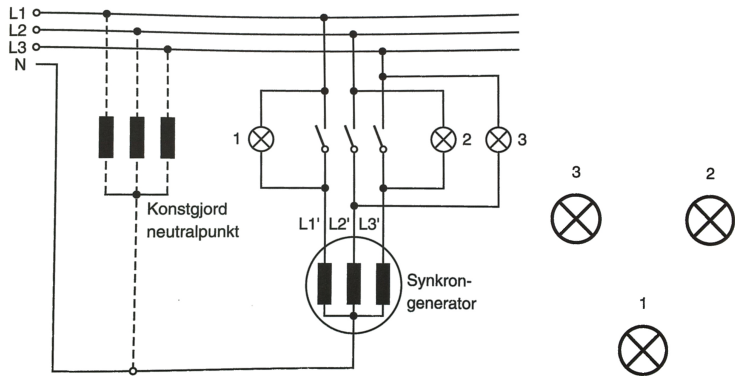
- ① **Lika fasföljd** hos generator och nät.
- ② **Lika spänning** hos generator och nät, dvs $\Delta U = 0$, kontrolleras med voltmeter.
- ③ **Lika frekvens** hos generator och nät, kontrolleras med två frekvensmetrar som är parallellkopplade med voltmetrarna.
- ④ **Lika fasläge** hos generatorspänning och nätspänning. Faslikheten kontrolleras med ett oscilloskop med två kanaler och två mätprober.

Synkronmaskinen, infasning

Den startmetod som tillämpas för synkrogeneratorer kallas vanligen infasning och omfattar fyra moment:

- 1 Uppkörning av generatorn till synkront varvtal med hjälp av aggregatets drivmotor, t ex vattenturbin i vattenkraftverk.
- 2 Spänningssättning av generator genom justering av magnetiseringsströmmen I_m så att generatorn får samma spänning som nätet.
- 3 Synkronisering. Varvtalet justeras så att nätet och generatorn får samma frekvens, dvs \mathbf{E}_F och \mathbf{U}_F roterar lika fort.
- 4 Infasning. Generatorn kopplas till nätet när generator- och nätspänning har samma fasläge, dvs \mathbf{E}_F och \mathbf{U}_F har samma fasvinkel.

Synkronmaskinen, infasning

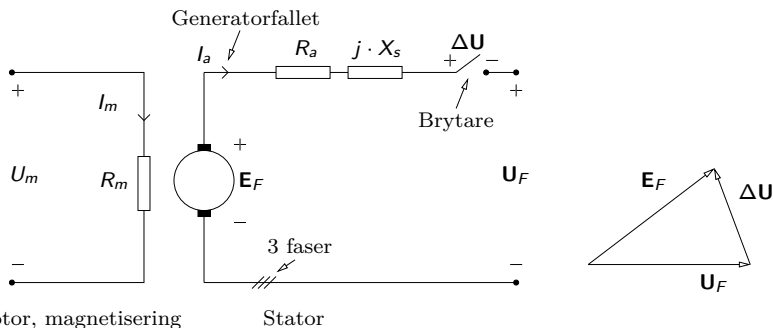


Figur 7.44 a. Lampor kopplade för s.k. roterande fasning.

b. Lampornas placering.

Figur: Exempel på koppling för roterande fasning. Lamporna 2 och 3 korskopplas över L2 och L3 och placeras i en triangel. På så sätt fås ett roterande ljusfält som visar om hastigheten ska ökas eller minskas.

Synkronmaskinen, krettschema



Ekvivalent krettschema för synkrogeneratorn. R_a är lindningsresistans, X_s synkronreaktans (även X_d). Spänningarna E_F och U_F är nätspänning resp. elektromotorisk kraft.

Längden på E_F bestäms av varvtalet och magnetiseringsströmmen I_m enligt $E_F = k \cdot \omega_e \cdot I_m$.

Över- och under-magnetisering

Vid drift används magnetiseringsströmmen för att styra storleken på E_F så att önskad driftspunkt uppnås. Kom ihåg

$$E_F = k \cdot \omega_e \cdot I_m$$

- Om E_F är **större** än U_F säger vi att maskinen är **övermagnetiserad**
- Om E_F är **mindre** än U_F säger vi att maskinen är **undermagnetiserad**
- Vid övermagnetisering beter sig maskinen som en kondensator och vid undermagnetisering som en spole.

