

MAȘINA SINCRONĂ

6.1. CONSTRUCȚIA MAȘINILOR SINCRONE. GENERALITĂȚI

Mașina sincronă este caracterizată prin faptul că viteza de rotație a rotorului, în regim de funcționare staționar este riguros dependentă de frecvența tensiunii la care este conectată înfășurarea de curent alternativ și numărul de perechi de poli ai câmpului învârtitor, respectiv ai înfășurării de excitație.

Un element caracteristic pentru mașina sincronă constă în alimentarea în curent continuu a înfășurării de excitație. Datorită acestui fapt mașina sincronă poate funcționa la factor de putere unitar.

Mașina sincronă, a cărei secțiune transversală este dată în figura 6.1, cuprinde un stator asemănător cu cel al mașinii asincrone (1), pe care este dispusă o înfășurare de curent alternativ, în mod obișnuit trifazată (2). Înfășurarea de excitație (3) este dispusă pe rotorul (4). Aceasta este varianta de mașină sincronă în construcție directă și este prezentată simbolic în figura 6.2 -a). Accesul la înfășurarea de excitație se face prin intermediul a două inele de contact. Rotorul, numit și inductor, se realizează în două variante: cu poli aparenti (Fig. 6.3 -a) și cu poli înecați (Fig. 6.3 -b, c).

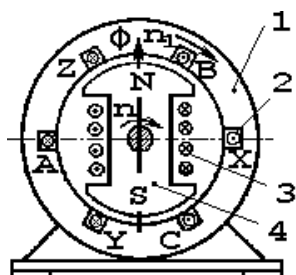


Fig. 6.1. Secțiune transversală prin mașina sincronă.

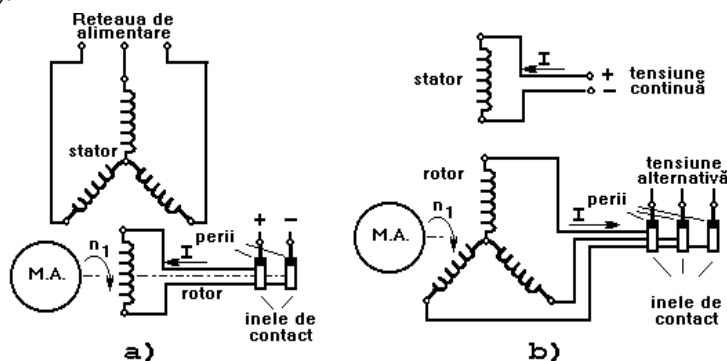


Fig. 6.2. Variante constructive la mașina sincronă.

Principalele părți componente ale rotorului sunt: 1-ax, 2 - piese polare, 3 - miez sau dinți, 4 – înfășurare de excitație.

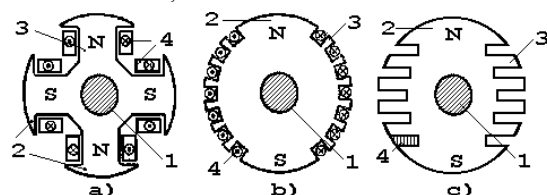


Fig. 6.3. Variante constructive de rotoare.

Rotorul cu poli aparenti se folosește la construcția hidrogenatoarelor (viteza sub 500 rot/min) și a motoarelor sincrone pentru viteze sincrone reduse (mulți poli), iar rotoarele cu poli înecați se folosesc la construcția turbogeneratoarelor care au o singură pereche de poli și mai rar două perechi.

Mașina sincronă poate funcționa în regim de *generator*, *motor* sau *compensator sincron* pentru furnizarea puterii reactive necesare la compensarea factorului de putere. Mașina sincronă în construcție directă se utilizează pentru producerea energiei electrice în centrale și se folosește la puteri foarte mari (până la 1500 MVA).

La puteri sub 100 KVA, mașinile sincrone se construiesc și în variantă inversată, având pe stator înfășurarea de excitație, iar pe rotor înfășurarea de curent alternativ (Fig. 6.2 -b). Accesul la această înfășurare se face prin intermediul a trei inele și perii. Dacă se scoate și nului la placa de borne, este necesară montarea unui al patrulea inel.

Pentru studiul analitic al mașinii cu poli aparenti, s-au introdus două axe de referință perpendiculare din punct de vedere electric (Fig. 6.4). Axa

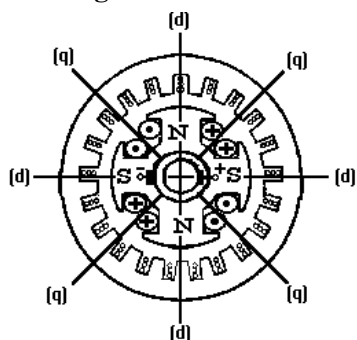


Fig. 6.4. Marcarea axelor de referință la mașina cu poli aparenti.

polilor se numește axă longitudinală (d), iar axa ce corespunde spațiului interpolar se numește axă transversală (q).

Principalele părți componente sunt prezentate în figura 6.5: 1 – excitatoare (generator de curent continuu, 2 - carcasă, 3 - inel de ridicare, 4 - miez stator, 5 - înfășurare stator, 6 - paletă ventilator, 7 - piesă polară, 8 – cuplă, 9 - ax, 10 - fereastră aspirație, 11 - placă borne, 12 - talpă susținere, 13 - scut, 14 - inele, [6].

