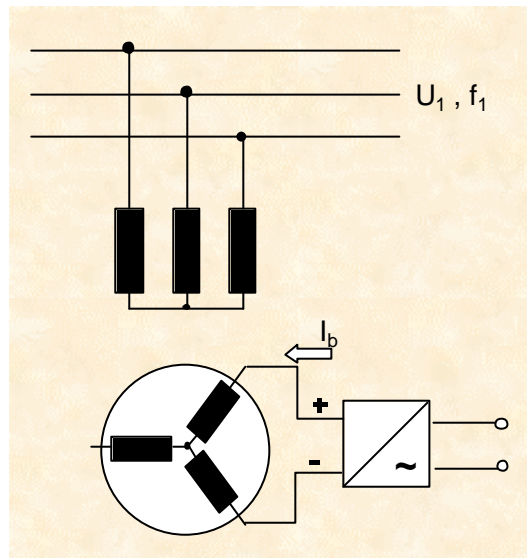


HOOFDSTUK 5

SYNCHRONE MACHINES

5.1 Equivalent schema, fasordiagram

Zoals bij de inductiemachine heeft men ook hier te doen met een draaiveld. De rotor wordt gevoed met gelijkstroom. De spanningsvergelijkingen kunnen uit deze van de inductiemotor afgeleid worden. De stator heeft een driefasige wikkeling die aan een net ligt met constante spanning U_1 en constante frequentie f_1 . Veronderstel een sleepringrotor. Tussen twee sleepringen wordt een gelijkstroombron aangesloten die een stroom I_b levert. De rotorfrequentie f_2 is nul.



figuur 5.1 *Sleepringmotor met gelijkstroomvoeding op de rotor*

De gesynchroniseerde inductiemotor kan slechts een in de tijd constant koppel leveren als

$$f_2 = sf_1$$

m.a.w.

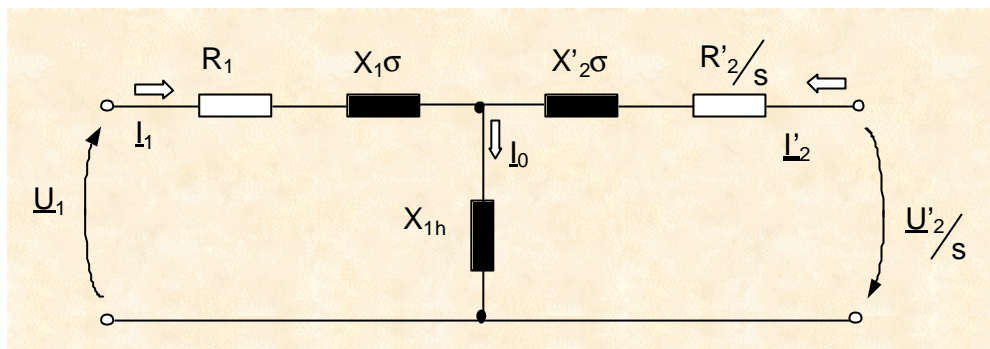
$$s = 0 \quad \text{of} \quad n = n_0 = \frac{f_1}{p} 60 \quad (5.1)$$

De rotor draait synchronon met het draaiveld rond. Bij elk ander toerental $n \neq n_0$ ontstaan trillende koppels met gemiddelde waarde nul. Voor synchrone machines, die meestal als generator gebruikt

worden, wordt het generatorpijlsysteem gebruikt: de spanningsfasor wordt omgedraaid. Men keert terug naar (3.20) en (3.21), waarbij de rotorvergelijking vermenigvuldigd wordt met de slip (figuur 5.2). Met $s = 0$ geldt:

$$\underline{U}_1 + R_1 \underline{I}_1 + j(X_{1\sigma} + X_{1h}) \underline{I}_1 + jX_{1h} \underline{I}'_2 = 0 \quad (5.2)$$

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 \quad (5.3)$$



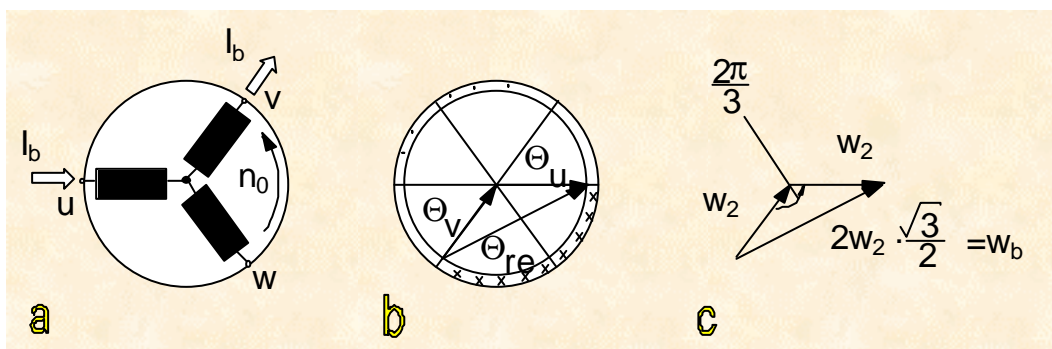
figuur 5.2 *Equivalent schema van de inductiemotor*

