

Capitolul 4

MASINA SINCRONA

Masina sincrona este tipul de masina electrica rotativa de curent alternativ care, pentru o tensiune la borne de frecventa data, functioneaza cu o turatie riguros constanta.

Regimul de baza în functionarea masinii sincrone este regimul de *generator* electric, la fel cum regimul de motor este cel de baza pentru masina asincrona. Masina sincrona în regim de generator reprezinta baza economica a producerii energiei electrice în toate centralele electrice actuale. În acest regim de functionare masinile sincrone ating cele mai mari puteri nominale fiind cele mai mari masini electrice construite de om.

Consideratii economice pledeaza pentru cresterea neîncetata a puterii nominale a generatoarelor sincrone (scad investitiile specifice în lei/kW, creste randamentul). Cele mai mari masini sincrone actuale au atins puteri de 1200MW ca turbogeneratoare si 700MW ca hidrogeneratoare.

Regimul de *motor* sincron se foloseste mai cu seama datorita avantajelor fata de motoarele asincrone (randament mai ridicat, factor de putere mergând pâna la unitate, cuplu invariabil cu turatia, întrefier mai mare). Lucrul acesta a fost cu putinta numai dupa ce tehnica a putut rezolva cu succes doua deficiente grave ale motorului sincron: absentia cuplului de pornire si posibilitatea de pendulare cu pericolul desprinderii din sincronism (pierderea stabilitatii). În acest regim de functionare masina sincrona se foloseste în toate actionarile ce necesita o turatie constanta (compresoare, mori cu bile, pompe de irigatii, etc.) înlocuind din ce în ce mai mult motoarele asincrone (în special la puteri mari unde primeaza considerentele economice: randament, factor de putere).

Un alt regim de functionare particular masinii sincrone este *compensatorul sincron*, regim în care axul masinii se învârte în gol masina servind la îmbunatatirea factorului de putere al retelei, compensând energia reactiva consumata în special de motoarele asincrone alimentate din retea.

Regimul de frâna este mai rar întâlnit la masina sincrona.

4.1 Elemente constructive ale masinii sincrone

În constructia uzuala, masina sincrona se compune din doua parti principale:

- *statorul*, reprezentat de partea fixa, exterioara;
- *rotorul*, asezat concentric în interiorul statorului si care constituie partea mobila.

Statorul la masina sincrona de constructie obisnuita reprezinta *indusul masinii* si este format dintr-un miez feromagnetic care poarta în crestaturi o înfasurare de curent alternativ trifazat fiind foarte asemanator din punct de vedere constructiv cu statorul masinii asincrone trifazate.

Miezul feromagnetic se realizeaza din tole sau segmente de tole stantate din otel electrotehnic de 0,5 mm grosime izolate între ele cu lac izolant sau oxizi ceramici împachetate în pachete de cca. 5 cm grosime, între pachete prevazându-se canale radiale de racire (figura 4.1). Miezul se consolideaza cu tole marginale de (1 ÷ 3)mm grosime si se preseaza cu ajutorul unor placi frontale pentru a evita aparitia vibratiilor în timpul functionarii.

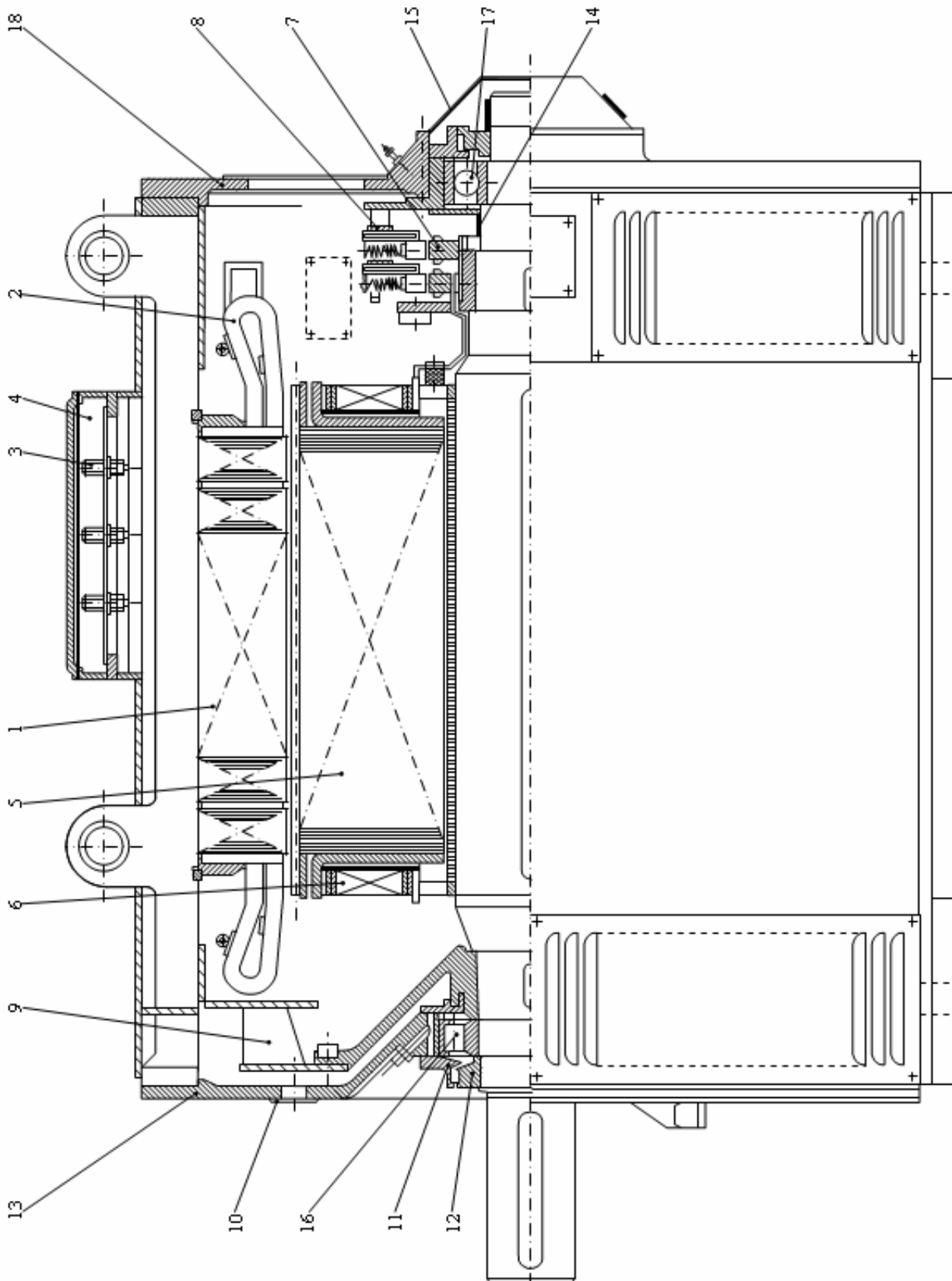
Înfasurarea statorica este repartizata ($q > 1$) si se conecteaza la reseaua trifazata de c.a. Înfasurarea se realizeaza din conductor (bare) de cupru izolat cu fibre de sticla, micanita sau rasini sintetice în functie de clasa de izolatie si de tensiunea nominala. La masina sincrona trifazata, înfasurarea statorului se conecteaza în *stea* pentru a se evita închiderea armonicilor curentului de ordinul 3 si multipli de 3, precum si aparitia unor armonici de acelasi ordin în curba tensiunii de faza.

Carcasa masinii se realizeaza din otel turnat (la masinile mici) sau din tabla sudata de otel (la masinile de puteri mari si foarte mari) si poarta dispozitivele de fixare pe fundatie (talpi), inelele de ridicare, cutia de borne a indusului si a inductorului, placuta indicatoare si scuturile frontale (figura 4.1).

La masinile mijlocii scuturile pe lângă rolul de protectie sunt prevazute si cu lagare, iar unul dintre scuturi sustine port-periile cu periile de contact (figura 4.1).

Placuta indicatoare contine de obicei principalele date nominale ale masinii: puterea nominala aparenta (kVA sau MVA) si activa (kW sau MW), factorul de putere nominal ($\cos \varphi_n$), tensiunea si curentul nominal de linie (V; kV; A; kA), tensiunea si curentul nominal de excitatie (V; A), randamentul nominal η_n , turatia nominala (rot/min), frecventa nominala (Hz), numarul de faze si conexiunea lor.

Rotorul masinii sincrone cuprinde miezul feromagnetic rotoric, înfasurarea rotorica, inelele colectoare, ventilatorul (figura 4.1).



- | | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Ansamblu rotor; | 7. Inele colectoare; | 13. Scut parte tractiune; |
| 2. Ansamblu înfasurare stator; | 8. Port perii; | 14. Capacel interior parte inele; |
| 3. Borne stator; | 9. Ventilator; | 15. Capac; |
| 4. Cutia de borne stat or; | 10. Capatul interior parte tractiune; | 16. Rulment parte tractiune; |
| 5. Ansamblu miez magnetic rotor; | 11. Capatul exterior parte tractiune; | 17. Rulment parte opusa tractiune; |
| 6. Înfasurarea rotorului; | 12. Inel regulator vaselina; | 18. Scut parte opusa tractiune. |

Sectiune longitudinala printr-o masina asincrona cu poli aparenti
 Figura 4.1

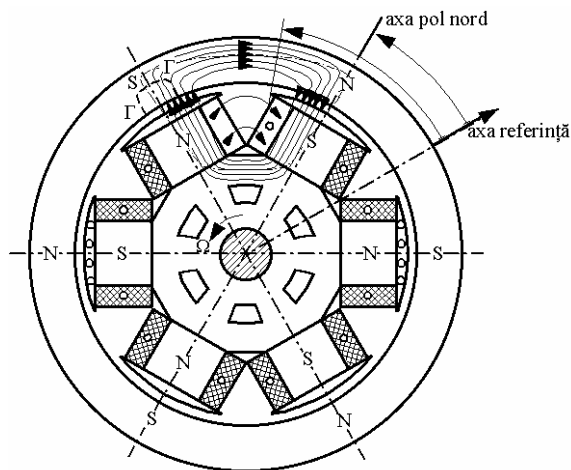


Figura 4.2

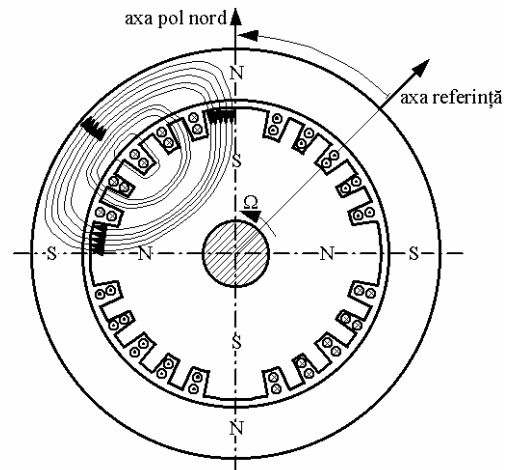


Figura 4.3

Miezul rotoric are doua variante constructive:

- *cu poli aparenti* (figura 4.2);
- *cu poli înecati* (figura 4.3).