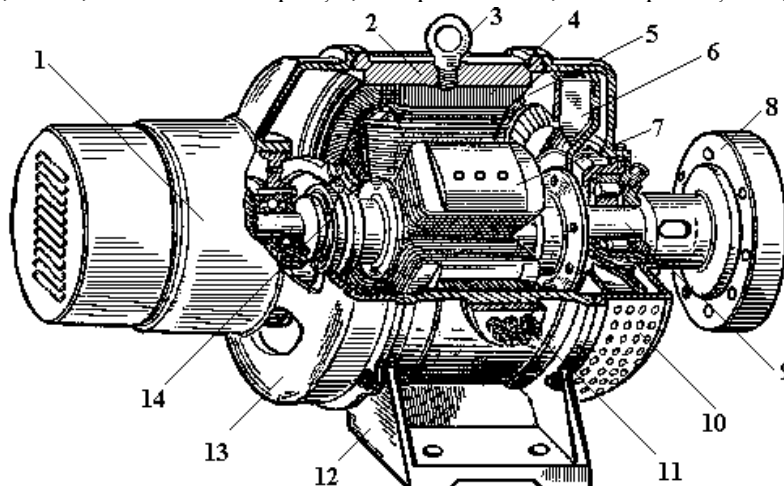


Fig. 6.5. Vedere generală și secțiune pe sferă la o mașină sincronă de construcție directă.

Puterile mașinilor sincrone sunt limitate din considerente mecanice și termice. Pentru răcire se folosește ca agent termic aerul, hidrogenul și apa. La puteri mari, răcirea conductoarelor se face direct, fluidul de răcire circulând în contact cu conductorul. Prin utilizarea supraconductibilității se prevede puterea limită de 2500 și 5000 MVA.

6.2. SISTEME DE EXCITAȚIE PENTRU MAȘINI SINCRONE

Gama foarte largă de puteri pentru care se construiesc mașinile sincrone impune realizarea de variante diferite pentru sistemele de excitație ale mașinii. Sursa de curent continuu necesară pentru excitația mașinii sincrone se adoptă funcție de puterea mașinii și de condițiile ce se impun la funcționarea în regim normal și de avarie.

O condiție importantă ce se impune sistemului de excitație constă în realizarea unei viteze mari de răspuns, adică asigurarea creșterii într-un timp foarte scurt a tensiunii la bornele înfășurării de excitație, în scopul restabilirii rapide a tensiunii la bornele generatorului sincron, în caz de avarie în sistemul electroenergetic. Reglarea curentului de excitație trebuie să se facă în limite largi chiar la funcționarea normală, pentru a asigura circulația puterii reactive între generator și sistem. Pentru a asigura furnizarea puterii electrice în condițiile funcționării normale, fiecare mașină sincronă este prevăzută cu două sisteme de reglaj: sistemul de reglare automată a tensiunii (RAT) care comandă curentul de excitație funcție de mărimile de ieșire ale generatorului (putere, tensiune, curent, unghi intern) și sistemul de reglare automată a vitezei de rotație care comandă vana de admisie a agentului primar (abur, apă, gaz).

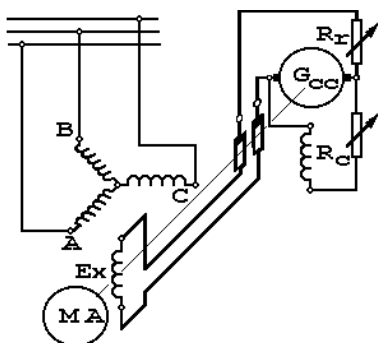


Fig. 6.6. Excitație cu generator de curent continuu cuplat pe același ax.

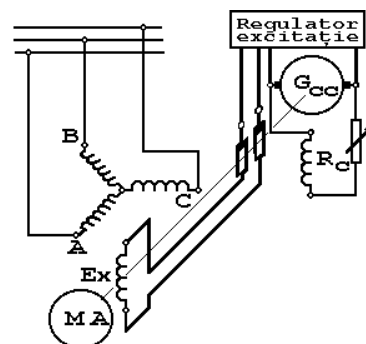


Fig. 6.7. Mașină sincronă cu regulator excitație.

Se prezintă în continuare câteva sisteme de excitație mai utilizate. În figura 6.6 se folosește ca sursă de excitație un generator de curent continuu cu excitație derivație, montat pe același ax cu al mașinii sincrone. Re-

glarea curentului de excitație se realizează cu ajutorul reostatului R_r . Funcționarea schemei se ameliorează prin introducerea unui regulator de excitație (Fig. 6.7).

Generatorul de curent continuu, numit și excitatoare, poate fi montat separat și antrenat cu un motor asincron. Utilizarea generatoarelor de curent continuu pentru excitarea mașinilor sincrone este limitată de dificultățile care apar la fabricarea mașinilor de curent continuu la viteze relativ ridicate și cu puteri mai mari de 1 MVA. Din acest considerent, utilizarea mașinilor de curent continuu se face pentru mașini sincrone ce nu depășesc 200 MVA.