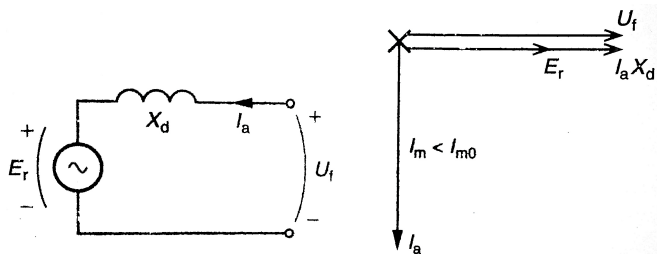
Över- och under-magnetiserad

- $E_F > U_F \rightarrow$ Övermagnetiserad (Kondensatorverkan)
- $E_F < U_F \rightarrow$ Undermagnetiserad (Spolverkan)

(Låt oss titta på några exempel som klargör varför det blir så här)

Ex: Visardiagram, undermagnetisering vid tomgång

I figuren nedan är E_r (E_F) **kortare** än U_f (undermagnetiserad). Längderna på U_f och E_r är givna och deras vinkelskillnad är noll, pga tomgång, samt att om R_a försummas så är vinkeln mellan flödesvektorerna och mellan \mathbf{U}_F och \mathbf{E}_F samma. Denna vinkel kallas lastvinkel Θ .



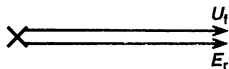
Figur 7.58. Undermagnetiserad synkronmaskin i tomgång.

Riktningen på strömmen I_a har **motor-referens**, dvs in i maskinen. För det aktuella driftsfallet ligger strömmen I_a efter spänningen U_f precis som en spole.

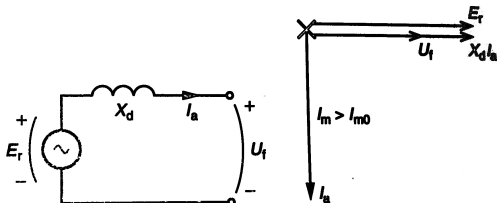
(Undermagnetisering \rightarrow Spolverkan)

Ex: Visardiagram, övermagnetisering vid tomgång

E_r **längre** än U_f (övermagnetiserad). Vinkeln mellan E_r och U_f är noll (tomgång).



Figur 7.56. Visardiagram för tomgångsmagnetiserad synkronmaskin.



Figur 7.57. Övermagnetiserad synkronmaskin i tomgång.

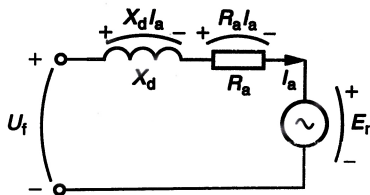
Riktningen på strömmen I_a har **generator-referens**, dvs ut ur maskinen. I figuren ligger strömmen I_a efter spänningen U_f precis som för en spole, **men** sett som en last har I_a fel tecken.

Sett som en last från nätet ligger alltså strömmen före spänningen, precis som en kondensator.

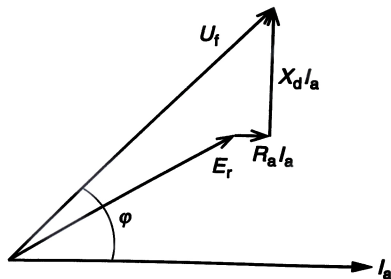
(Övermagnetisering -> Kondensatorverkan)

Ex: Visardiagram, undermagnetisering vid motordrift

E_r kortare än U_f (undermagnetiserad). U_f ligger före E_r (motordrift).



Figur 7.48 a. Ekvivalent elektriskt schema för en fas hos synkronmotorn.

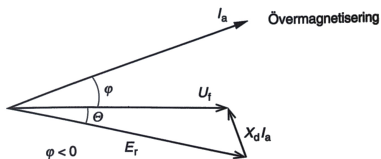
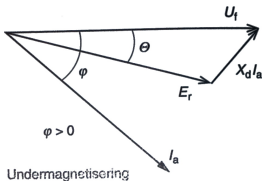
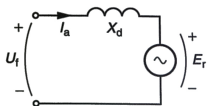


b. Visardiagram (undermagnetiserad synkronmotor).

För det aktuella driftsfallet ligger strömmen I_a efter spänningen U_f precis som en spole.

(Undermagnetisering -> Spolverkan)

Sammanfattning magnetiseringsförhållanden motordrift



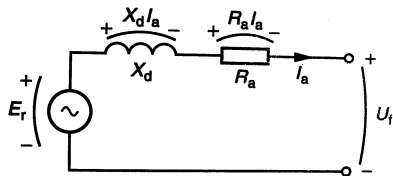
Figur 7.59. Motordrift.