Miezul cu poli aparenti este format dintr-o serie de poli (piese polare) fixati la periferia unei roti polare solidare cu arborele masinii. Polii poseda înfășurari de excitație în curent continuu. Bobinele de excitație ale polilor se leaga în serie sau paralel, în asa fel încât polaritatea polilor sa alterneze la periferia rotorului. Alimentarea bobinelor se face prin intermediul inelelor de contact solidare cu arborele (inele izolate între ele și fata de masa și la care se leaga capetele înfășurării de excitație) și a doua perii fixe care freaca pe inelele de contact.

La periferia interioara a statorului, în aceasta varianta, întrefierul este neuniform, de grosime relativ mica sub piesele polare și foarte mare în zonele dintre poli.

Miezul cu poli înecati (figura 4.3) este o construcție cilindrică masivă din otel de mare rezistenta. La periferia rotorului se taie o serie de creștături în care se plaseaza spirele bobinelor de excitație în c.c. a polilor. Înfasurarea unui pol acopera, de obicei, doua treimi din deschiderea unui pol, în mijlocul polului ramânând o zona de aproximativ o treime din deschiderea polului în care nu sunt practicate creștături. Aceasta zona se mai numeste *dinte mare*, spre deosebire de ceilalti dinti cu deschidere mult mai mica care separa creștaturile. Capetele frontale ale bobinelor sunt puternic strânse prin bandaje masive pentru a face fata solicitarilor centrifuge. Aceasta varianta constructiva conduce la un întrefier constant, la periferia interioara a statorului.

Generatoarele electrice de turatii mari (1000 ÷ 3000 rot/min) actionate de turbine cu aburi numite *turbogeneratoare* se construiesc cu poli înecati datorita rezistentei mai mari la solicitarile mecanice centrifuge.

Generatoarele electrice de turatii mici (sute de rot/min) antrenate de turbine hidraulice se mai numesc și *hidrogeneratoare* și se construiesc cu poli aparenti deoarece prezinta o mai mare

simplitate tehnologica. Hidrogeneratoarele se construiesc, de obicei, cu axa de rotatie verticala.

Generatoarele sincrone de puteri sub 100kW se mai construiesc si în constructie inversa, cu poli aparenti de excitatie pe stator si înfasurarea trifazata cu inele de contact pe rotor.

Tipuri de sisteme de excitatie:

- *cu masina excitatoare*, de fapt un generator de curent continuu cu excitatie separata sau derivatie (autoexcitatie) cuplat pe acelasi ax cu generatorul sincron (figura 4.4). Avantajul metodei consta în faptul ca tensiunea de excitatie rezulta constanta nedepinzând de tensiunea retelei. Probleme deosebite apar la turatii mici (hidrogeneratoare) care au gabarit mai mare a excitatiilor si la turatii mari (turbogeneratoare) unde apar limitari datorita comutatiei (apar scânteieri la perii). Aceste considerente limiteaza puterea excitatoarelor de curent continuu la cca. 500 kW;

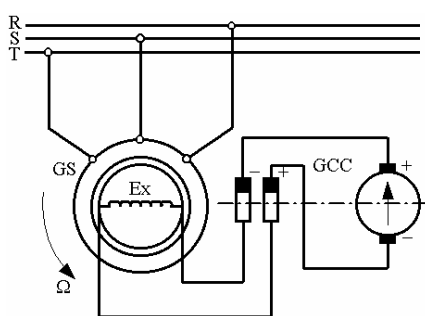


Figura 4.4

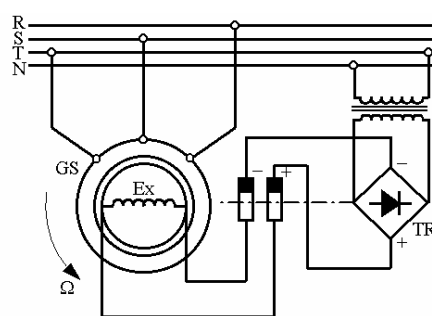


Figura 4.5

- *cu excitatie statica* (figura 4.5), de fapt o punte redresoare monofazata care redreseaza o faza statorica de c.a., rotorul fiind alimentat de la acest redresor prin intermediul periiilor. Se elimina astfel dezavantajul folosirii masinilor electrice, cu inertiele maselor în miscare si uzura în timp. Sistemele de excitatie statice sunt simple, performante, cu întreținere minima si cu siguranta în exploatare.

- *cu masini excitatoare fara perii* (figura 4.6). Generatorul sincron de excitatie este de constructie inversata. Rotorul generatorului principal GS si rotorul generatorului sincron de excitatie GS_e sunt realizate “în continuare”, iar pe rotorul comun se dispun montate pe doua discuri diodele ce alcatuiesc *redresorul rotitor*. Legaturile redresorului cu înfasurarea de excitatie devin fixe disparând astfel sistemul de perii.

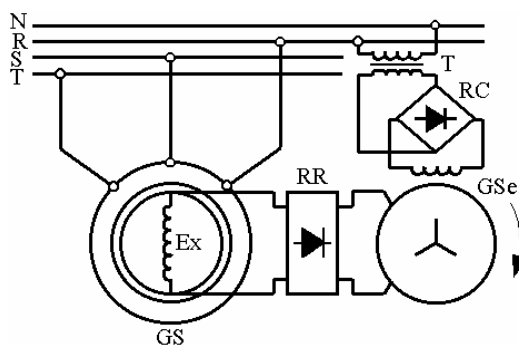


Figura 4.6

4.2 Generatorul sincron

Generatorul sincron trifazat prezinta caracteristici extrem de convenabile pentru producerea energiei electrice de curent alternativ si reprezinta unica solutie general acceptata de constructorii de centrale electrice si de sisteme electro-energetice.

Ansamblul format din motorul primar si generatorul sincron poarta denumirea de grup electrogen. Dupa natura masinii primare care furnizeaza energie mecanica întâlnim: diesel-generatore, turbogeneratoare, hidrogeneratoare.

4.2.1 Principiul de functionare al generatorului sincron cu poli înecati

În regim de generator masina sincrona transforma energia mecanica primita pe la ax de la un motor primar în energie electrica debitata prin stator într-o retea de curent alternativ.

Sa presupunem o masina sincrona cu poli înecati (figura 4.3) al carei rotor este excitat cu un curent continuu I_1 , si este rotit din exterior cu viteza unghiulara Ω_1 . Se obtine astfel un câmp magnetic învârtitor inductor (vezi subcap. 2.1.2) pe cale mecanica, al carei armonica fundamentala are expresia:

$$B_1 = B_{1m} \cdot \cos(p \cdot \alpha - \omega_1 \cdot t); \quad B_m = \frac{\mu_0 \cdot N_1 \cdot k_f \cdot I_1}{\delta} \quad (4.1)$$

unde pulsatia câmpului învârtitor $\omega_1 = p \cdot \Omega_1$, indicele „1” referindu-se la faptul ca desi este produs în rotor acest câmp învârtitor are functie de „câmp inductor”.

Fata de înfasurarea statorica acest câmp învârtitor va produce sistemul trifazat simetric de fluxuri:

$$\begin{aligned} \varphi_{0U} &= \Phi_{0m} \cdot \cos \omega_1 \cdot t \\ \varphi_{0V} &= \Phi_{0m} \cdot \cos \left(\omega_1 \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \\ \varphi_{0W} &= \Phi_{0m} \cdot \cos \left(\omega_1 \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Sistemul trifazat simetric de fluxuri (4.2) va induce în înfasurarea statorica un sistem trifazat simetric de t.e.m.:

$$\begin{aligned} e_{0U} &= E_{0m} \cdot \sin \omega_1 \cdot t \\ e_{0V} &= E_{0m} \cdot \sin \left(\omega_1 \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \\ e_{0W} &= E_{0m} \cdot \sin \left(\omega_1 \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Daca înfasurarea statorica este conectata pe o retea trifazata echilibrata sau pe un consumator trifazat echilibrat, atunci sistemul de t.e.m. (4.3) va produce un sistem simetric de curenti:

$$\begin{aligned} i_{2U} &= I_{2m} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t - \varphi) \\ i_{2V} &= I_{2m} \cdot \sin\left(\omega_1 \cdot t - \varphi - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ i_{2W} &= I_{2m} \cdot \sin\left(\omega_1 \cdot t - \varphi - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Sistemul de curenti trifazati simetrici (4.4) va produce la rândul sau un câmp magnetic învârtitor de reactie al carei fundamentala (armonica de ordinul 1) va avea expresia:

$$B_r = B_{rm} \cdot \cos\left(p \cdot \alpha - \omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right). \quad (4.5)$$

Comparând relatia (4.1) cu (4.5) se constata ca *cele doua câmpuri învârtitoare (inductor si de reactie)* au aceeasi pulsatie si viteza unghiulara $\Omega_1 = \frac{\omega}{p}$, deci *se rotesc sincron*, de unde si denumirea de *masina sincrona*.

Cele doua câmpuri, de excitatie si de reactie se compun pentru a produce câmpul magnetic învârtitor rezultat al masinii, care este câmpul util, prin intermediul lui având loc cuplajul magnetic al celor doua armaturi.

Câmpul învârtitor de reactie B_r exprimat prin relatia (4.5) va produce la rândul sau fata de înfasurarea statorica un sistem trifazat simetric de fluxuri:

$$\begin{aligned} \varphi_{rU} &= \Phi_{rm} \cdot \cos\left(\omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right) \\ \varphi_{rV} &= \Phi_{rm} \cdot \cos\left(\omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{2} - \varphi - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \varphi_{rW} &= \Phi_{rm} \cdot \cos\left(\omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{2} - \varphi - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (4.6)$$

care va induce în stator sistemul trifazat de t.e.m.:

$$\begin{aligned} e_{rU} &= E_{rm} \cdot \sin\left(\omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right) \\ e_{rV} &= E_{rm} \cdot \sin\left(\omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{2} - \varphi - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ e_{rW} &= E_{rm} \cdot \sin\left(\omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{2} - \varphi - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (4.7)$$

În realitate, în masina sincrona nu exista doua câmpuri învârtitoare (B_1, B_r), doua fluxuri (φ_0, φ_r) sau doua t.e.m. (e_0, e_r) ci aceste marimi se compun într-o singura marime.