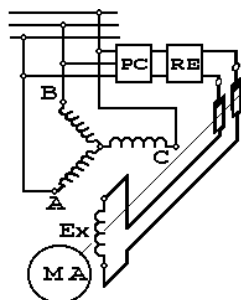


Fig. 6.8. Excitație cu punte comandată.

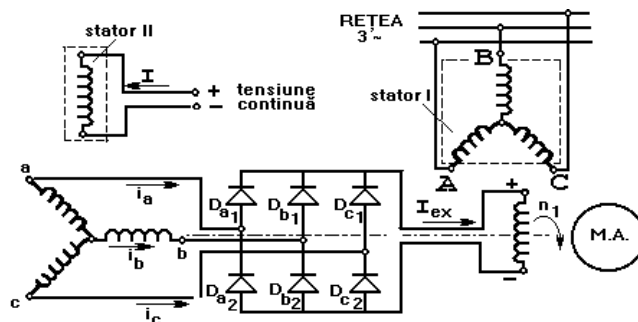


Fig. 6.9. Sistem de excitație fără inele de contact.

În locul generatoarelor de curent continuu se folosesc redresoare comandate sau necomandate. În figura 6.8 se dă o schemă de principiu pentru excitația mașinii sincrone prin folosirea unei punți redresoare comandate, alimentată de la sistemul energetic.

Un alt inconvenient ce apare la excitația mașinii sincrone îl constituie prezența inelelor de contact. Acestea pot fi eliminate utilizând schema din figura 6.9. Schema este compusă din două mașini sincrone: una de construcție directă (I) și una inversată (II) și un rotor comun. Tensiunea alternativă de la mașina sincronă inversată se aplică unei punți redresoare necomandate care alimentează înfășurarea de excitație a mașinii de construcție directă. Reglarea curentului de excitație a mașinii de construcție directă se obține prin modificarea curentului de excitație a mașinii de construcție inversată. Pe baza acestei scheme de principiu s-a adoptat o schemă mai complexă (Fig. 6.10) pentru excitația generatoarelor.

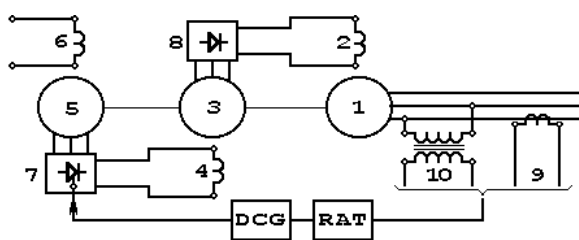


Fig. 6.10. Schema excitației turbogeneratorului de 385 MVA.

unghiul de deschidere al tiristoarelor prin intermediul dispozitivului de comandă pe grilă (DCG). Aceași schemă s-a aplicat și în tracțiunea electrică (locomotive Diesel electrice) cu specificația că reglarea tensiunii generatorului sincron principal se face și prin modificarea frecvenței. Excitația statică se folosește și în cazul hidrogenatoarelor.

În schema 6.11 este prezentat modul de excitație al hidrogenatorului de la centrala hidroelectrică de la Porțile de Fier. Generatorul principal 1 are înfășurarea de excitație 2 legată la punțile redresoare comandate 5 și 6 alimentate de la generatorul auxiliar 3. Puntea comandată 5 se folosește pentru funcționare normală și este alimentată de la prize scoase la înfășurarea statorică, în timp ce puntea 6 servește la forțarea excitației. Înfășurarea de excitație 4 a generatorului auxiliar este alimentată la început prin puntea redresoare 9 de la serviciile proprii, iar după amorsarea generatorului auxiliar se alimentează de la bornele acestuia prin transformatorul 8 și

Schema este compusă din trei generatoare sincrone cuplate pe același ax. Înfășurarea de excitație 2 a generatorului principal 1 este alimentată prin intermediul punții redresoare 8 de la generatorul intermediar 3 a cărei construcție este inversată. Înfășurarea de excitație 4 a acestuia este alimentată prin intermediul punții redresoare comandate 7 de la generatorul sincron pilot. Înfășurarea de excitație 6 a generatorului pilot este alimentată separat. Regulatorul automat de tensiune (RAT) primește semnale de la transformatorul de curent 9 și transformatorul de tensiune 10, montate la bornele generatorului principal și comandă

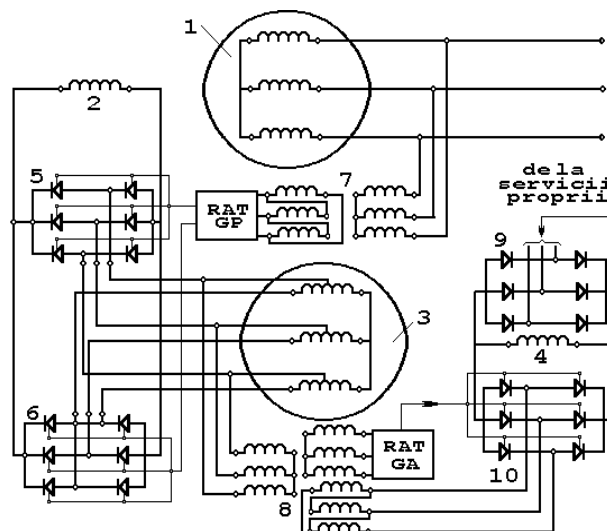


Fig. 6.11. Schema excitației statice la un hidrogenator de 190 MVA.

puntea comandată 10. Unghiul de deschidere a tiristoarelor din puntea 10 este comandat prin intermediul regulatorului automat de tensiune al generatorului auxili- ar. Comanda punților 5 și 6 se face de la regulatorul automat de tensiune al generatorului principal prin intermediul transformatorului 7 alimentat de la bornele generatorului principal. Regulatorul automat de tensiune ac-ționează primul la apariția unei perturbații deoarece are o viteză de răspuns mai mare și este comandat de tensiunea de la bornele generatorului. Regulatorul automat al vitezei intervine la 0.2...0,5 secunde de la semnalarea perturbației prin închiderea sau deschiderea vanei de admisie a agentului primar.