\underline{I}'_2 is de op de stator betrokken bekrachtigingsstroom I_b . Een wisselstroom \underline{I}'_2 , die in de stator zou vloeien, zou in de luchtspleet eenzelfde veld genereren als de gelijkstroom in de bekrachtigingswikkeling die synchron ronddraait. Bij voeding van twee rotorfasen met een stroom I_b wordt een doorstroming

$$2 \cdot N_2 \cdot I_b \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

opgewekt (figuur 5.3). Deze kan ook door een gelijkstroomwikkeling met N_b windingen en een stroom I_b opgewekt worden, waarbij

$$N_b = \sqrt{3} N_2 \quad (5.4)$$



figuur 5.3 *Overgang van een driefasige rotorwikkeling naar een wikkeling*

Als bekrachtigingswikkeling kan een verdeelde spoel gebruikt worden (figuur 5.3b), zodat

$$\xi_b = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \quad (5.5)$$

waarbij $\frac{3}{\pi}$ de wikkelfactor is voor $q \rightarrow \infty$. Gelijkheid van de fundamentele golven levert:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_1 \cdot \xi_1}{p} \cdot \sqrt{2} \cdot I_2' = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_b \cdot \xi_b}{p} \cdot I_b \quad (5.6)$$

$$I_2' = \frac{2}{3} \cdot \frac{N_b \cdot \xi_b}{N_1 \cdot \xi_1} \cdot \frac{I_b}{\sqrt{2}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot N_2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{3}{\pi}}{N_1 \cdot \xi_1} \cdot \frac{I_b}{\sqrt{2}} = \frac{2 N_2}{N_1 \cdot \xi_1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_b}{\sqrt{2}} \quad (5.7)$$

De spanning, die door de op de stator betrokken bekrachtigingsstroom I_2' in de statorhoofdreactantie X_{1h} geïnduceerd wordt, wordt de tegen-e.m.k. of inwendige e.m.k. \underline{E} genoemd:

$$\underline{E} = -jX_{1h}I_2' \quad (5.8)$$

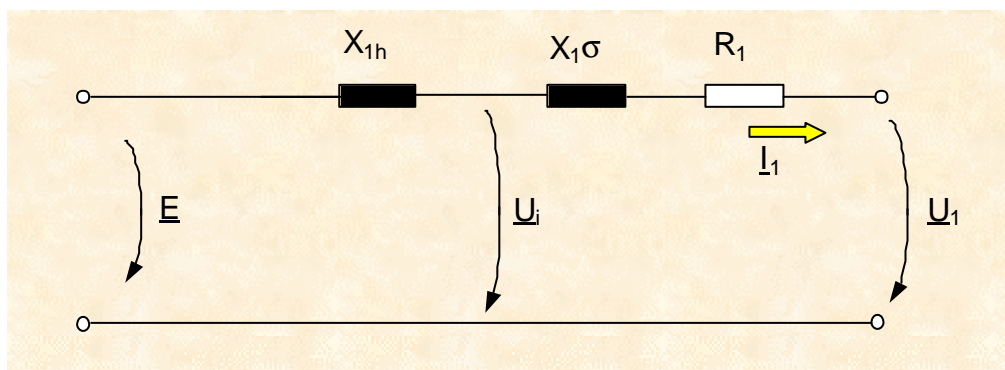
Dit is de spanning die in de statorwikkeling wordt opgewekt tengevolge van het rotorveld. De globale spanningsvergelijking voor de stator van de synchrone machine is:

$$\underline{U}_1 + R_1 I_1 + j(X_{1\sigma} + X_{1h})I_1 = \underline{E} \quad (5.9)$$