Astfel, în figura 4.7 se reprezinta compunerea fazoriala a acestor marimi considerând rețeaua pe care debiteaza generatorul inductiva: $\varphi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$.

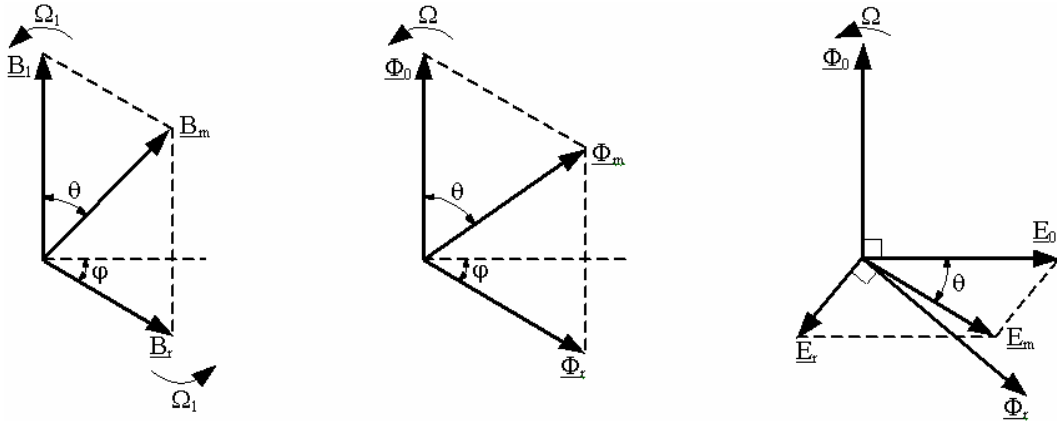


Figura 4.7

Dupa cum se vede din figura 4.7, a câmpul rezultat \underline{B}_m pe care îl găsim în întrefierul masinii face unghiul θ fata de axa câmpului inductor \underline{B}_1 ; același unghi îl face și fluxul rezultat $\underline{\Phi}_m$ fata de fluxul inductor $\underline{\Phi}_0$ ca și t.e.m. rezultanta \underline{E}_m fata de \underline{E}_0 . Unghiul electric θ este numit și unghi intern al masinii.

4.2.2 Ecuatiile de functionare ale generatorului sincron cu poli înecați

Vom considera o masina sincrona trifazata în urmatoarele ipoteze simplificatoare: circuitul magnetic al masinii este liniar (nu se satureaza și nu prezinta fenomenul de histerezis); pierderile în fier sunt neglijate (ulterior vom face corectia necesara); masina are o simetrie perfecta constructiva, magnetica și electrica, ceea ce include ipoteza unui întrefier constant la periferia rotorului, adica se considera o masina cu poli înecați; nu vom lua în considerare decât armonicile fundamentale ale câmpurilor de excitatie și de reactie; înfasurarea statorica este conectata la o rețea trifazata echilibrata cu caracter inductiv; rotorul masinii este rotit din exterior cu turatia constanta $n_1 = \frac{60 \cdot \Omega_1}{2 \cdot \pi}$ [rot/min]; înfasurarea de excitatie este alimentata la tensiunea constanta nominala U_{en} .

De asemenea, în cele ce urmeaza, vom considera doar regimul stationar de functionare, regim în care viteza unghiulara a rotorului Ω_1 și tensiunea de excitatie ramân constante.

Procedând în mod analog ca la masina asincrona (sau ca la transformator), vom introduce așa-numitul curent de magnetizare, care are toate atributele câmpului rezultat \underline{B}_m .

În ceea ce privește câmpul de excitație, vom înlocui rotorul real cu un rotor fictiv imobil, posedând o înfasurare trifazată simetrică, cu același număr de spire pe fază și același coeficient de înfasurare ca și statorul mașinii.

Valoarea efectivă I_1' a curentului ce va străbate această înfasurare rotorică trifazată fictivă rezulta din egalitatea amplitudinii câmpului magnetic de excitație real, produs pe cale mecanică de înfasurarea monofazată, și a amplitudinii câmpului magnetic învârtitor obținut pe cale electrică de înfasurarea fictivă: (conform subcap. 2.1.2 relațiile 2.25 și 2.32')

$$\frac{3 \cdot \mu_0 \cdot N_2 \cdot k_{N_2} \cdot I_1'}{\pi \cdot p \cdot \delta} = \frac{k_f \cdot \mu_0 \cdot N_1 \cdot I_1}{\delta}$$

de unde rezulta:

$$I_1' = I_1 \cdot \frac{p \cdot N_1 \cdot k_f \cdot \pi}{3 \cdot N_2 \cdot k_{N_2}}$$

Curentul I_1' se numește *curent de excitație raportat la stator*.

Prin acest artificiu de calcul compunerea fazorială a celor două câmpuri învârtitoare (de excitație și de reacție) din figura 4.7, a se poate înlocui prin compunerea curentilor din figura 4.9, curenti având aceeași pulsație și defazație reciproce cu câmpurile.

Se obține astfel prima ecuație funcțională în regim staționar a generatorului sincron:

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_1' = \underline{I}_m \quad (4.10)$$

ecuație pusă în evidență în diagrama de fazori din figura 4.10.

Dacă se iau în considerare și pierderile în fierul statoric, atunci ecuația 4.10 suferă o corecție uzuală folosită și la transformator și la motorul asincron:

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 + \underline{I}_1' &= \underline{I}_0 \\ \underline{I}_0 &= \underline{I}_m + \underline{I}_a \end{aligned} \quad (4.11)$$

\underline{I}_m fiind componenta de magnetizare, iar \underline{I}_a componenta corespunzătoare pierderilor în fier ale curentului rezultat \underline{I}_0 numit și curent de mers în gol.

Pentru găsirea celei de-a doua ecuații (de tensiuni) a generatorului sincron vom aplica cea de-a doua teoremă a lui Kirchhoff pe un ochi de circuit ce cuprinde o fază statorică ce se închide prin nul (figura 4.8):

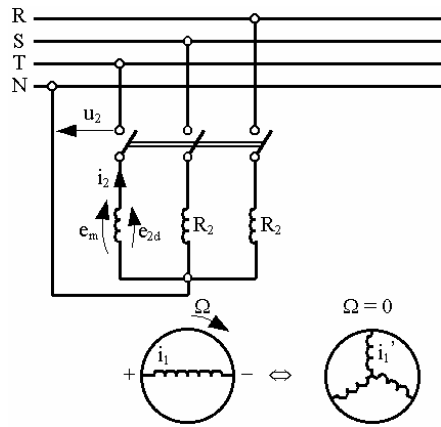


Figura 4.8

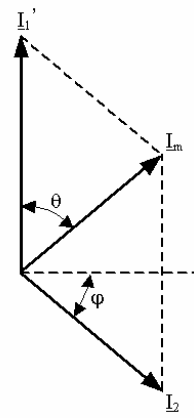


Figura 4.9

$$e_m + e_{2d} = R_2 \cdot i_2 + u_2 \tag{4.12}$$

în care:

- e_m - t.e.m. rezultanta indusa în stator;
- $e_{2d} = -L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt}$ - t.e.m. indusa de fluxul statoric de dispersie, L_{2d} fiind inductivitatea statorica de dispersie;
- R_2 - este rezistenta de faza a înfasurarii statorice;
- i_2 - este curentul de faza statoric;
- u_2 - este tensiunea de faza la bornele înfasurarii statorice.

Ecuatia (4.12) scrisa în complex devine:

$$\underline{E}_m = \underline{U}_2 + R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot X_{2d} \cdot \underline{I}_2 \tag{4.13}$$

unde $X_{2d} = \omega_1 \cdot L_{2d}$ este reactanta de dispersie statorica.

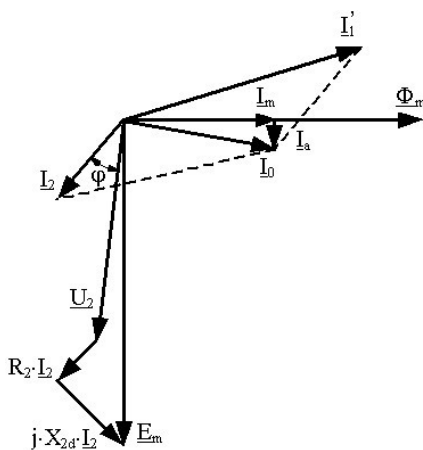


Figura 4.10

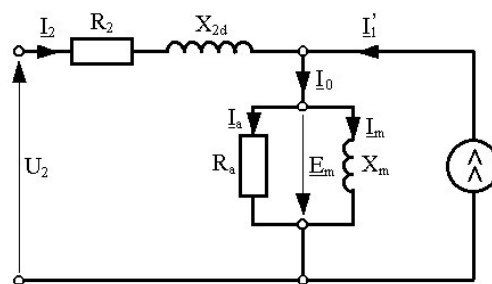


Figura 4.11

În figurile 4.10, 4.11 s-au reprezentat diagrama de fazori, respectiv, schema echivalenta a generatorului sincron în regim permanent.

T.e.m. rezultanta \underline{E}_m indusa în stator de câmpul util rezultat \underline{B}_m va avea expresia:

$$\underline{E}_m = -jX_m \underline{I}_m$$

Introducând expresia curentului \underline{I}_m din relația (4.10) în relația (4.14) obținem:

$$\underline{E}_m = -j \cdot X_m \cdot \left(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 \right) = -j \cdot X_m \cdot \underline{I}_2 + \underline{E}_0$$

în care mărimea $\underline{E}_0 = -j \cdot X_m \cdot \underline{I}_1$ reprezintă chiar t.e.m. indusă în stator de câmpul învârtitor de excitație, iar mărimea $\underline{E}_r = -j \cdot X_m \cdot \underline{I}_2$ este t.e.m. indusă în stator de câmpul învârtitor de reacție.