Olika magnetiseringsförhållanden.

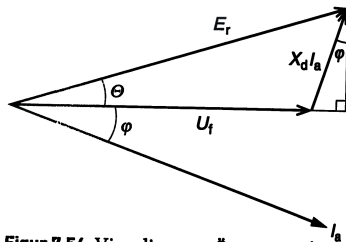
$$\sqrt{3} \cdot E_r = \sqrt{\left(U_h - X_d \frac{Q}{U_h} \right)^2 + \left(X_d \cdot \frac{P}{U_h} \right)^2}$$

Ex: Visardiagram, övermagnetisering vid generatordrift

E_r längre än U_f (övermagnetiserad). U_f ligger efter E_r (generatordrift).



Figur 7.53. Ekvivalent elektriskt schema för en fas hos synkrongeneratorn.



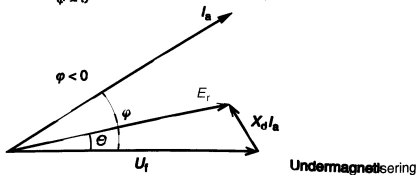
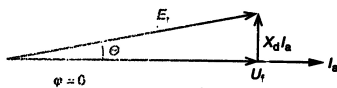
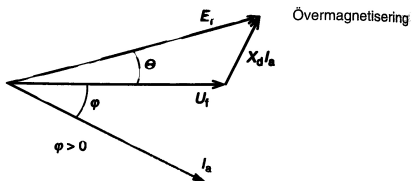
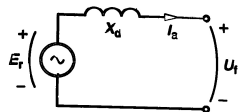
Figur 7.54. Visardiagram. Övermagnetiserad synkrongenerator (R_a försummad).

Riktningen på strömmen I_a har **generator-referens**, dvs ut ur maskinen. I figuren ligger strömmen I_a efter spänningen U_f precis som för en spole, **men** sett som en last har I_a fel tecken.

Sett som en last från nätet ligger alltså strömmen före spänningen, precis som en kondensator.

(Övermagnetisering -> Kondensatorverkan)

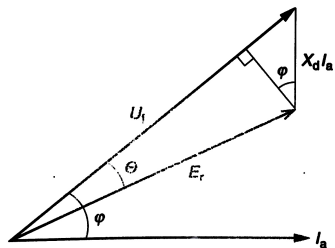
Sammanfattning magnetiseringsförhållanden generatordrift



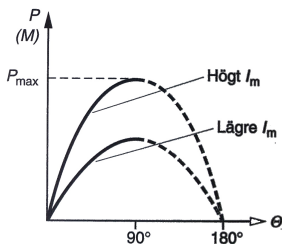
Figur 7.61. Generatordrift. Olika magnetiseringsförhållanden.

$$\sqrt{3} \cdot E_r = \sqrt{\left(U_h - X_d \frac{P}{U_h} \right)^2 + \left(X_d \cdot \frac{P}{U_h} \right)^2}$$

Aktiv effekt vid motordrift



Figur 7.50. Visardiagram för undermagnetiserad synkronmotor (R_a försummad).



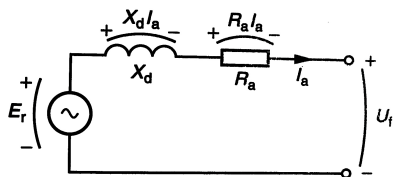
Figur 7.51. Effekten hos en synkronmotor som funktion av belastningsvinkeln.

Geometrin från figuren ger att

$$P = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_a \cdot \cos \varphi = 3U_f I_a \cos \varphi = 3 \cdot E_F \cdot I_a \cdot \cos(\varphi - \Theta)$$
$$\cos \varphi = \frac{E_F \cdot \sin \Theta}{X_d \cdot I_a}$$
$$\implies P = \frac{3 \cdot E_F \cdot U_f}{X_d} \sin \Theta$$

Aktiv effekt vid generatordrift

På samma sätt får vi för generatordriften

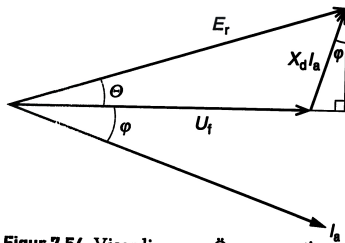


Figur 7.53. Ekvivalent elektriskt schema för en fas hos synkrogeneratorn.