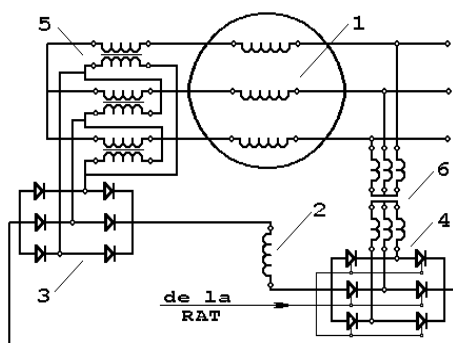


Fig. 6.12. Schema de autoexcitație cu redresare comandată.

Sistemele de excitație fără excitatoare se bazează pe auto-excitarea mașinii sincrone și se folosesc la puteri mici. În figura 6.12, se prezintă o soluție a firmei Altshom. Pentru amorsare este necesar ca generatorul 1 să posede un magnetism remanent de la o funcționare anterioară. Înfășurarea de excitație 2 este alimentată de la bornele generatorului prin transformatorul de tensiune 6 și puntea comandată 4, unghiul de deschidere a tiristoarelor fiind comandat de la regulatorul automat de tensiune. Schema mai este prevăzută cu reacție după curentul de sarcină preluat prin transformatorul serie 5 și puntea redresoare 3 asigurând excitația la mersul în sarcină și la regimul de scurtcircuit. Puntea comandată asigură excitația la mersul la gol. Avantajul schemei constă în costul redus și simplitatea constructivă, dar marele dezavantaj constă în siguranța redusă în funcționare.

Se remarcă faptul că puterea sistemelor de excitație cu redresoare comandate reprezintă un procent mai redus din puterea generatorului sincron (0,5...0,6)% față de puterea sistemelor de excitație cu generatoare de curent continuu (1...1,2)%. În plus apar dificultăți legate de comutație care limitează viteza de rotație a rotorului.

6.3. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A GENERATORULUI SINCRON

Regimul de generator sincron este cel mai des întâlnit la mașina sincronă. Înfășurarea de excitație, alimentată în curent continuu, este antrenată de un motor primar la viteza de sincronism. Câmpul magnetic învârtitor care este dat de sistemul inductor (explicația a fost dată la capitolul 4.2.4) produce un flux magnetic variabil în timp, care înlanțuie spirele fiecărui circuit de fază a înfășurării statorului și induce o tensiune electromotoare (capitolul 4.2.5), în fiecare fază. Decalajul spațial al celor trei faze determină apariția unui sistem trifazat de tensiuni. Dacă la bornele statorului este conectată o impedanță trifazată simetrică, atunci înfășurările vor fi parcurse de un sistem trifazat de curenți, care va da naștere unui câmp magnetic învârtitor, numit *câmp magnetic de reacție* ce se rotește tot cu viteza sincronă ca și câmpul învârtitor de excitație (inductor). Cele două câmpuri magnetice se compun și se obține câmpul magnetic învârtitor rezultat din mașină. Generatorul sincron debitează pe impedanța de sarcină o putere electrică P_2 care este mai mică decât puterea mecanică P_1 primită la ax de la motorul primar, datorită pierderilor.

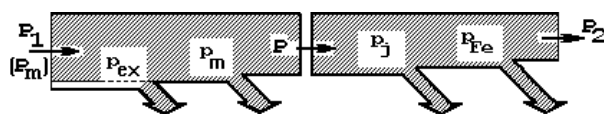


Fig. 6.13. Bilanțul energetic la generatorul sincron.

În figura 6.13 se reprezintă bilanțul energetic al generatorului sincron. Pierderile în excitație se iau în considerare numai dacă excitatoarea este cuplată pe axul mașinii sincrone. În fierul rotoric nu se produc pierderi deoarece curentul de excitație este continuu și fluxul este constant în timp. Dacă din puterea mecanică

primită la ax se scad pierderile mecanice, se obține puterea P , transferată statorului prin întrefier numită *putere electromagnetică*. Cuplul electromagnetic este un cuplu rezistent și se opune cuplului activ dat de motorul primar fiind definit prin relația:

$$P = - M \cdot \Omega_1 \quad (6.1)$$

Din puterea electromagnetică P preluată de către stator, cea mai mare parte se transferă sub formă de putere electrică impedanței de sarcină și numai o parte se consumă pentru acoperirea pierderilor prin efect electrotocaloric în înfășurarea trifazată și o altă parte acoperă pierderile în fierul statorului încât se poate scrie relația:

$$P = P_2 + p_j + p_{Fe} \quad (6.2)$$

și se poate defini randamentul generatorului.