Înlocuind pe \underline{E}_m în relația (4.13) obținem o nouă formă a ecuației de tensiuni a generatorului sincron:

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_2 + R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot (X_{2d} + X_m) \cdot \underline{I}_2 \tag{4.16}$$

sau dacă se notează $X_s = X_{2d} + X_m$ numită *reactanța sincronă*:

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_2 + R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot X_s \cdot \underline{I}_2 \tag{4.17}$$

ecuație pusă în evidență de diagrama de fazori din figura 4.12, a unde se poate observa că unghiul dintre t.e.m. \underline{E}_m și \underline{E}_0 este chiar unghiul intern θ al mașinii.

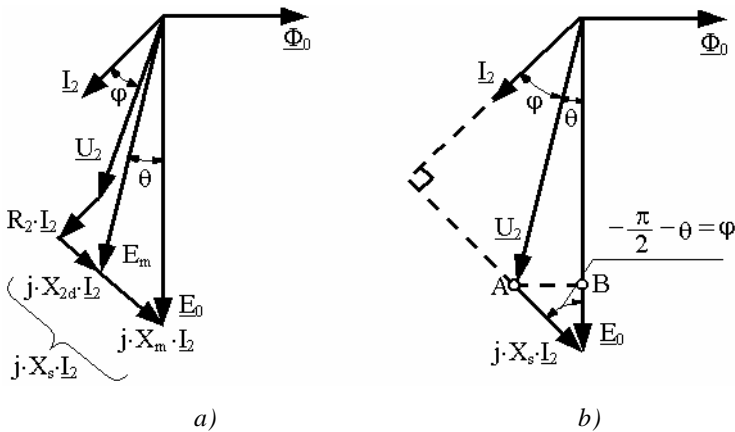


Figura 4.12

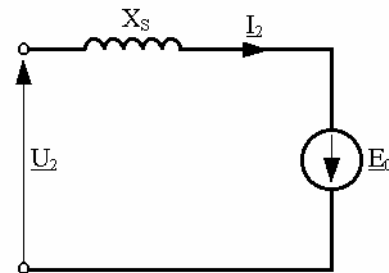


Figura 4.13

De multe ori datorită valorii foarte mici a rezistenței R_2 se poate neglija termenul $R_2 \cdot \underline{I}_2$ în raport cu \underline{U}_2 diagrama de fazori capătănd forma simplificată din figura 4.12, b cu schema echivalentă 4.13.

Ecuația curentilor (4.11) împreună cu ecuația tensiunilor (4.17) și cu ecuația (4.14) formează sistemul ecuațiilor de funcționare a generatorului sincron trifazat cu poli înecați în regim staționar.

4.2.3 Expresia cuplului electromagnetic la masina sincrona

Pentru a deduce expresia cuplului electromagnetic la o masina sincrona vom porni de la relatia generala a cuplului electromagnetic la masinile de curent alternativ (vezi subcap. 2.4 rel. 2.6, a):

$$M = \frac{3 \cdot I_2 \cdot E_0 \cdot \cos(\underline{E}_0, \underline{I}_2)}{\Omega_1 - \Omega_2}. \quad (4.18)$$

Dar, cum viteza unghiulara a indusului (statorului) este $\Omega_2 = 0$ si cum unghiul $(\underline{E}_0, \underline{I}_2) = \theta + \varphi$ (conform diagramei din figura 4.12) relatia (4.18) se poate scrie:

$$M = \frac{3 \cdot I_2 \cdot E_0 \cdot \cos(\theta + \varphi)}{\Omega_1}. \quad (4.19)$$

Tot din figura 4.12 se poate scrie urmatoarea identitate trigonometrica:

$$AB = U_2 \cdot \sin \theta = X_2 \cdot I_2 \cdot \sin \left(\pi - \theta - \varphi - \frac{\pi}{2} \right) = X_s \cdot I_2 \cdot \cos(\theta + \varphi).$$

Înlocuind termenul $I_2 \cdot \cos(\theta + \varphi)$ în relatia (4.19) obtinem:

$$M = \frac{3 \cdot E_0 \cdot U_2 \cdot \sin \theta}{X_s \cdot \Omega_1} \quad (4.20)$$

relatie ce reprezinta expresia cuplului electromagnetic dezvoltat de o masina sincrona cu poli înecati în regim stationar de functionare.

În ceea ce priveste semnul cuplului electromagnetic, trebuie remarcat faptul ca în relatia (4.18) este explicitat cuplul exercitat de armatura inductoare asupra armaturii induse. În cazul masinii sincrone cuplul exercitat asupra rotorului care este armatura inductoare va avea semnul schimbat. Dar cum $\sin \theta > 0$ pentru orice unghi intern $\theta \in (0, \pi)$ rezulta cuplul electromagnetic din relatia (4.20), care se exercita asupra rotorului antrenat din exterior (cazul generatorului), are sens opus sensului de miscare si reprezinta un cuplu rezistent. În acelasi timp asupra rotorului se mai exercita si cuplul rezistent de frecari mecanice M_m .

4.2.4 Caracteristicile generatorului sincron

În scopul aprecierii performantelor generatoarelor electrice se traseaza grafic pe baza încercarilor experimentale la bancul de proba curbe numite caracteristicile generatorului. Ele reprezinta dependenta a doua marimi considerându-le pe celelalte constante.

De obicei la generatoarele sincrone se traseaza caracteristicile urmatoare:

- caracteristica de mers în gol: $U_{20} = f(I_1)_{I_2=0}$;
- caracteristica externa: $U_2 = f(I_2)_{I_1=ct.}$;
- caracteristica de reglaj: $I_1 = f(I_2)_{U_2=ct.}$.

Caracteristica de mers în gol, reprezintă dependența dintre tensiunea la bornele statorului și curentul de excitație, când curentul debitat de stator este nul (mers în gol), viteza rotorului menținându-se, de asemenea, constantă.

Această caracteristică are forma unei curbe de saturație care nu porneste din origine (figura 4.14). Valoarea U_{2r} este tensiunea la bornele statorului atunci când curentul de excitație este nul și se datorează câmpului inductor remanent din rotor (care rămâne de la o funcționare anterioară). Se observă că pe porțiunea AB (mașina nesaturată magnetic) practic există o relație liniară între tensiunea U_{20} și curentul continuu de excitație I_1 . Pe această porțiune este posibil să se regleze tensiunea acționând asupra curentului rotoric. Evident, la creșterea curentului de excitație I_1 , curba nu va coincide cu cea de la micșorarea acestuia datorită fenomenului de histererezis magnetic.

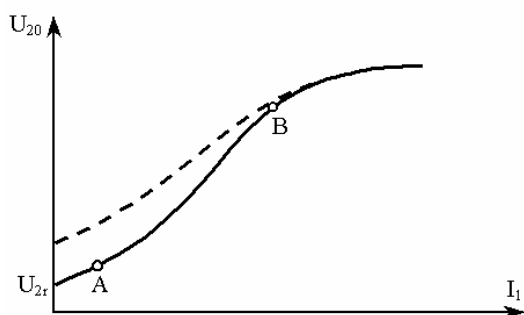


Figura 4.14

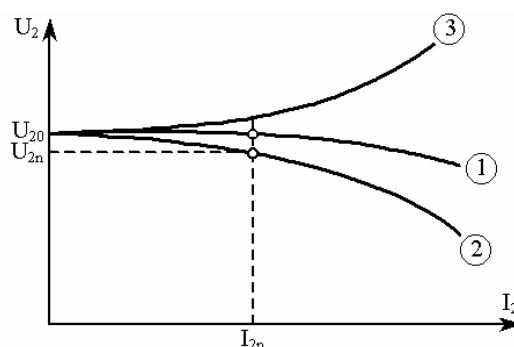


Figura 4.15

Caracteristica externă, reprezintă dependența dintre tensiunea de la bornele statorului U_2 și curentul debitat pe rețea (consumatori) I_2 de către mașină când curentul de excitație I_1 se menține constant ca și turatia rotorului. În figura 4.15 s-au trasat trei caracteristici externe pentru sarcină rezistivă (1), sarcină inductivă (2), și sarcină capacitivă (3).

După cum rezulta din figura 4.15 în cazul sarcinii rezistive și inductive caracteristicile sunt ușor cazatoare, iar în cazul sarcinii capacitivă caracteristica este crescătoare.

Explicatia formelor (2) și (3) din figura 4.15 se poate da cu ajutorul diagramei de fazori.

Astfel, în figura 4.16, a este trasată caracteristica externă pentru sarcină inductivă $\varphi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, iar în

figura 4.16, b la sarcină capacitivă $\varphi \in \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right)$.

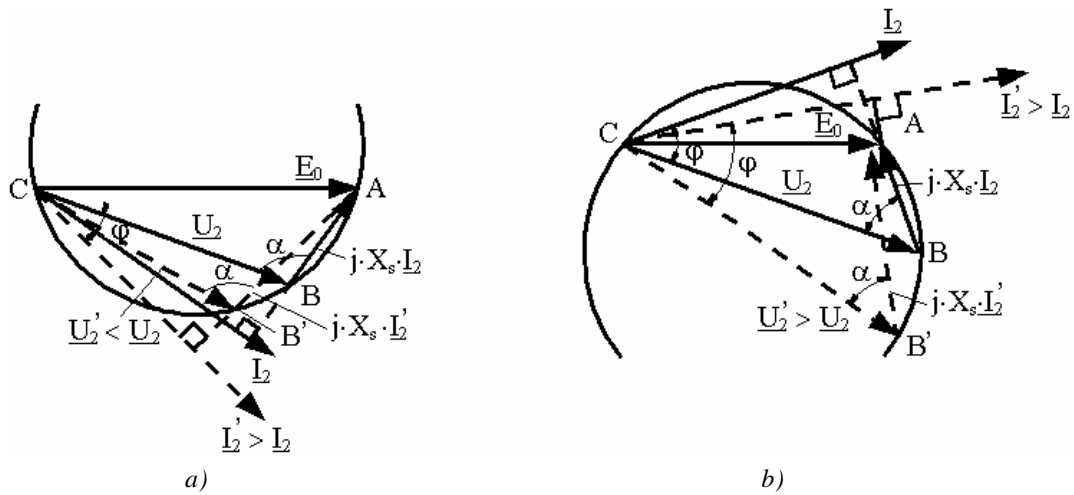


Figura 4.16

În aceste diagrame fazorul t.e.m. induse de fluxul de excitație \underline{E}_0 depinzând de curentul de excitație I_1 , rămâne constant. Odata cu variația curentului de sarcină I_2 variaza fazorul $j \cdot X_s \cdot I_2$.