en voor de rotor

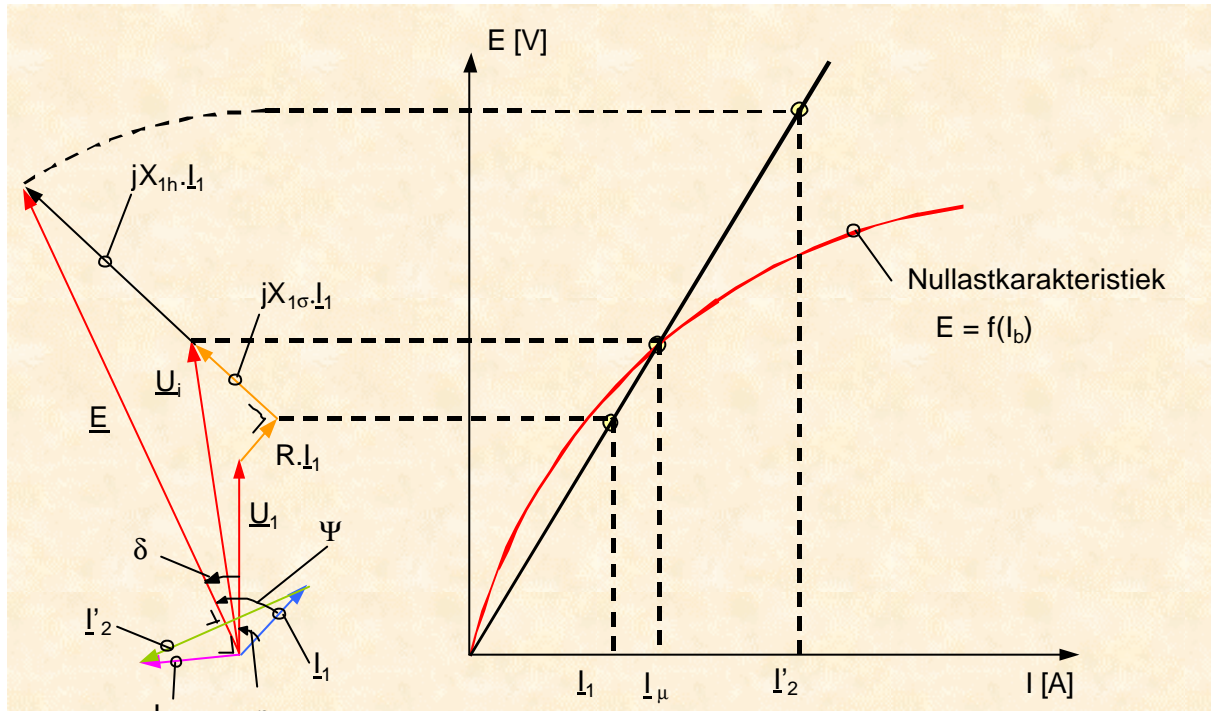
$$U_b = R_b I_b \quad (5.10)$$

Dit komt overeen met het equivalent schema van figuur 5.4. In tegenstelling met de inductiemotor, komt de rotor niet in het equivalent schema voor. De koppeling tussen stator en rotor zit in de e.m.k. \underline{E} , zoals dit ook het geval is bij een gelijkstroommotor.



figuur 5.4 *Equivalent schema van de synchrone machine*

De grootte van de e.m.k. E kan in functie van de bekrachtigingsstroom I_b bepaald worden door de klemspanning bij open stator te meten, terwijl de rotor op synchroon toerental aangedreven wordt. Deze karakteristiek is niet lineair ten gevolge van de verzadiging van het ijzer. Het volledige fasordiagram in generatorbedrijf voor een ohms-inductieve belasting kan als volgt samengesteld worden (figuur 5.5).



figuur 5.5 *Fasordiagram van een inductief-resistief belaste synchrone generator*

Bij belasting is het luchtspleetveld samengesteld uit het veld afkomstig van de rotor (I_b) en het veld van de stator (I_1). Samen zorgen zij voor de resulterende doorstroming I_μ . Deze resulterende doorstroming bepaalt het verzadigingsniveau van de machine. I_μ komt overeen met de geïnduceerde spanning \underline{U}_i :

$$\underline{U}_i = -jX_{1h}I_\mu \quad (5.11)$$

I_μ volgt uit de nullastkarakteristiek. De hoofdreactantie en de verzadigingstoestand zijn dan gekend. De e.m.k. volgt uit de spanning die de op de stator betrokken rotorstroom I_2' zou induceren:

$$\underline{E} = -jX_{1h}I_2' \quad (5.12)$$

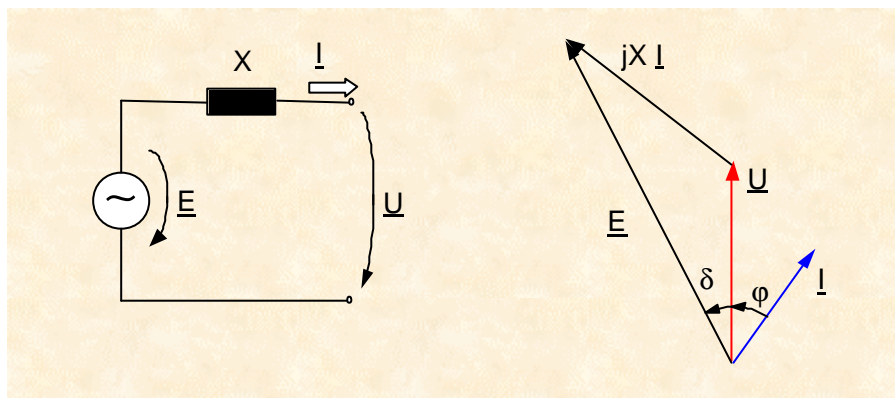
Zoals bij een gelijkstroommachine is er bij de synchrone machine sprake van ankerreactie: het veld van de statorstroom werkt het rotorveld tegen. De ankerreactie volgt uit de ankerstroom:

$$-jX_{lh}I_1 \quad (5.13)$$

Het is belangrijk op te merken dat in een verzadigde machine de doorstromingen mogen opgeteld worden, doch niet de fluxen. De totale flux volgt uit de resulterende doorstroming.

De hoek δ is de lasthoek en geeft de faseverschuiving tussen de e.m.k. \underline{E} en de klemspanning \underline{U}_1 . In generatorbedrijf is dit de hoek waarover de doorstroming van de rotor voorijlt ten opzichte van de resulterende doorstroming. In motorbedrijf ijlt de resulterende doorstroming voor op de doorstroming van de rotor. De hoek $\Psi = \delta + \varphi$ is de fasehoek tussen de e.m.k. \underline{E} en de statorstroom \underline{I} . In generatorwerking ijlt de bekrachtigingsdoorstroming $\frac{\pi}{2} + \Psi$ voor op de ankerdoorstroming, in motorbedrijf ijlt de bekrachtigingsdoorstroming over de hoek $\frac{\pi}{2} - \Psi$ na. In nullast of als de belasting zuiver reactief is, is $\delta = 0$.