Geometrin från figuren ger p.s.s. att

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_a \cdot \cos \varphi \quad \text{och} \quad \cos \varphi = \frac{E_F \cdot \sin \Theta}{X_d \cdot I_a}$$
$$\Rightarrow P = \frac{3 \cdot E_F \cdot U_f}{X_d} \sin \Theta$$

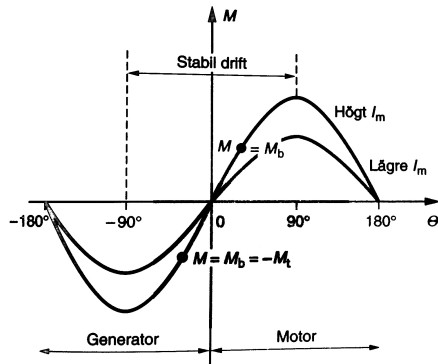
Notera: $\Theta < 0$ för generatordrift men den aktiva effekten skrivs ändå positiv. (Det blir än mer komplicerat med reaktiv effekt)



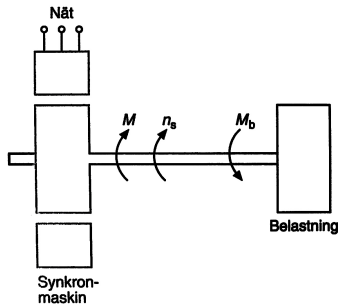
Figur 7.54. Visardiagram. Övermagnetiserad synkrogenerator (R_a försummad).

Sammanfattning aktiv effekt och moment

Driftsförhållanden kan sammanfattas enligt



Figur 7.55 a. Aktiva effektförhållanden hos synkronmaskinen.



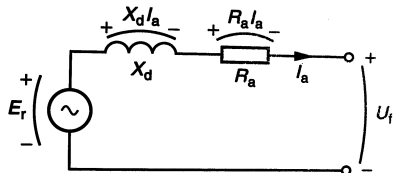
b. Definition av momentriktningar.

Notera att maskinen endast är stabil i intervallet $-90^\circ < \theta < 90^\circ$.

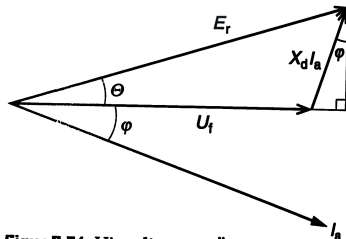
(Antag en konstant last med fixt bromsmoment och en tänkt störning kring jämvikt. Verkar det resulterande momentet för att återgå till det gamla punkten?)

Reaktiv effekt

Betrakta återigen den övermagnetiserade synkrogeneratorn



Figur 7.53. Ekvivalent elektriskt schema för en fas hos synkrogeneratorn.



Figur 7.54. Visardiagram. Övermagnetiserad synkrogeneratör (R_a försummad).

Geometrin från figuren ger att

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I_a \cdot \sin \varphi \\ \sin \varphi &= \frac{E_F \cdot \cos \Theta - U_f}{X_d \cdot I_a} \\ \Rightarrow Q &= \frac{3 \cdot U_F \cdot I_a \cdot (E_F \cdot \cos \Theta - U_F)}{X_d \cdot I_a} = \\ &= \frac{3 \cdot U_F \cdot E_F \cdot \cos \Theta}{X_d} - \frac{3 \cdot U_F^2}{X_d} \end{aligned}$$

Reaktiv effekt, teckenregler

För en **motor** är aktiv **förbrukad effekt positiv**. Samtidigt gäller även att för en **generator** är aktiv **producerad effekt positiv**. Därmed byter även den reaktiva effekten teckenkonvention för de två fallen.

Motor

Förbrukad aktiv effekt positiv

Förbrukad reaktiv effekt positiv

$Q > 0$ vid undermagnetisering

$Q < 0$ vid övermagnetisering.

Generator

Producerad aktiv effekt positiv

Producerad reaktiv effekt positiv

$Q > 0$ vid övermagnetisering.

$Q < 0$ vid undermagnetisering

Minns:

Över- och under-magnetiserad

- $E_F > U_F \rightarrow$ Övermagnetiserad (Kondensatorverkan)
- $E_F < U_F \rightarrow$ Undermagnetiserad (Spolverkan)
- Kondensator producerar reaktiv effekt
- Spole förbrukar reaktiv effekt

Driftsegenskaper motor och generatordrift

Den aktiva effekten P är helt bestämd av den mekaniska axeleffekten och oberoende av t.ex.