Mentinându-se $\varphi = \text{ct.}$ (nu se modifica caracterul sarcinii), atunci și $\alpha = \varphi + \frac{\pi}{2} = \text{ct.}$. Ca urmare, locul geometric al punctului de funcționare B va fi un arc de cerc capabil de unghiul α . Punctul A va corespunde mersului în gol ($I_2 = 0$), iar punctul C va corespunde funcționării în scurtcircuit ($U_2 = 0$).

La sarcina inductiva se observa ca la cresterea curentului I_2 tensiunea la borne U_2 scade (curba(2) din figura 4.15), iar la sarcina capacitiva odata cu cresterea curentului I_2 creste și U_2 (curba (3) din figura 4.15).

Variația tensiunii la borne de la mersul în gol (U_2) la mersul în sarcina nominala se definește ca:

$$\Delta u[\%] = \frac{U_{20} - U_{2n}}{U_{2n}} \cdot 100 \quad (4.21)$$

și pentru a considera tensiunea de la bornele generatorului constanta aceasta variație de tensiune nu trebuie să depășească 10% ($\Delta u < 10\%$).

Caracteristica de reglaj, reprezintă dependența dintre curentul de excitație I_1 și curentul debitat în rețea de către stator I_2 , atunci când tensiunea la borne și turatia rotorului se mențin constante $U_2 = \text{ct.}$, $\Omega_1 = \text{ct.}$, caracterul sarcinii menținându-se de asemenea constant $\cos \varphi = \text{ct.}$.

Caracteristica ne arată cum să reglam curentul de excitație I_1 în așa fel încât la orice curent debitat I_2 tensiunea la bornele generatorului să nu se modifice.

Alura acestor caracteristici pentru trei tipuri de sarcina: (1)- rezistiva; (2)- inductiva; (3)- capacitive s-a reprezentat în figura 4.17.

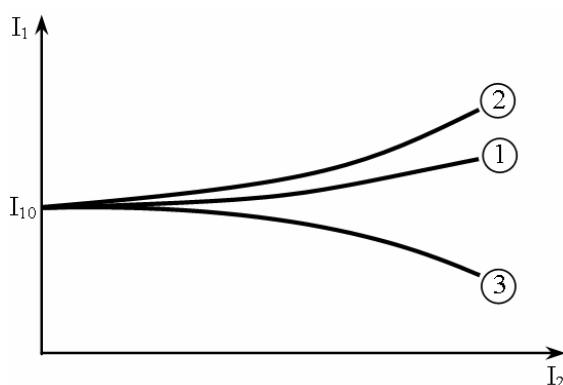


Figura 4.17

4.2.5 Teoria generatorului sincron cu poli aparenti

La aceasta masina întrefierul variaza de-a lungul periferiei rotorului si statorului. Astfel, sub piesa polara δ este mult mai mic fata de restul polului (figura 4.2). Putem afirma ca de-a lungul axei longitudinale a polului avem o reluctanta mica, iar de-a lungul axei transversale aceasta este foarte mare. Altfel spus reactanta fluxului de reactie dupa axa longitudinala este mult mai mare decât dupa axa transversala ($X_{rl} > X_{rt}$).

Fluxul inducției magnetice de reactie poate fi descompus dupa cele doua axe:

$$\underline{\Phi}_r = \underline{\Phi}_{r_l} + \underline{\Phi}_{r_t} \text{ (vezi diagrama din figura 4.18).}$$

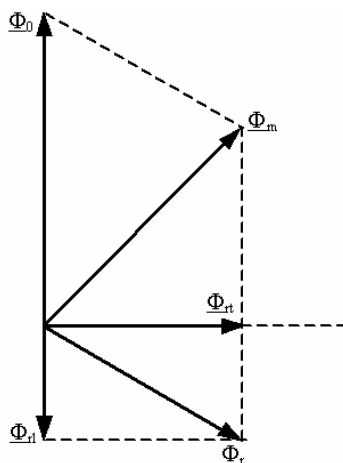


Figura 4.18

Cele doua componente ale fluxului de reactie induc tensiunile electromotoare:

$$\underline{E}_{r_l} = -j \cdot X_{r_l} \cdot \underline{I}_l; \quad \underline{E}_{r_t} = -j \cdot X_{r_t} \cdot \underline{I}_t$$

\underline{I}_l si \underline{I}_t sunt componentele curentului din indus;

Cu aceste precizari putem scrie:

$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_r = \underline{E}_0 + \underline{E}_{r_1} + \underline{E}_{r_t}$$

Iar ecuatia de tensiuni devine:

$$\underline{U} = \underline{E} - R \cdot \underline{I} - j \cdot X_d \cdot \underline{I} = \underline{E} - R \cdot \underline{I} - j \cdot X_d \cdot (\underline{I}_l + \underline{I}_t) = \underline{E}_0 - R \cdot \underline{I} - j \cdot X_l \cdot \underline{I}_l - j \cdot X_t \cdot \underline{I}_t$$

unde s-a notat:

$$X_l = X_{r_1} + X_d; \quad X_t = X_{r_t} + X_d$$

care se pot numi respectiv *reactanta longitudinala* si *reactanta transversala*.

Diagrama de fazori a ecuatiei de tensiuni este reprezentata în figura 4.19:

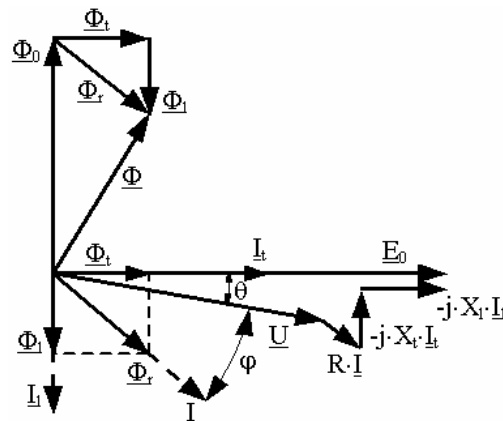


Figura 4.19

4.2.6 Functionarea în paralel a generatoarelor sincrone

Pe o retea de transport si distributie a energiei electrice functioneaza la un moment dat mai multe generatoare sincrone conectate la aceeasi tensiune, deci, *în paralel*.

Functionarea a doua sau mai multe generatoare sincrone în paralel pe aceleasi bare de distribuire a energiei electrice impune o circulatie a curentilor de la generatoare spre retea sau invers dar niciodata între generatoare (curent de circulatie). Existenta unui curent de circulatie de la un generator la altul conduce la o încărcare suplimentara a înfasurarilor uneia dintre ele cu efecte termice neplacute ducând la perturbarea functionarii acestuia.

Pentru a nu exista acest curent de circulatie se impune îndeplinirea unor conditii numite „*conditii de functionare în paralel*” si care sunt:

- egalitatea tensiunilor la borne ca marime si ca faza;
- egalitatea frecventelor tensiunilor de la borne;
- aceeasi succesiune a fazelor.

Pentru a arata aparitia curentilor de circulatie în cazul neîndeplinirii uneia dintre aceste conditii sa consideram circuitul din figura 4.20 si scriem ecuatia tensiunilor pe conturul Γ ce include doua faze omoloage statorice si se închide prin nul. Aceasta ecuatie pentru faza R va avea forma:

$$\underline{U}_{f_{R_1}} - \underline{U}_{f_{R_2}} = \Delta \underline{U}_{f_R}. \quad (4.22)$$

Presupunând ca cele doua tensiuni nu sunt egale ca modul sau ca faza (figura 4.21, a, b) din diferenta lor va rezulta o tensiune $\Delta \underline{U}_{f_R}$ care va genera un curent de circulatie prin acest circuit. Tensiunea $\Delta \underline{U}_{f_R}$ va fi nula numai atunci când toate cele trei conditii de functionare în paralel vor fi îndeplinite.

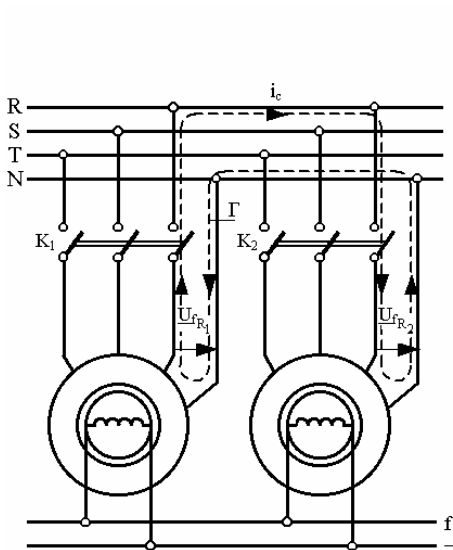


Figura 4.20

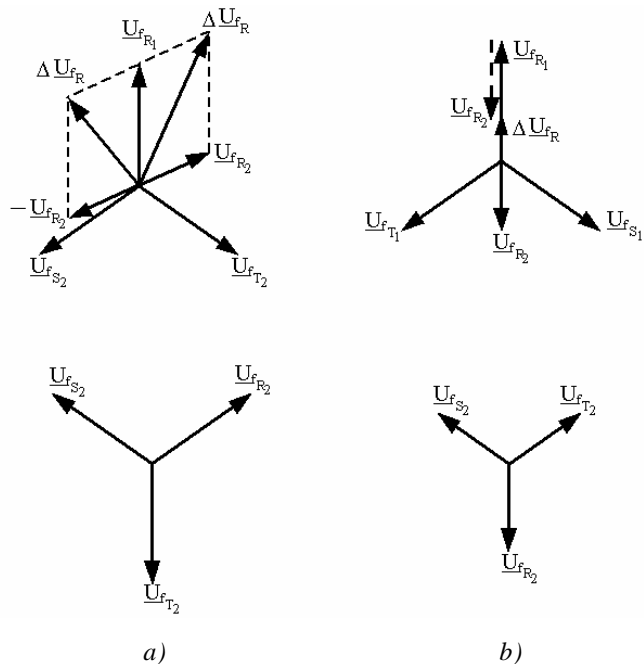


Figura 4.21

Înainte de a închide întrerupatorul K_2 trebuie sa ne asiguram ca sunt îndeplinite toate conditiile de functionare în paralel.

Acest lucru se poate realiza cu ajutorul aparatelor de masura corespunzatoare care, de regula, se integreaza într-un singur aparat numit *sincronoscop*.

Sincronoscoapele moderne pot realiza o conectare automata în paralel, în sensul ca pot lua decizii în functie de îndeplinirea conditiilor de functionare în paralel, decizii cum ar fi cuplarea si reglarea curentului de excitatie, cuplarea întrerupatorului de punere în paralel, reglarea turatiei motorului primar de antrenare, etc.