6.4. REACȚIA INDUSULUI LA GENERATORUL SINCRON

La funcționarea normală în sarcină, repartiția câmpului magnetic rezultat de-a lungul pasului polar se abate mult de la repartiția ideală sinusoidală. Deformarea formei câmpului se datorește atât variației întrefieru-

lui cât și fenomenului de reacție a indusului. Influența câmpului magnetic de reacție asupra câmpului inductor este afectată în cea mai mare măsură de caracterul sarcinii. În funcție de caracterul sarcinii - rezistiv, inductiv, capacitiv sau mixt - între axa câmpului magnetic inductor și cea a câmpului de reacție a indusului intervine un anumit defazaj care schimbă forma câmpului resultant.

Deoarece contribuția fiecărei faze la formarea câmpului resultant este identică, se va studia fenomenul de reacție a indusului pentru o singură fază și o pereche de poli. Se alege faza prin care intensitatea curentului este maximă, moment în care axa câmpului magnetic învârtitor de reacție coincide cu axa acestei înfășurări. Din diagrama fazorială se determină poziția polilor inductor față de axa înfășurării considerate reprezentată printr-o singură bobină.

Pentru determinarea formei câmpului resultant mașina se reprezintă liniar iar spectrul liniilor de câmp se reprezintă separat (fictiv) pentru inductor și indus și apoi se sumează.

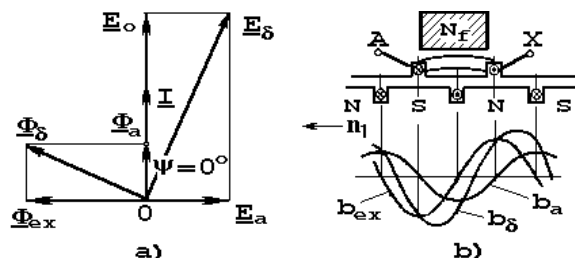


Fig. 6.14. Reacția indusului la sarcină activă.

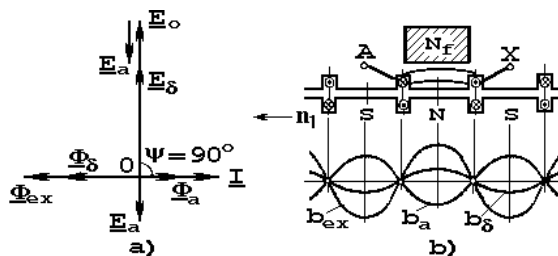


Fig. 6.15. Reacția indusului la sarcină inductivă.

Se consideră pentru început cazul *sarcinii pur active*. Pentru construcția diagramei fazoriale se ia ca origine de fază fluxul inductor Φ_{ex} , tensiunea electromotoare E_0 fiind decalată în urmă cu 90° , iar curentul de sarcină I este în fază cu tensiunea electromotoare E_0 (Fig. 6.14 -a). Fluxul de reacție a indusului Φ_a are aceeași direcție cu sensul curentului. Fluxul resultant în întrefier Φ_δ se obține prin compunerea fluxului inductor cu fluxul de reacție a indusului și se obține fluxul resultant în întrefier Φ_δ căruia îi corespunde tensiunea electromotoare E_δ . În figura 6.14 -b), este reprezentat modul de variație al inducțiilor b_{ex} , b_a , b_δ corespunzătoare fluxurilor din diagrama fazorială. Dacă se aplică regula burghiului drept, se constată că în axa înfășurării AX se formează un pol nord fictiv a cărui axă este în urma axei polului sud de pe rotor cu 90° care este un pol activ dacă se ține cont de sensul de rotație indicat în figură. Prin urmare efectul de reacție a indusului se manifestă pe axa transversală a mașinii și are caracter *distorsionant*.

Pentru o *sarcină pur inductivă*, fenomenul de reacție a indusului este prezentat în figura 6.15. În această situație, curentul de sarcină este decalat în urma tensiunii electromotoare cu 90° iar fluxul de reacție a indusului Φ_a este în opoziție de fază cu fluxul inductor Φ_{ex} , deci fluxul resultant în întrefier Φ_δ devine mai mic decât fluxul inductor (Fig. 6.15 -a). Prin urmare, efectul de reacție a indusului în cazul sarcinii inductive se manifestă pe direcția axei longitudinale și are *efect demagnetizant*. În practică, un asemenea caz poate fi întâlnit în situația în care are loc un scurtcircuit la bornele generatorului sincron, ținând cont că rezistența fiecărui circuit de fază este mult mai mică decât reactanța și poate fi neglijată. Efectul demagnetizant al reacției indusului în acest caz poate fi compensat în primul moment prin forțarea excitației pentru a nu perturba stabilitatea sistemului energetic prin scăderea bruscă a tensiunii la bornele generatorului sincron. În figura 6.15 -b), este prezentat modul de compunere a inducțiilor în întrefier.