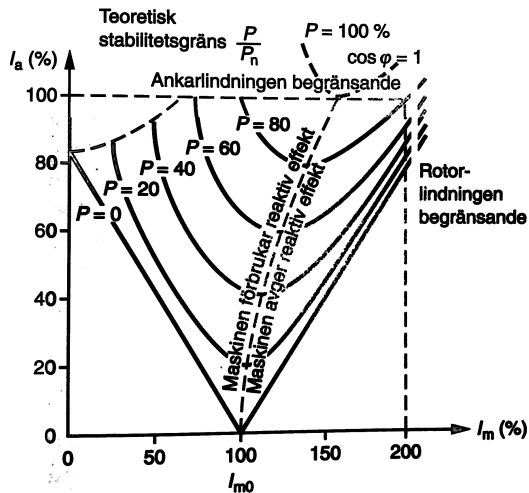
- Nätspänning
- Magnetiseringsspänning
- Reaktiv effekt

På kort sikt balanserar lastvinkeln Θ elektrisk och mekanisk effekt så att jämvikt råder.

Vid generatordrift bestäms alltså P av drivaggregatets förmåga att leverera effekt och vid motordrift av lastens effektbehov.

Den reaktiva effekten bestäms för en given nätspänning av E_F , dvs i förlängningen av magnetiseringsströmmen I_m även om den aktiva effekten också påverkar.

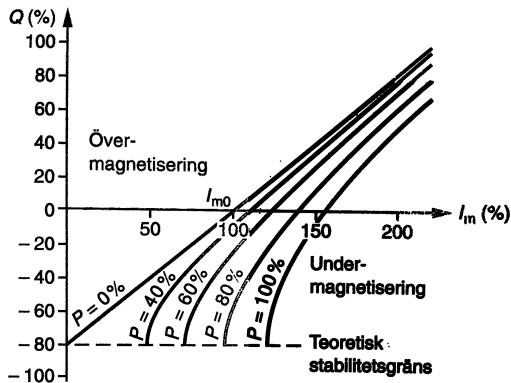
Sammanfattning driftsegenskaper – V-kurva : $I_a = f(I_m)$



Figur 7.62 c. Begränsningarna iritade på V-kurvorna.

Sammanfattning driftsegenskaper – Reaktiv effekt:

$$Q = f(I_m)$$



Figur 7.62 b. Reaktiva effektens beroende av magnetiseringsströmmen.

Beräkningsexempel 7.24

En synkrongenerator är infasad på ett starkt nät. Effektfaktorn är 1.0. Om axeleffekten minskas vid oförändrad magnetisering, hur förändras effektfaktorn: Får den induktiv, kapacitiv, eller fortsatt resistiv karaktär?

Beräkningsexempel 7.24, lösning

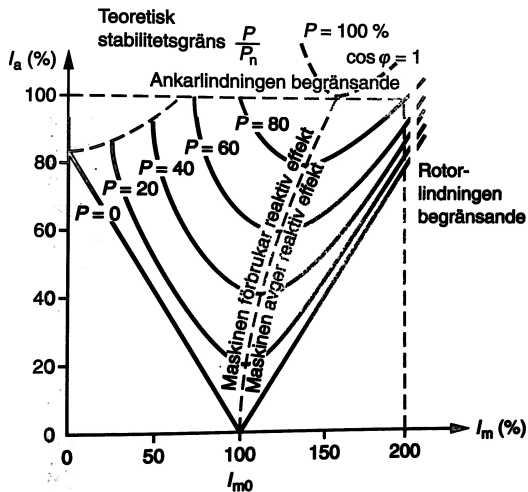
Eftersom nätet är starkt är E_F och U_F konstanta medan lastvinkeln Θ minskar. Vi har att den reaktiva effekten kan skriva enligt

$$Q = \frac{3 \cdot U_F \cdot E_F \cdot \cos \Theta}{X_d} - \frac{3 \cdot U_F^2}{X_d}$$

Eftersom effektfaktorn var 1 för det givna fallet så var den ursprungliga reaktiva effekten $Q = 0$. Minskas Θ ökar $\cos \Theta$ ($-90^\circ < \theta < 0$) och vi får $Q > 0$. Generatorn avger då reaktiv effekt, precis som en kondensator.