4.3 Motorul sincron

În regim de motor masina sincrona primeste energie electrica de la rețeaua de c.a. trifazata prin stator pe care o transforma în energie mecanica furnizata axului motorului.

4.3.1 Ecuatiile de functionare ale motorului sincron

Procedând în mod analog ca în cazul regimului de generator (vezi subcap. 4.2.2) ecuatia tensiunilor pe o faza statorica corespunzator circuitului din figura 4.22 va avea forma:

$$e_m + e_{2d} = R_2 \cdot i_2 - u_2. \quad (4.23)$$

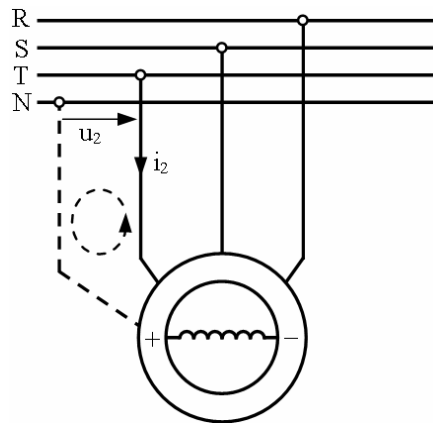


Figura 4.22

Ecuatia tensiunilor (4.23) scrisa în complex și ținând cont de expresia reactantei de dispersie statorice va deveni:

$$\underline{U}_2 = -\underline{E}_m + R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot X_{2d} \cdot \underline{I}_2 \quad (4.24)$$

sau în funcție de t.e.m. indusa de fluxul de excitație ecuatia (4.24) devine:

$$\underline{U}_2 = -\underline{E}_0 + R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot X_s \cdot \underline{I}_2 \quad (4.25)$$

în care: $X_s = X_{2d} + X_m$ - reactanta sincrona.

Ecuatia curenților va avea aceeași formă ca la generator:

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_1 = \underline{I}_m$$

în care s-au neglijat pierderile în fier ($I_a = 0$), iar \underline{I}_1 este curentul de excitație raportat la stator (vezi rel. 4.9).

Diagrama de fazori a motorului sincron în regim staționar s-a reprezentat în figura 4.23, a și forma simplificată ($R_2 \cdot I_2 \approx 0$) în figura 4.23, b.

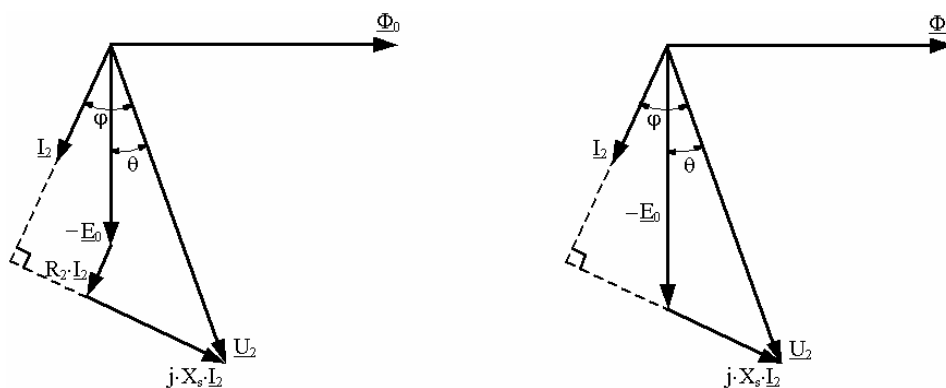


Figura 4.23

4.3.2 Pornirea motorului sincron

Deoarece masina sincrona nu poate functiona decât la sincronism, evident la pornire când $\Omega_1 = 0$ (viteza rotorului este nula) nefiind îndeplinita conditia de sincronism, motorul sincron nu poate dezvolta cuplu electromagnetic.

Într-adevar daca Ω_2 este viteza unghiulara a câmpului învârtitor statoric obtinut prin curentii trifazati absorbiti de la retea, curenti de forma:

$$\begin{aligned} i_{2U} &= I_{2m} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t - \varphi) \\ i_{2V} &= I_{2m} \cdot \sin\left(\omega_2 \cdot t - \varphi - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ i_{2W} &= I_{2m} \cdot \sin\left(\omega_2 \cdot t - \varphi - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.26)$$

iar daca Ω_1 este viteza rotorului considerata diferita de Ω_2 , atunci sistemul trifazat de fluxuri produse de câmpul inductor din rotor fata de stator va avea forma:

$$\begin{aligned} \varphi_{2A} &= \Phi_{2m} \cos \omega_1 t \\ \varphi_{2B} &= \Phi_{2m} \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_{2W} &= \Phi_{2m} \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Energia de interactiune dintre fluxul inductor φ_{2U} si curentul de pe faza U va avea expresia:

$$W_{2U} = i_{2U} \cdot \varphi_{2U} = I_{2m} \cdot \Phi_{2m} \cdot \cos(p \cdot \beta) \cdot \sin(\omega_2 \cdot t - \varphi)$$

unde s-a notat:

$$\beta = \Omega_1 \cdot t = \frac{\omega_1 \cdot t}{p} \text{ - coordonata unghiulara a rotorului fata de o axa de referinta statorica.}$$

Cuplul electromagnetic dezvoltat de faza U a înfășurării statorice și transmis rotorului se poate afla aplicând teorema forțelor generalizate:

$$m_{2U} = \left(\frac{dW_{2U}}{d\beta} \right)_{i_2=ct.} = p \cdot I_{2m} \cdot \Phi_{2m} \cdot \sin(\omega_1 t) \cdot \sin(\omega_2 t - \varphi)$$

$$i_2(\beta) = ct..$$

Procedând analog pentru fazele V și W se obține pentru cuplul electromagnetic instantaneu total dezvoltat asupra rotorului:

$$m_2 = m_{2U} + m_{2V} + m_{2W} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot I_{2m} \cdot \Phi_{2m} \cdot \cos(\omega_1 t - \omega_2 t - \varphi).$$

Cuplul mediu dezvoltat pe o perioadă T va fi:

$$M_2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T m_2 dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{3}{2} \cdot p \cdot I_{2m} \cdot \Phi_{2m} \cdot \cos(\omega_1 t - \omega_2 t - \varphi) dt. \quad (4.28)$$

Examinând expresia (4.28) se constată că pe un număr oarecare de perioade ale funcției sinusoidale $\left(T = \frac{2 \cdot k}{\pi} \right)$ cuplul electromagnetic mediu în timp este nul exceptând cazul $\omega_1 = \omega_2$.

Deci motorul sincron nu poate dezvolta cuplu electromagnetic decât dacă este îndeplinită condiția de sincronism $\Omega_1 = \Omega_2$.

Pentru a putea porni motorul sincron se poate aplica una din metodele:

- pornirea cu ajutorul unui motor auxiliar;
- pornirea în asincron.

Pornirea cu ajutorul unui motor auxiliar, mai rar folosită în practică, constă în antrenarea cu ajutorul unui motor auxiliar a rotorului motorului sincron până la turatia de sincronism, moment în care se conectează statorul la rețea. Motorul sincron va dezvolta cuplu electromagnetic și deci motorul auxiliar se poate decupla.

Metoda este neeconomică deoarece mai necesită un motor, care, chiar dacă este de putere mai mică (pornirea este recomandabil să se facă în gol) ridică totuși prețul instalației.

Pornirea în asincron, este posibilă numai atunci când polii rotorici sunt prevăzuți cu o înfășurare suplimentară în scurtcircuit care joacă rolul coliviei la motorul asincron. Barele coliviei sunt plasate în creștături practicate în piesele polare (figura 4.2) și sunt din alama sau aluminiu. În aceste bare se induc curenți atunci când câmpul învârtitor al statorului are o anumită viteză relativă față de rotor, așa cum este cazul la pornire. Interacțiunea dintre acești curenți și fluxul inductor va da naștere unui cuplu electromagnetic asincron de pornire.

După ce motorul a pornit (înfășurarea de excitație fiind scurtcircuitată la perii pentru a ajuta pornirea) motorul se turează atingând turatia subsincronă de regim staționar. În acest moment se

injecteaza curent continuu în înfasurarea de excitatie, obținându-se un câmp învârtitor care initial are aceeași turatie subsincrona, dar care, apoi, într-un proces tranzitoriu capata viteza de sincronism.

Si aceasta metoda este dificila continând multe manevre.

În general se poate afirma ca motorul sincron are o pornire dificila.

4.3.3 Caracteristicile motorului sincron

Pentru aprecierea performantelor motorului sincron de obicei se traseaza experimental la bancul de proba urmatoarele caracteristici:

- caracteristica mecanica: $n_1 = f(M)$;
- caracteristica unghiulara: $M = f(\theta)$;
- caracteristica în “V”: $I_2 = f(I_1)$.

Caracteristica mecanica

Întrucât motorul sincron nu poate functiona decât la sincronism, caracteristica mecanica $n_1 = f(M)$ va fi o dreapta paralela cu axa cuplului (figura 4.24). Cuplul electromagnetic poate creste pâna la valoarea M_c (cuplul critic) dupa care masina se opreste.

Caracteristica mecanica ne poate arata ca în domeniul $M \in (0, M_c)$ motorul sincron dezvolta o viteza riguros constanta. Pentru acest motiv se utilizeaza la actionarea masinilor de lucru care trebuie sa aiba o viteza constanta odata cu cresterea cuplului rezistent (de ex. actionarea compresoarelor în industria frigului).