Bij grote synchrone machines kan de statorweerstand verwaarloosd worden ($R_1 = 0$). Daar voor de beschrijving van het gedrag van een synchrone machine enkel de statorspanningvergelijking beschouwd wordt, kan de index 1 weggelaten worden (figuur 5.6).



figuur 5.6 Vereenvoudigd equivalent schema ($R_1 = 0$)

5.2 Nullast en kortsluiting

Bij nullast ($\underline{I} = 0$) en bij synchroon toerental wordt de nominale spanning gegenereerd als de bekrachtigingswikkeling de nullastbekrchtigingsstroom I_{b0} voert. Wordt de synchrone machine bij deze bekrchtigingsstroom kortgesloten en het toerental constant gehouden op n_0 , dan vloeit in de stator na het uitsterven van de overgangsverschijnselen, de stationaire kortsluitstroom I_{k0} :

$$I = I_{k0} = \frac{U_{N, fase}}{X} \quad (5.14)$$

Bij kortsluiting is de machine onverzadigd. De stator doorstroming werkt de bekrachtigings doorstroming tegen, zodat de resulterende doorstroming en het overeenkomstige lucht-spleetveld klein is. De kortsluitkarakteristiek $I_k = f(I_b)$ is lineair tot ver boven de nullast-bekrachtigingsstroom.

5.3 Koppeling met een star net

Normalerwijze wordt een synchrone generator gekoppeld met een star net, dit is een net met een vaste frequentie en grootte van de spanning.

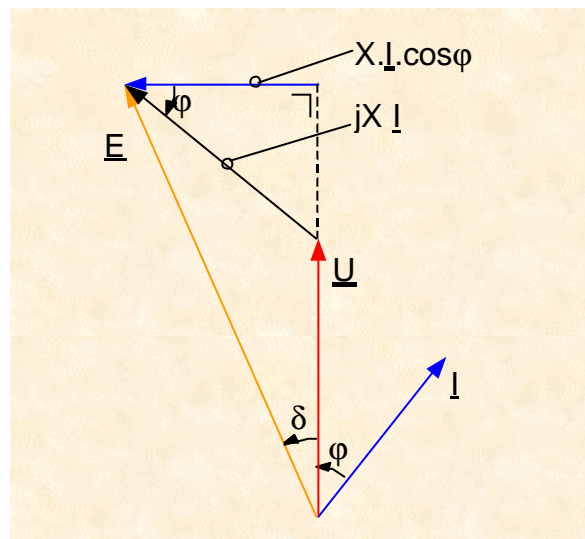
5.3.1 Koppel

Het koppel wordt berekend uit de vermogenbilan. Als alle verliezen verwaarloosd worden, is het mechanisch vermogen gelijk aan het elektrisch:

$$P_{\text{mech}} = \omega_0 \cdot T = P_{\text{elek}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{lijn}} \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (5.15)$$

of

$$T = \frac{3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\frac{\omega_1}{p}} \quad (5.16)$$



figuur 5.7 *Spanningsval bij inductief-resistieve belasting*

Uit het fasordiagram volgt:

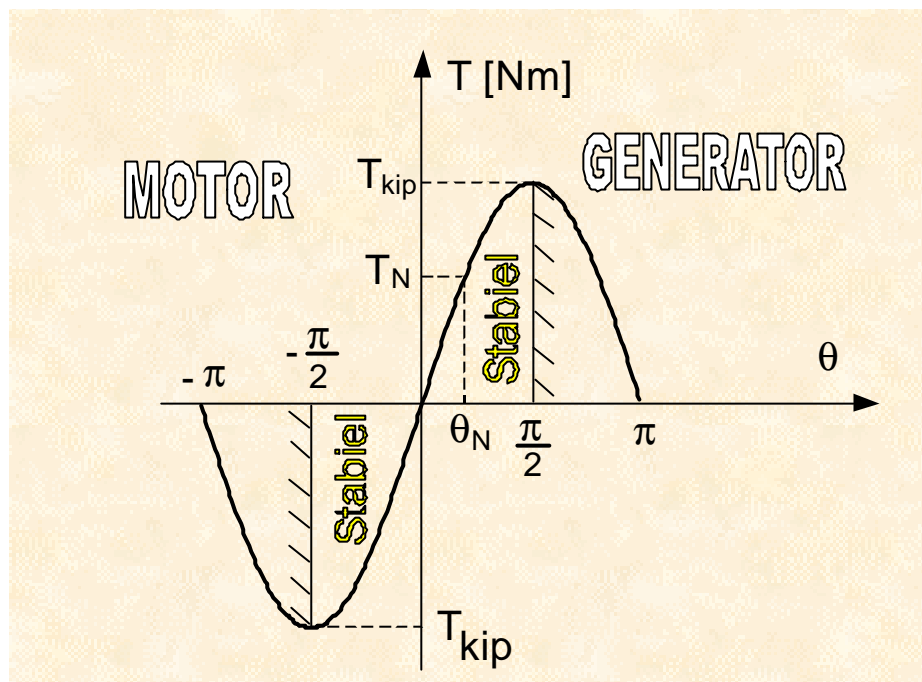
$$X \cdot I \cdot \cos \varphi = E \cdot \sin \delta \quad (5.17)$$

$$I \cdot \cos \varphi = \frac{E}{X} \cdot \sin \delta \quad (5.18)$$

Het koppel is:

$$T = \frac{3 \cdot p \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X} \cdot \sin \delta = T_{\text{kip}} \cdot \sin \delta \quad (5.19)$$

Deze koppelvergelijking geldt voor stationaire werking, bij constant toerental $n = n_0$ en constante bekrachtiging I_f . Als de belasting langzaam toeneemt, nemen koppel T en lasthoek δ toe, tot de machine bij $\delta_{\text{kip}} = \frac{\pi}{2}$ het kippkoppel bereikt en uit de pas valt. Als motor valt zij stil, als generator draait zij door, tot de mechanische aandrijving het toerental beperkt.



figuur 5.8 *Koppel-lasthoekkarakteristiek*

Tot slot weze opgemerkt dat de koppel-toerental karakteristiek van een synchrone machine uiterst eenvoudig is: een verticale bij het synchrone toerental.