(OBS: Fel i facit, jfr. s. 223)

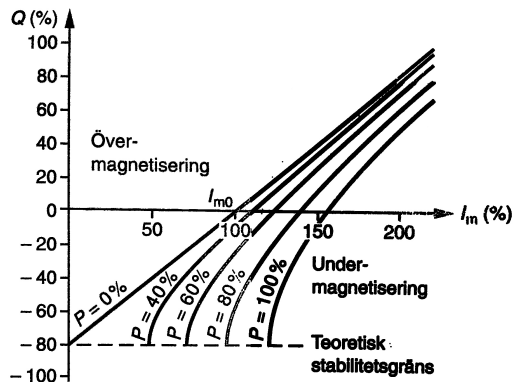
Beräkningsexempel 7.24, alt. lösning



Figur 7.62 c. Begränsningarna inritade på V-kurvorna.

Studera kurvan för en tänkt arbetspunkt. En minskning av P med konstant I_m motsvarar en förflyttning rakt nedåt från den streckade $\cos \varphi = 1$ linjen.

Beräkningsexempel 7.24, alt. lösning 2



Figur 7.62 b. Reaktiva effektens beroende av magnetiseringsströmmen.

Studera kurvan för en tänkt arbetspunkt. En minskning av P med konstant I_m motsvarar en förflyttning rakt uppåt från den streckade $\cos \varphi = 1$ linjen.

Beräkningsexempel

En 400V, 50Hz, 6-polig synkrogenerator med märkeffekt 40kVA har en synkronreaktans på $X_s = 6.4 \Omega$ och en försumbar ankar-resistans ($R_a \approx 0$). Beräkna följande:

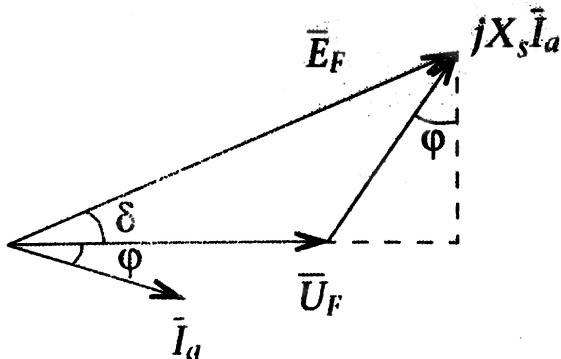
- Märkströmmen
- Den inducerade spänningen E_F vid märkdrift och $\cos \varphi = 0.8$ kap.
- Den inducerade spänningen E_F vid märkdrift och $\cos \varphi = 0.8$ ind.
- Kortslutningsström vid trefasig kortslutning för de två fallen

Vi har enligt definitionen för trefaseffekt att

$$S_M = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_L \implies$$
$$\implies I_{a,M} = \frac{S_M}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 400} \approx 57.7 \text{ A}$$

Beräkningsexempel, Lösning b)

Rita visardiagram för situationen med $\cos \varphi = 0.8$ kap.
(Övermagnetiserad, generator-referens)



Ur figuren framgår att följande måste gälla ($\varphi > 0$)

$$\begin{aligned} E_F &= \sqrt{(U_F + X_s \cdot I_a \cdot \sin \varphi)^2 + (X_s \cdot I_a \cdot \cos \varphi)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{400}{\sqrt{3}} + 6.4 \cdot 57.7 \cdot 0.6\right)^2 + (6.4 \cdot 57.7 \cdot 0.8)^2} \approx 540.5 \text{ V} \end{aligned}$$

Beräkningsexempel, Lösning c)

På samma sätt fås för situationen med $\cos \varphi = 0.8$ ind. ($\varphi < 0$)

$$\begin{aligned} E_F &= \sqrt{(U_F - X_s \cdot I_a \cdot \sin \varphi)^2 + (X_s \cdot I_a \cdot \cos \varphi)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{400}{\sqrt{3}} - 6.4 \cdot 57.7 \cdot 0.6\right)^2 + (6.4 \cdot 57.7 \cdot 0.8)^2} \approx 295.6 \text{ V} \end{aligned}$$

Att notera: Boken gör en poäng av att hålla reda på tecknet på vinklarna och på den reaktiva effekten vid generatordrift och motordrift. Det viktiga är dock att hålla reda på följande

Teckennotation reaktiv effekt

Övermagnetiserad motor och generator **avger** reaktiv effekt precis som en kondensator. **Undermagnetiserad** motor och generator **upptar** reaktiv effekt precis som en induktor/spole.

Kortslutningsströmmen blir

$$I_a = \frac{E_F}{X_s} =$$

$$\text{b)} = \frac{540.5}{6.4} \approx 84.5 \text{ A}$$

$$\text{c)} = \frac{295.6}{6.4} \approx 46.2 \text{ A}$$