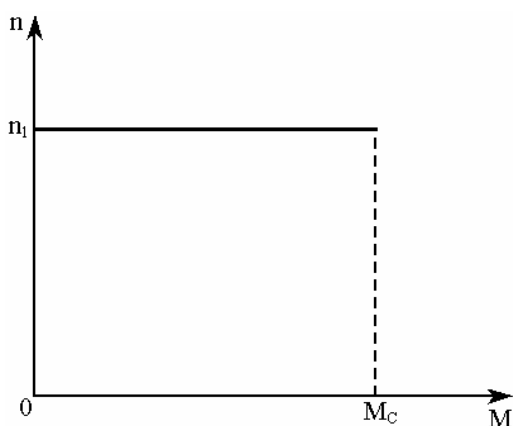


Figura 4.24

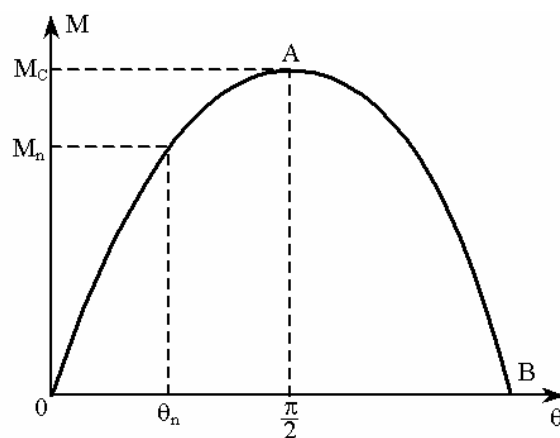


Figura 4.25

Caracteristica unghiulara

Reprezinta dependenta dintre cuplul electromagnetic M si unghiul intern θ , si se traseaza la $U_2 = \text{ct.}, I_1 = \text{ct.}$. Din expresia cuplului electromagnetic:

$$M = \frac{3 \cdot E_0 \cdot U_2}{X_s \cdot \Omega} \cdot \sin \theta = M_C \cdot \sin \theta \quad (4.29)$$

unde $M_C = \frac{3 \cdot E_0 \cdot U_2}{X_s \cdot \Omega}$ este cuplul maxim (critic) dezvoltat de motor rezulta forma acestei caracteristici reprezentata în figura 4.25.

Punctul nominal de functionare se afla pe portiunea OA pentru care: $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ si care, reprezinta portiunea *stabila* de functionare a motorului. Într-adevar, pe aceasta portiune orice crestere a cuplului rezistent la axul motorului nu poate duce la micsorarea vitezei ci la cresterea unghiului intern θ , ceea ce înseamna o crestere a cuplului electromagnetic dezvoltat care va putea prelua cresterea cuplului rezistent. O crestere a cuplului rezistent peste valoarea M_C conduce la cresterea valorii lui θ peste $\frac{\pi}{2}$, deci, la scaderea cuplului dezvoltat ducând la oprirea motorului. Portiunea AB este considerata deci o portiune *instabila* de functionare.

Caracteristica în „V”

Reprezinta dependenta dintre curentul absorbit de la retea în stator I_2 si curentul de excitatie din rotor I_1 în situatia mentinerii constante a tensiunii la borne $U_2 = \text{ct.}$ si a cuplului rezistent $M = \text{ct.}$.

Din expresia:

$$M = \frac{3 \cdot E_0 \cdot U_2}{X_s \cdot \Omega} \cdot \sin \theta = \text{ct.}$$

rezulta: $E_0 \cdot \sin \theta = \text{ct.}$ (4.30)

Expresia (4.30) ne arata ca locul geometric al punctului de functionare A (din diagrama de fazori din figura 4.26) este o dreapta paralela cu fazorul \underline{U}_2 .

În figura 4.26 sunt reprezentate trei pozitii ale punctului de functionare:

- A_1 când motorul se comporta fata de retea ca un receptor rezistiv – inductiv;
- A_2 când motorul se comporta fata de retea ca un receptor pur rezistiv;
- A_3 când motorul se comporta fata de retea ca un receptor rezistiv - capacitiv.

Din aceste trei pozitii rezulta forma caracteristicii $I_2 = f(I_1)$ (t.e.m. E_0 fiind direct proportionala cu curentul de excitatie I_1), care se prezinta sub forma de „V”.

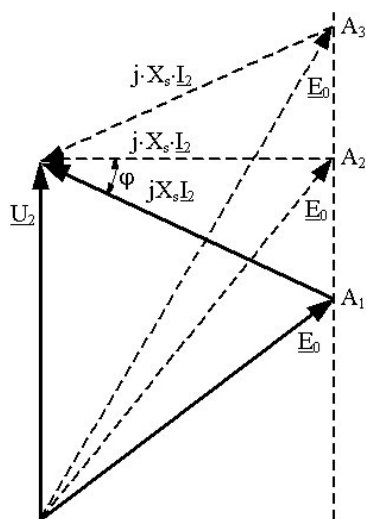


Figura 4.26

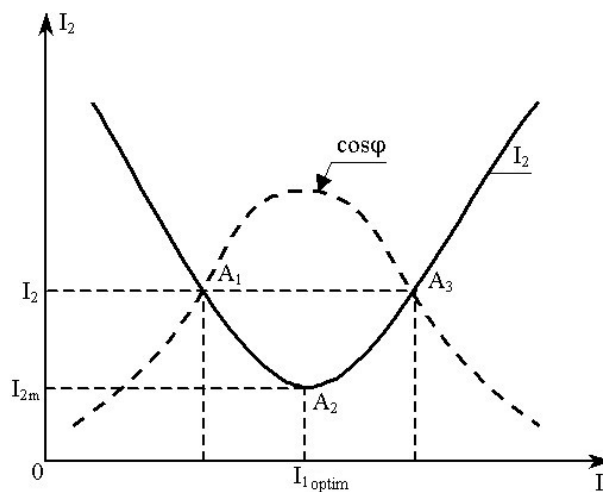


Figura 4.27

Din examinarea acestei caracteristici rezulta ca atunci când curentul de excitatie I_1 crește, curentul absorbit de la rețea I_2 scade (scade fazorul $j \cdot X_s \cdot I_2$) atât timp cât motorul se comporta ca un receptor rezistiv – inductiv (curentul I_2 se afla în urma tensiunii U_2), adică până în punctul A_2 caruia îi corespunde curentul de excitatie $I_{1\text{optim}}$ (curent de excitatie optim) când motorul se comporta ca un receptor pur rezistiv (curentul I_2 se afla în faza cu tensiunea U_2). Continuând să creștem curentul de excitatie I_1 peste valoarea $I_{1\text{optim}}$, curentul I_2 va crește (punctul A_3), motorul comportându-se ca un receptor rezistiv – capacitiv (curentul I_2 se afla înaintea tensiunii U_2).

Când $I_1 < I_{1\text{optim}}$ se spune ca motorul funcționează *subexcitat*, iar când $I_1 > I_{1\text{optim}}$ se spune ca motorul funcționează *supraexcitat*.

Rezulta de aici clar ca, reglând curentul de excitatie, se poate ajusta factorul de putere, $\cos \varphi$, al motorului. În figura 4.26 pe lângă variația curentului absorbit I_2 funcție de I_1 s-a reprezentat (cu linie punctată) și variația factorului de putere $\cos \varphi$ față de curentul de excitatie I_1 .

Astfel, deși motorul sincron poate avea întrefierul relativ mare (ca în cazul rotorului cu poli aparenti) el poate funcționa cu factor de putere foarte bun (chiar capacitiv dacă se dorește) fiind preferat în acționările de putere mare și foarte mare cu turatie constantă (stații de pompare, propulsia electrică a navei) unde motoarele asincrone datorită factorului de putere mai prost nu sunt acceptate.

Funcționarea în regim supraexcitat este utilizată la compensarea energiei reactive a rețelelor inductive în vederea îmbunătățirii factorului de putere, înlocuind cu succes bateriile de condensatoare care la puteri mari devin foarte voluminoase.

Folosit la îmbunătățirea factorului de putere în rețele inductive (ca motor în gol supraexcitat) motorul sincron poartă denumirea de *compensator sincron*.

4.4 Aplicații

1. Un motor sincron trifazat cu poli înecați are următoarele date nominale: $P_n = 2000\text{kW}$, $U_l = 6000\text{V}$, $f = 50\text{Hz}$, $\cos \varphi_n = 0,9$, conexiunea stea.

Rezistența înfășurătorilor statorice de fază este neglijabilă, iar reactanța sincronă este $X_s = 1,0\text{u.r.}$ (unități relative). Motorul are pierderi în fier și pierderi mecanice neglijabile. El funcționează în sarcină, absorbind o putere activă $P = 1500\text{kW}$ și are o tensiune electromotoare indusă de excitație $E_0 = 4682\text{V}$ pe fază, tensiunea de alimentare fiind cea nominală.

a) Să se determine unghiul intern θ , curentul absorbit I_2 și factorul de putere $\cos \varphi$ în regimul de sarcină de mai sus;

b) Pentru aceeași putere activă absorbită și aceeași tensiune la borne, există vreună altă valoare a t.e.m. E_0 care conduce la aceeași valoare a curentului absorbit? Dacă da, care este această valoare și unghiul intern respectiv θ ?

c) Care din cele două valori precedente ale lui E_0 este de dorit și din ce motiv?

REZOLVARE

a) Pentru început, trebuie calculată valoarea absorbită X_s a reactanței sincrone, cunoscând valoarea relativă egală cu unitatea. Mărimea de referință în cazul reactanțelor este așa-numita impedanță nominală $Z_n = \frac{U_n}{I_n}$, U_n și I_n fiind respectiv valorile nominale ale tensiunii de fază și ale curentului absorbit. Tensiunea nominală **pe fază** a motorului este dată, conexiunea fiind stea și cunoscând tensiunea de linie $U_l = 6000\text{V}$ a rețelei:

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464,1\text{ V.}$$

Curentul nominal se obține din puterea nominală activă absorbită, egală cu puterea utilă de 2000 kW (deoarece pierderile de orice fel s-au neglijat) și din factorul de putere nominal:

$$I_2 = \frac{P_n}{3 \cdot U_f \cdot \cos \varphi_n} = \frac{2 \cdot 10^6}{3 \cdot 3464,1 \cdot 0,9} = 213,83\text{ A.}$$

Impedanța nominală va fi deci:

$$Z_n = \frac{U_f}{I_2} = \frac{3464,1}{213,83} = 16,2\Omega$$

iar reactanta sincrona rezulta:

$$X_s = Z_n = 16,2\Omega.$$

Pentru a determina marimile cerute, vom apela la ecuatia (4.25) în care se omite termenul $R_2 \cdot I_2$ (neglijabil),

$$\underline{U} = \underline{E}_0' + j \cdot X_s \cdot I_2$$

t.e.m. indusa de excitatie $E_0' = 4682V$ fiind mai mare decât tensiunea U_f de faza, situatie pentru care este valabila diagrama fazoriala din figura 4.28, a:



Figura 4.28

Sa notam cu θ' unghiul intern si cu φ' unghiul de defazaj dintre tensiunea U_f si curentul I_2 . Defazajul φ' corespunde unei functionari în regim capacitiv. Pe baza acestei diagrame se pot scrie urmatoarele doua ecuatii:

$$\begin{aligned} X_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi' &= E_0' \cdot \sin \theta'; \\ X_s \cdot I_2 \cdot \sin \varphi' &= E_0' \cdot \cos \theta' - U_f. \end{aligned}$$