5.3.2 Werkingsgebied

Met een machine die aan een star net ligt, is het mogelijk in vier zones te werken. De bedrijfstoestand wordt gekenmerkt door de fasehoek van de statorstroom. Er geldt:

$$\underline{E} = E e^{j\delta} = E(\cos \delta + j \sin \delta) \quad (5.20)$$

$$\underline{I} = I e^{-j\varphi} = I(\cos \varphi - j \sin \varphi) \quad (5.21)$$

waardoor

$$\underline{E} = \underline{U} + jX\underline{I} \quad (5.22)$$

kan geschreven worden als

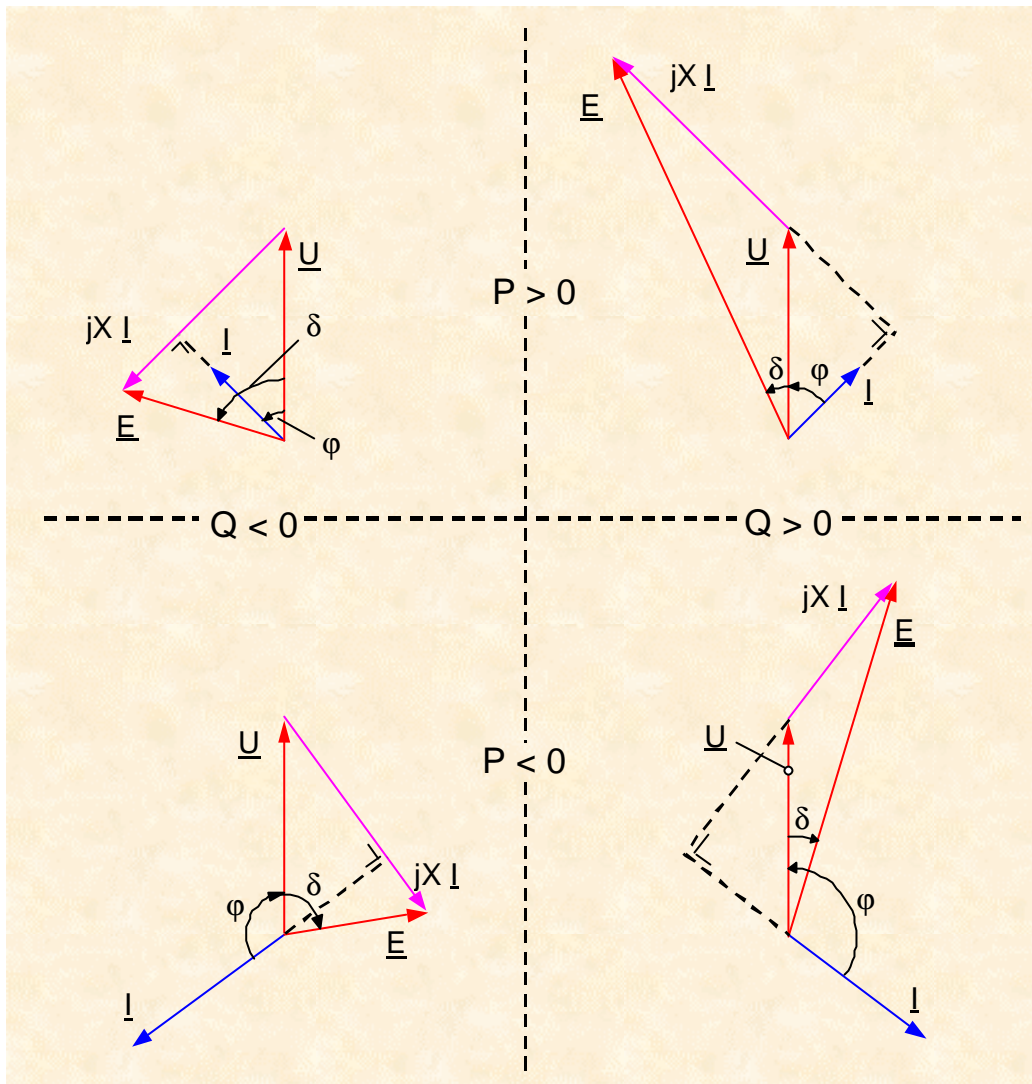
$$E(\cos \delta + j \sin \delta) = U + jXI(\cos \varphi - j \sin \varphi) \quad (5.23)$$

Splitsing in reëel en imaginair deel geeft:

$$I \cos \varphi = \frac{E}{X} \sin \delta \quad (\text{actieve stroom}) \quad (5.24)$$

$$I \sin \varphi = \frac{E \cos \delta - U}{X} \quad (\text{reactieve stroom}) \quad (5.25)$$