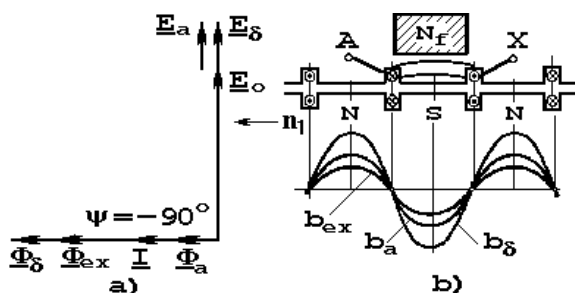


Fig. 6.16. Reacția indusului la sarcină capacitivă.

Cazul *sarcinii pur capacitive* este explicat cu ajutorul figurii 6.16. De această dată, efectul de reacție a indusului, care se manifestă tot pe direcția axei longitudinale, are *efect magnetizant*. Din diagrama fazorială (6.16 -a) se constată că fluxul de reacție creat de înfășurarea statorică parcursă de un curent capacitiv este în fază cu fluxul inductor. În figura 6.16 -b) se indică modul de obținere a câmpului resultant în întrefier. Un asemenea caz poate fi întâlnit în cazul în care generatorul sincron transferă puterea către receptor prin intermediul unei linii lungi de transport, la care capacitatea liniei rămasă în gol

poate influența buna funcționare a generatorului sincron, ajungându-se până la situații limită de pierderea controlului excitației.

La mașina cu poli aparenti, întrefierul este neuniform fiind mai mare în dreptul spațiului interpolar. De aceea, inducția produsă de solenația indusului în întrefier V_a depinde nu numai de valoarea acesteia, ci și de poziția maximului ei în raport cu cele două axe, longitudinală și transversală. Fluxul resultant în întrefier Φ_δ nu mai poate fi dedus din solenația resultantă V_δ , calculată ca suma geometrică a solenațiilor de excitație V_{ex} și a indusului V_a ca la mașina cu poli înecați:

$$\underline{V}_\delta = \underline{V}_{ex} + \underline{V}_a , \quad (6.3)$$

ca la mașina cu poli înecați.

Se notează cu Ψ unghiul de defazaj dintre fazorul tensiunii electromotoare E_o indusă în înfășurarea statorului de fluxul de excitație Φ_{ex} și curentul din înfășurarea statorului I.

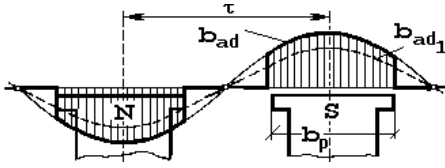


Fig. 6.17. Variația inducției în cazul sarcinii reactive la mașina cu poli aparenti.

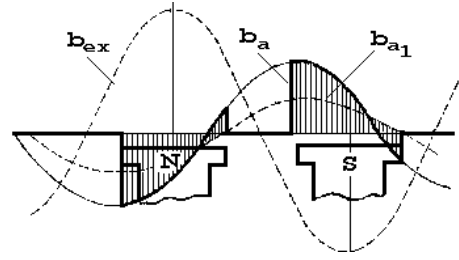


Fig. 6.18. Variația inducției în cazul sarcinii mixte la mașina cu poli aparenti.

În situația în care întrefierul este neuniform, distribuția inducției în întrefier este marcată prin suprafața hașurată. S-a considerat că întrefierul sub poli este foarte mic, în timp ce în spațiul interpolar reluctanța magnetică este infinită și inducția se anulează. În figurile 6.17 și 6.18 sunt reprezentate graficele pentru variația inducției în întrefier în cazul reacției indusului la mașina cu poli aparenti pentru o sarcină pur reactivă și una mixtă, activ-inductivă.

Prima armonică a curbei inducției b_{a1} are amplitudinea relativ mică în cazul sarcinii active și mai mare în cazul sarcinii reactive.

Pentru evitarea dificultăților legate de variația reluctanței întrefierului la diversele valori ale unghiului Ψ , la studiul funcționării mașinii sincrone se folosește metoda celor două reacții, imaginată de Blondel. Solenația indusului V_a se descompune în componentele sale, pe cele două direcții:

- longitudinală:

$$\underline{V}_{ad} = V_a \sin \psi , \quad (6.4)$$

- și transversală:

$$\underline{V}_{aq} = V_a \cos \psi , \quad (6.5)$$

fiecare producând respectiv fluxurile de reacție a indusului Φ_{ad} și Φ_{aq} care induc în fazele înfășurării statorice tensiunile electromotoare:

$$\underline{E}_{ad} = -j X_{ad} \underline{I}_d ; \quad (6.6)$$

$$\underline{E}_{aq} = -j X_{aq} \underline{I}_q . \quad (6.7)$$

În relațiile (6.6) și (6.7), X_{ad} și X_{aq} sunt reactanțele corespunzătoare celor două fluxuri de dispersie care se găsesc ca mărime în inegalitatea:

$$X_{ad} > X_{aq} , \quad (6.8)$$

datorată faptului că întrefierul este minim în dreptul pieselor polare și maxim în dreptul spațiului interpolar. În această situație se păstrează și inegalitatea:

$$\underline{E}_{ad} > \underline{E}_{aq} . \quad (6.9)$$

În situația în care reacția indusului se manifestă pe direcția longitudinală, amplitudinea fundamentalei curbei inducției se calculează astfel:

$$B_{ad1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B \cos \alpha \, d\alpha . \quad (6.10)$$