În acest sistem de ecuatii, necunoscutele sunt: I_2, φ', θ' , fiind necesara înca o ecuatie. Într-adevar, în enunt se mai precizeaza puterea absorbita de motor în acest caz, deci:

$$3 \cdot U_f \cdot I_2 \cdot \cos \varphi' = P.$$

Din aceasta ultima ecuatie rezulta componenta activa a curentului absorbit:

$$I_2 \cdot \cos \varphi' = \frac{P}{3 \cdot U} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{3 \cdot 3464,1} = 144,38A \quad (1)$$

iar apoi:

$$\sin \theta' = \frac{X_s \cdot I_2 \cdot \cos \theta'}{E_0'} = \frac{16,2 \cdot 144,38}{4682} = 0,5.$$

Prin urmare, unghiul intern este $\theta' = 30^\circ$. Ridicând la patrat relatiile (1) si (2), se gaseste:

$$I_2 \cdot \sin \varphi' = \frac{E_0' \cdot \cos \theta' - U_f}{X_s} = \frac{4682 \cdot 0,866 - 3464,1}{16,2} = 36,46A \quad (2)$$

si apoi factorul de putere:

$$\cos \varphi' = \frac{I_2 \cdot \cos \varphi'}{I_2} = \frac{144,38}{213,83} = 0,67(\text{capacitiv}).$$

b) Pentru aceeasi putere activa absorbita si aceeasi tensiune la borne, deci pentru aceeasi valoare a componentei active $I_2 \cdot \cos \varphi'$ a curentului si pentru acelasi curent I_2 absorbit, mai este posibil un punct de functionare asa cum se vede în figura 4.25, b. De data aceasta regimul de functionare este inductiv si t.e.m. indusa de excitatie are alta valoare. Sa o notam E_0'' , noul unghi intern fiind θ'' , ambele marimi fiind necunoscute. În vederea determinarii acestor necunoscute, diagrama fazoriala furnizeaza urmatoarele relatii:

$$E_0'' \cdot \sin \theta'' = X_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi' = 16,2 \cdot 144,38 = 2338,96V;$$

$$\left(U_f - E_0'' \cdot \cos \theta'' \right)^2 + \left(E_0'' \right)^2 \cdot \sin^2 \theta'' = X_s^2 \cdot I_2^2.$$

Din a doua relatie se deduce:

$$E_0'' \cdot \cos \theta'' = U_f - \sqrt{X_s^2 \cdot I_2^2 - E_0'' \cdot \sin \theta''} = 3464,1 - \sqrt{(16,2 \cdot 148,91)^2 - 2338,63^2} = 3873,63V.$$

În consecinta,

$$E_0'' = \sqrt{2338,96^2 + 3873,63^2} = 3705,2V$$

$$\operatorname{tg} \theta'' = 0,813; \quad \theta'' = 39,14^\circ.$$

c) Este preferabila functionarea cu un factor de putere capacitiv, adica cu $E_0' = 4682V$, deoarece în acest caz motorul sincron poate pune la dispozitia retelei o anumita putere reactiva,

$$Q = 3 \cdot U_f \cdot I_2 \cdot \sin \varphi = 3 \cdot 3464,1 \cdot 148,91 \cdot 0,243 = 376,3kVAR$$

care poate fi utilizat pentru îmbunatatirea factorului de putere al întregii instalatii. În plus, functionarea cu t.e.m. de excitatie mai mare asigura o mai buna stabilitate dinamica, cuplul electromagnetic maxim,

$$M_0 = \frac{3 \cdot E_0 \cdot U_f}{X_s \cdot \Omega}$$

fiind mai mare în cazul a) în comparatie cu cazul b) cu 26,4%.

2. Puterea aparenta nominala a unui motor asincron trifazat cu poli înecati este $S_n = 400\text{kVA}$, tensiunea de faza fiind $U_n = 3470\text{V}$, reactanta sincrona $X_s = 50\Omega$, $R_2 \approx 0$, $f_1 = 50\text{Hz}$, $2 \cdot p = 6$ poli.

a) Sa se determine curentul absorbit, daca motorul functioneaza la puterea nominala sub factor de putere unitar.

b) Care este cuplul electromagnetic dezvoltat în acest caz ?

c) Daca cuplul electromagnetic ramâne acelasi, dar dorim ca motorul sa functioneze cu factorul de putere $\cos \varphi = 0,9$ capacitiv, care este curentul absorbit si t.e.m. E_0 ?

REZOLVARE

a) Curentul absorbit pe fiecare faza rezulta imediat:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{3 \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{4 \cdot 10^5}{3 \cdot 3470 \cdot 1} = 38,42\text{A}.$$

b) Deoarece $R_2 \approx 0$, se pot neglija pierderile Joule ale motorului. Neglijând si pierderile în fier si cele mecanice, puterea activa absorbita este egala cu puterea electromagnetica,

$$P = M \cdot \Omega = 3 \cdot U_n \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$$

Ω fiind viteza unghiulara de sincronism,

$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,72\text{rad/s}.$$

Deci:

$$M = \frac{3 \cdot U_n \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{\Omega} = \frac{4 \cdot 10^5}{104,72} = 3819,7\text{N} \cdot \text{m}.$$

Pentru determinarea t.e.m. E_0 induse de câmpul învârtitor de excitatie, vom observa ca triunghiul format de fazorii \underline{U} , $j \cdot X_s \cdot \underline{I}_2$, $-\underline{E}_0$ este dreptunghic, deoarece curentul \underline{I}_2 este în faza cu \underline{U} si prin urmare,

$$E_0 = \sqrt{U^2 + X_s^2 \cdot I^2} = \sqrt{3470^2 + (50 \cdot 38,42)^2} = 3966,2\text{V}.$$

c) Sa notam noul curent absorbit I_2' si noua t.e.m. E_0' . Întrucât tensiunea pe faza si cuplul electromagnetic dezvoltat ramân acelasi, rezulta:

$$I_2' \cdot \cos \varphi' = I_2 = 38,42\text{A}$$

si deci

$$I_2' = \frac{38,42}{0,9} = 42,69\text{A}.$$

Pe de alta parte, din diagrama de fazori (vezi figura 4.25, a) rezulta:

$$\begin{aligned} E_0' \cdot \sin \theta' &= X_s \cdot I_2' \cdot \cos \varphi' \\ E_0' \cdot \cos \theta' &= X_s \cdot I_2' \cdot \sin \varphi' + U \end{aligned}$$

ceea ce conduce la urmatoarea expresie a t.e.m. E_0'

$$E_0' = \sqrt{\left(U + X_s \cdot I_2' \cdot \sin \varphi' \right)^2 + \left(X_s \cdot I_2' \cdot \cos \theta' \right)^2}$$

Numeric,

$$E_0' = \sqrt{(3470 + 50 \cdot 42,69 \cdot 0,435)^2 + (50 \cdot 42,69 \cdot 0,9)^2} = 4799,7V.$$

Pentru a trece motorul în regim capacitiv este deci necesara supraexcitarea masinii.

3. Un motor sincron trifazat cu poli înecati functioneaza în gol. Pierderile sale de orice natura sunt neglijabile. Se cunosc reactanta X_m de magnetizare si reactanta sincrona, precum si tensiunea U pe faza. Sa se determine expresia analitica a caracteristicii în „V” $I_2 = f(I_1')$, I_2 fiind curentul absorbit, iar I_1' curentul de excitatie raportat la stator.

REZOLVARE

Deoarece cuplul electromagnetic este nul,

$$M = \frac{3 \cdot E_0' \cdot U}{X_s \cdot \Omega} = 0$$

rezulta $\theta = 0$, în care caz fazorii: $\underline{U}, -\underline{E}_0$ si $j \cdot X_s \cdot \underline{I}_2$ se suprapun, iar fazorul \underline{I}_2 este în cvadratura de faza cu tensiunea \underline{U} , ceea ce înseamna $\cos \varphi = 0$.

În cazul când $E_0 > U$ este valabila situatia din figura 4.29, a masina functionând capacitiv, între marimile functionale existând relatia

$$|\underline{E}_0 - \underline{U}| = X_s \cdot I_2.$$

Cum $E_0 = X_m \cdot I_1'$, se obtine, deci, urmatoarea dependenta între curentul absorbit si curentul de excitatie raportat:

$$I_2 = \frac{X_m}{X_s} \cdot I_1' - \frac{U}{X_s}. \quad (1)$$

În cazul când $E_0 < U$, masina functioneaza inductiv, diagrama corespunzatoare fazoriala fiind data în figura 4.29, b, din care rezulta:

$$|\underline{U} - \underline{E}_0| = X_s \cdot I_2$$

adica

$$I_2 = -\left(\frac{X_m}{X_s}\right) I_1' + \frac{U}{X_s}. \quad (2)$$

Când $E = U$, evident $I_2 = 0$.

Caracteristica în „V” rezulta pe baza expresiilor analitice (1) si (2) este prezentata în figura 4.29, c. Variindu-se curentul de excitație, motorul sincron funcționând în gol poate fi trecut din regim inductiv în regim capacitiv. În acest ultim regim el este utilizat în sistemele electroenergetice pentru o îmbunătățire a factorului de putere. Caracteristica din figura 4.29, c nu ține seama de fenomenul de saturatie, caci s-a presupus ca t.e.m. E_0 este proportionala cu curentul de excitație.

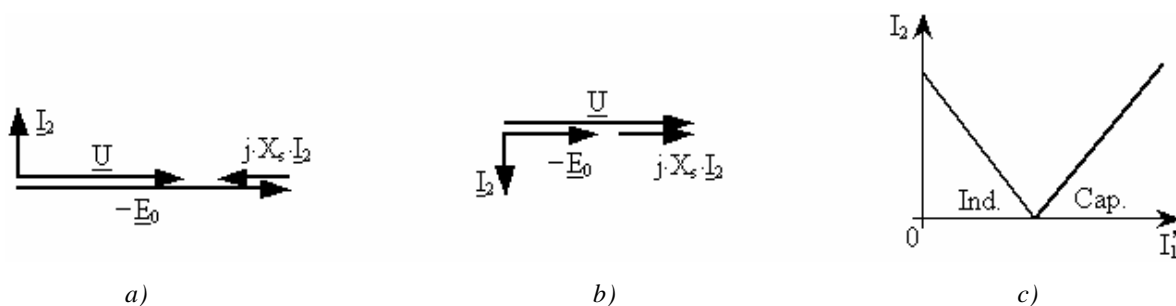


Figura 4.29