In het generatorpijlsysteem vindt men vier zones (figuur 5.9).



figuur 5.9 Vier zones in het werkingsgebied van een synchrone machine aan een star net

$P > 0$: actief vermogen afgegeven P generator

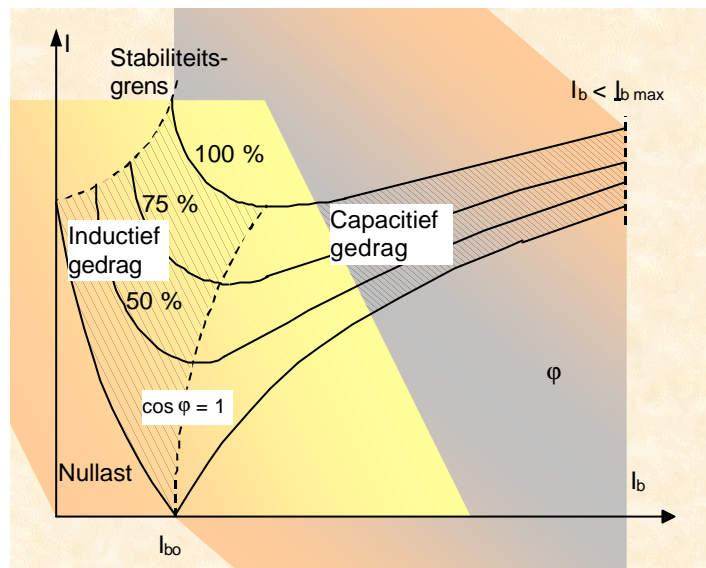
$P < 0$: actief vermogen opgenomen P motor

$Q > 0$: reactief vermogen afgegeven, overbekerktigd en de machine gedraagt zich als een condensator

$Q < 0$: reactief vermogen opgenomen, onderbekerktigd, de machine gedraagt zich als een spoel

Het actief vermogen wordt alleen bepaald door de mechanische aandrijving of de mechanische last. Het reactief vermogen is enkel afhankelijk van de bekrachtiging. Als de machine zonder actieve last een grotere bekrachtigingsstroom heeft dan de nullastbekrchtiging ($I_b > I_{b0}$), werkt zij als leverancier van reactieve energie en gedraagt zich als een condensator. Als de bekrchtigingsstroom kleiner is dan de nullastbekrchtiging ($I_b < I_{b0}$), dan neemt zij reactieve energie op en gedraagt zich als een spoel. Het opnemen of afgeven van blindvermogen is onafhankelijk van het mechanisch

vermogen in te stellen. Dit verband wordt duidelijk weergegeven door de V-curven van een synchrone machine (figuur 5.10).



figuur 5.10 V-curven van een synchrone machine

Voor een gegeven actief vermogen kan men de bekrachtigingsstroom zo instellen dat de statorstroom minimaal is ($\cos \varphi = 1$). Door op de bekrachtiging in te spelen, regelt men het reactief vermogen. De minimale bekrachtigingsstroom wordt bepaald door de stabiliteitsgrens. De bekrachtigingsstroom heeft via de e.m.k. E invloed op het kippkoppel. Wanneer het kippkoppel kleiner wordt dan het belastingskoppel, haakt de synchrone machine af. Uit thermische redenen wordt de bekrachtigingsstroom begrensd op een bepaalde waarde $I_{b \max}$. In het grensgeval dat de synchrone machine geen actief vermogen levert of opneemt en enkel en alleen gebruikt wordt om het reactief vermogen te leveren voor inductieve lasten, spreekt men van een synchrone compensator. Soms doet het net zich voor als een condensator en dient de machine het overschot aan reactief vermogen op te nemen.

5.3.3 Grenzen van het werkingsgebied

Uitgaande van de spanningsvergelijking van de synchrone machine:

$$\underline{E} = \underline{U} + jX\underline{I} \quad (5.26)$$

bekomt men met $\underline{E} = Ee^{j\delta}$ en $\underline{U} = U_{Nfase}$ voor de stroom:

$$\underline{I} = \frac{Ee^{j\delta} - U_{N,fase}}{jX} = \frac{jU_{N,fase}}{X} - j \frac{Ee^{j\delta}}{X} \quad (5.27)$$