În acest caz, inducția produsă de reacția indusului are distribuție sinusoidală:

$$B = B_{ad} \cos \alpha , \quad (6.11)$$

pentru α cuprins între $-\alpha_p\pi/2$ și $+\alpha_p\pi/2$. Cu α_p s-a notat raportul dintre lățimea piesei polare și pasul polar:

$$\alpha_p = \frac{b_p}{\tau} . \quad (6.12)$$

B_{ad} reprezintă amplitudinea inducției reacției longitudinale a indusului:

$$B_{ad} = \frac{\mu_0}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} V_{ad} = \frac{\mu_0}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \cdot V_a \sin \psi , \quad (6.13)$$

iar V_a este tensiunea magnetică de reacție a indusului:

$$V_a = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_l \cdot K_{w1}}{p} \cdot I . \quad (6.14)$$

Valoarea armonicii fundamentale a inducției de reacție longitudinală se calculează cu relația:

$$B_{ad1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\alpha_p \pi}{2}}^{+\frac{\alpha_p \pi}{2}} B_{ad} \cos^2 \alpha \, d\alpha = \frac{B_{ad}}{\pi} \int_{-\frac{\alpha_p \pi}{2}}^{+\frac{\alpha_p \pi}{2}} (1 + \cos 2\alpha) d\alpha = \frac{B_{ad}}{\pi} (\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \pi), \quad (6.15)$$

încât se poate defini coeficientul de reducere a amplitudinii fundamentalei fluxului de reacție a indusului, la mașina cu poli aparenti, față de mașina cu întrefier uniform:

$$K_d = \frac{B_{ad1}}{B_{ad}} = \frac{\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \pi}{\pi}, \quad (6.16)$$

iar reactanța longitudinală de reacție a indusului, conform subcapitolului 4.3, se determină cu relația:

$$X_{ad} = K_d \cdot X_a = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\mu_o \cdot D \cdot l}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \left(\frac{W_l K_{w1}}{p} \right)^2 \omega_l \cdot K_d. \quad (6.17)$$

Dacă reacția indusului este transversală, printr-un raționament similar se constată că inducția variază în raport cu axa longitudinală după o lege sinusoidală:

$$B = B_{aq} \sin \alpha, \quad (6.18)$$

în care:

$$B_{aq} = \frac{\mu_o}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \cdot V_{aq} = \frac{\mu_o}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \cdot V_a \cos \psi, \quad (6.19)$$

este amplitudinea inducției reacției transversale a indusului.

În timp ce la reacția longitudinală din dezvoltarea în serie Fourier a curbei inducției lipsesc termenii în sinus, la reacția transversală lipsesc termenii în cosinus, iar fundamentală se calculează astfel:

$$B_{aq1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B \sin \alpha \, d\alpha = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\alpha_p \pi}{2}}^{+\frac{\alpha_p \pi}{2}} B_{aq} \sin^2 \alpha \, d\alpha = B_{aq} \cdot K_q. \quad (6.20)$$

Ca și în cazul anterior, se definește un coeficient subunitar care indică cu cât este mai mică amplitudinea fundamentalei față de unda rezultantă a reacției indusului pe axa transversală:

$$K_q = \frac{B_{aq1}}{B_{aq}} = \frac{\alpha_p \pi - \sin \alpha_p \pi}{\pi}. \quad (6.21)$$

Reactanța datorată reacției indusului pe direcția transversală:

$$X_{aq} = K_q \cdot X_a = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\mu_o \cdot D \cdot l}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \left(\frac{W_l K_{w1}}{p} \right)^2 \omega_l \cdot K_q. \quad (6.22)$$

La mașina cu poli aparenti, curba inducției în întrefierul mașinii, creată de înfășurarea de excitație are o repartiție dreptunghiulară în dreptul polilor și este nulă în spațiul interpolar (Fig. 6.19).

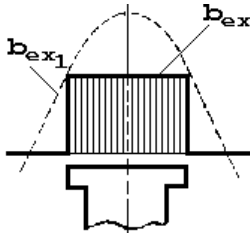


Fig. 6.19. Variația inducției b_{ex} .

Rezultă amplitudinea primei armonici a inducției:

$$B_{ex1} = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\alpha_p \pi}{2}}^{+\frac{\alpha_p \pi}{2}} B_{ex} \cos \alpha \, d\alpha = \frac{4B_{ex}}{\pi} \sin \frac{\alpha_p \pi}{2}. \quad (6.23)$$

Se calculează raportul dintre prima armonică și inducția corespunzătoare înfășurării de excitație în întrefier cu relația:

$$K_e = \frac{B_{ex1}}{B_{ex}} = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\alpha_p \pi}{2}. \quad (6.24)$$

Fundamentală solenației de excitație, echivalentă cu solenația de reacție a indusului pe axa longitudinală se calculează din considerația ca efectele lor să fie aceleași:

$$\frac{\mu_o}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \cdot V_{exd} \cdot K_e = \frac{\mu_o}{\delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu} \cdot V_{ad} \cdot K_d; \quad (6.25)$$

$$V_{exd} = K_{ad} \cdot V_{ad} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_l \cdot K_{w1}}{p} K_{ad} \cdot I_d. \quad (6.26)$$

Curentul de excitație, necesar pentru compensarea efectului reacției longitudinale are expresia:

$$I_{exd} = \frac{V_{axd}}{W_{ex}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_1 \cdot K_{w1}}{p W_{ex}} K_{ad} \cdot I_d, \quad (6.27)$$