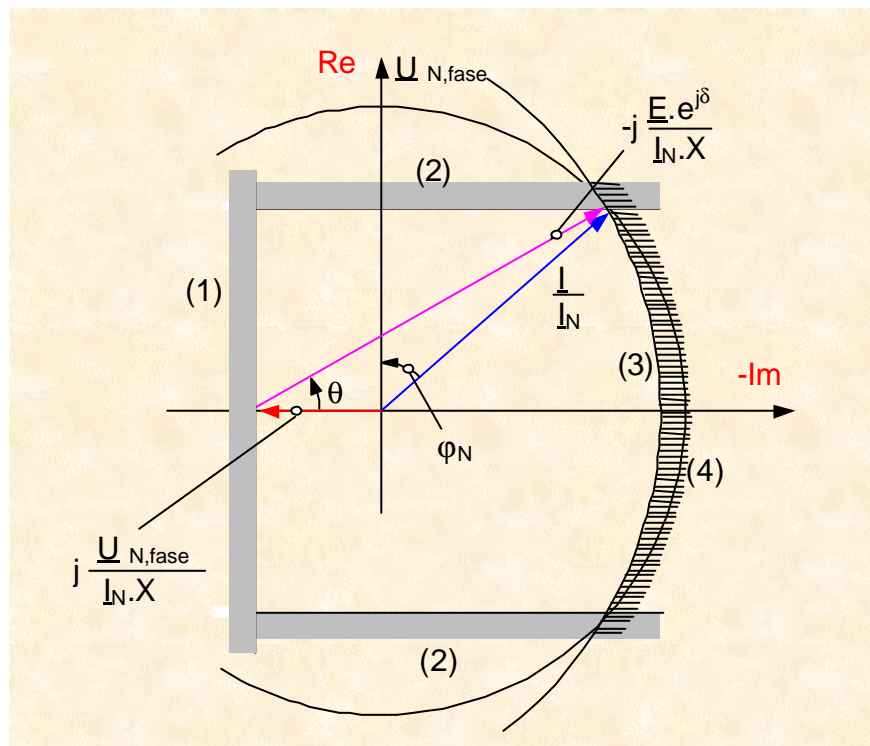
$$\frac{I}{I_N} = j \frac{U_{N,fase}}{I_N \cdot X} - j \frac{E \cdot e^{j\delta}}{U_{N,fase}} \cdot \frac{U_{N,fase}}{I_N \cdot X} \quad (5.28)$$

Het werkingsgebied wordt begrensd door volgende overwegingen (figuur 5.11):

- de lasthoek moet kleiner zijn dan 90° : $|\delta| \leq \frac{\pi}{2}$ (1)
- het mechanisch vermogen van de aandrijving of de last is beperkt: (2)

$$I \cos \varphi \leq \frac{T_N}{\frac{3p}{\omega_N} \cdot U_{N,fase}}$$

- de bekrachtigingsstroom is begrensd om de verwarming van de rotor te beperken: $I_b < I_{b \max}$ (3)
- de statorstroom moet kleiner blijven dan de nominale stroom: $I < I_N$ (eveneens verwarming) (4).



figuur 5.11 Grenzen voor het werkingsgebied van een synchrone generator

5.4 Machine met uitspringende polen

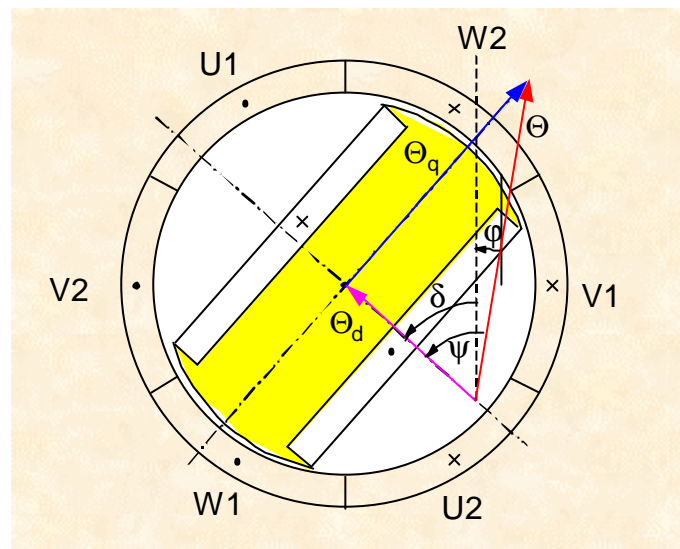
Tot nu toe werd verondersteld dat de rotor van de synchrone machine cilindervormig is. In een machine met uitspringende polen is de luchtspleet niet constant (figuur 5.12). De magnetische geleidbaarheid verandert over een poolsteek. De machine heeft twee verschillende magnetische assen. Een eenvoudige optelling van de doorstromingen van de stator en de rotor om het resulterende luchtspleetveld te bepalen, is niet meer toegelaten. Men moet de stator doorstroming in twee componenten verdelen:

- evenwijdig met de as van de rotorwikkeling:

$$\Theta_d = \Theta \sin \psi : \text{langsas, directe as of d-as}$$

- loodrecht op de as van de rotorwikkeling:

$$\Theta_q = \Theta \cos \psi : \text{dwarsas, kwadratuur-as of q-as}$$

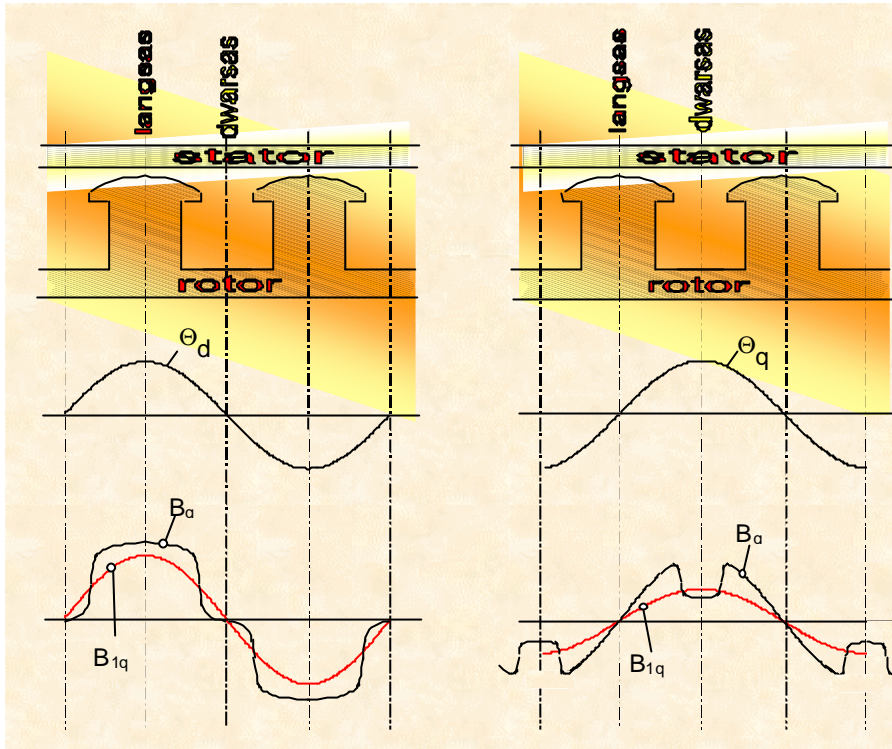


figuur 5.12 *Machine met niet cilindrische rotor*

De langscomponent van de stator doorstroming θ_d zorgt voor een groot veld B_d , ten gevolge van de kleine luchtspleet. De dwarscomponent θ_q genereert een klein veld B_q , ten gevolge van de grote luchtspleet. Vooral de fundamentele componenten B_{1d} en B_{1q} verschillen sterk. Men beperkt zich hier tot deze fundamentele componenten. Men berekent eerst een machine met gladde rotor en voert dan correctiefactoren in voor een rotor met uitspringende polen.

$$B_{1d} = C_d B_1 \text{ met } C_d = 0,8 \dots 0,9$$

$$B_{1q} = C_q B_1 \text{ met } C_q = 0,4 \dots 0,5$$



figuur 5.13 Direct en kwadratuurveld

De correctiefactoren C_d en C_q zijn functie van de poolvorm. Door de splitsing van de stator-doorstroming in d- en q-componenten, krijgt de ankerreactie een verschillend gewicht voor beide assen. In overeenstemming met de verschillende magnetische geleidbaarheden voor d- en q-as, worden ook verschillende reactanties gebruikt:

$$X_d = X_\sigma + C_d X_h \quad \text{langsreactantie}$$

$$X_q = X_\sigma + C_q X_h \quad \text{dwarsreactantie}$$

X_h is de hoofdreactantie bij constante luchtspleet.

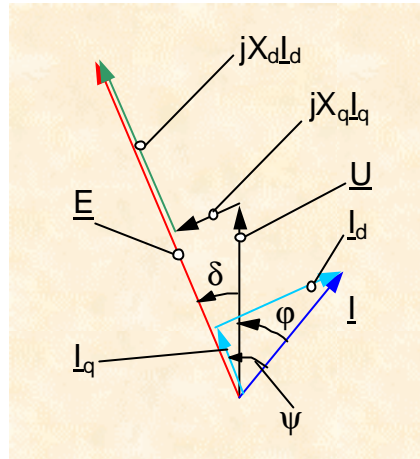
Zonder afleiding, worden hier de belangrijkste resultaten van de twee-assentheorie gegeven. De spanningsvergelijking is (figuur 5.14):

$$\underline{E} = \underline{U} + jX_q I_q + jX_d I_d \quad (5.29)$$

en

$$I_d = I \sin \Psi \quad (5.30)$$

$$I_q = I \cos \Psi \quad (5.31)$$



figuur 5.14 Fasordiagram voor een machine met uitspringende polen

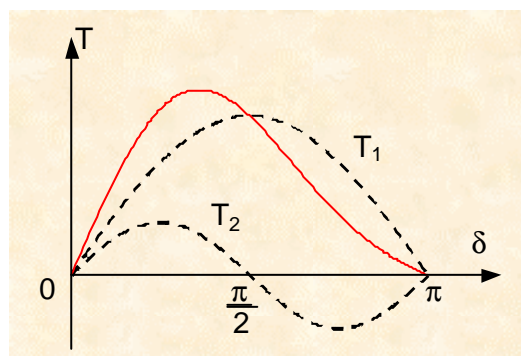
Het koppel van een machine met uitspringende polen is:

$$T = \frac{3 \cdot p}{\omega_1} \cdot \left[\frac{U \cdot E}{X_d} \cdot \sin \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta \right] \quad (5.32)$$

Het koppel van een machine met uitspringende polen bestaat uit twee delen (figuur 5.15). Het eerste deel komt overeen met het koppel van een machine met cilindrische rotor. Het is afhankelijk van de bekrachtiging en wordt nul als de bekrachtiging afgeschakeld wordt. Het tweede deel is onafhankelijk van de bekrachtiging. Het is functie van het verschil van de magnetische geleidbaarheid in de d- en de q-as. Het maximum koppel treedt op bij een lagere lasthoek

$$\delta_{\text{kip}} < \frac{\pi}{2}$$

Voor kleinere vermogens worden synchrone machines gemaakt zonder bekrachtiging. Enkel de tweede koppelterm is werkzaam. Dit zijn reluctantiemotoren.



figuur 5.15 Koppel-lasthoekkarakteristiek voor een machine met uitspringende polen