în care s-a notat cu W_{ex} numărul de spire dintr-o bobină dispusă pe un pol și cu K_{ad} raportul:

$$K_{ad} = \frac{K_d}{K_e} = \frac{\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \cdot \pi}{4 \sin \frac{\alpha_p \cdot \pi}{2}}. \quad (6.28)$$

Analog se definește un coeficient și pentru axa transversală:

$$K_{aq} = \frac{K_q}{K_e} = \frac{\alpha_p \pi - \sin \alpha_p \cdot \pi}{4 \sin \frac{\alpha_p \cdot \pi}{2}}. \quad (6.29)$$

În calculul coeficienților s-a considerat întrefierul uniform și foarte mic în raport cu spațiul interpolar. În realitate întrefierul se mărește spre marginile piesei polare pentru a obține o repartiție a inducției cât mai apropiată de o sinusoidă.

Reacția indusului în cazul mașinii sincrone monofazate se manifestă diferit de reacția indusului la mașina trifazată. Regimul monofazat poate apare la întreruperea unei faze a mașinii trifazate sau în cazul unui scurtcircuit monofazat. Câmpul alternativ creat de înfășurarea statorică se descompune într-un câmp direc și unul invers. Câmpul direct se comportă față de câmpul de excitație ca în cazul mașinii trifazate. În schimb, câmpul invers are față de rotor o viteză egală cu dublul vitezei de sincronism și va induce în rotor o tensiune electromotoare de frecvență dublă. Curenții care se stabilesc în piesele polare masive și în înfășurarea de excitație produc pierderi suplimentare, dar pe baza legii lui Lenz micșorează amplitudinea câmpului invers. Efectul de amortizare este mai puternic la mașinile sincrone cu poli înecați datorită faptului că rotoarele sunt masive și mai redus la mașinile cu poli aparenti.

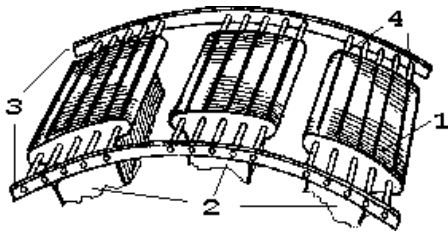


Fig. 6.20. Înfășurarea de amortizare.

Pentru a elimina neajunsurile cauzate de prezența câmpului invers, mașinile cu poli aparenti se prevăd cu *înfășurări de amortizare* (Fig. 6.20). Înfășurările de amortizare sunt realizate din bare de bronz 4 introduse în creștături de formă circulară practicate în piesele polare 1. Barele sunt scurtcircuitate cu două inele de scurtcircuitare 3. Sunt situații în care scurtcircuitarea se face prin segmente inelare pentru a face posibilă demontarea cu ușurință a polilor inductori 2. Colivia de amortizare, pe lângă efectul de anihilare a câmpului invers, mai servește la pornirea motorului sincron în asincron și pentru reducerea unor oscilații pendulare ale vitezei rotorului în jurul vitezei de sincronism. Colivia este eficientă dacă pentru fiecare pol barele reprezintă aproximativ 15% din secțiunea totală a înfășurării ce revine unui pas polar.

6.5. ECUAȚIILE TENSIUNILOR LA GENERATORUL SINCRON ȘI DIAGrame FAZORIALE

Ecuatiile de tensiuni la mașina sincronă sunt influențate de varianta constructivă adoptată la rotor.

La mașina cu poli înecați, întrefierul fiind uniform, mașina se comportă la fel pe cele două direcții, încât forma ecuațiilor este mai simplă ca la mașina cu poli aparenti.

Se consideră o mașină sincronă cu poli înecați funcționând în regim de generator și se notează cu R rezistența fiecărui circuit de fază. Se aplică teorema a doua a lui Kirchhoff unui circuit de fază:

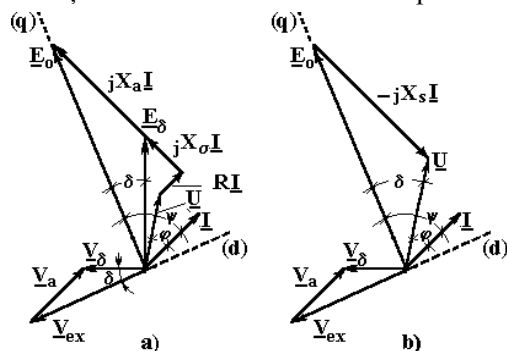


Fig. 6.21. Diagrama fazorială la mașina cu poli înecați.

$$\Sigma e = Ri + u, \quad (6.30)$$

în care u este valoarea instantanee a tensiunii la bornele mașinii sincrone.

Fluxul de dispersie și fluxul datorat reacției indusului induc în înfășurarea mașinii tensiunile electromotoare:

$$e_\sigma = -\frac{d\psi_\sigma}{dt}; \quad e_a = -\frac{d\psi_a}{dt},$$

iar fluxul inductor induce tensiunea electromotoare e_0 , încât relația (6.30) ia forma:

$$e_0 + e_\sigma + e_a = Ri + u, \quad (6.31)$$

și se scrie în complex simplificat:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX_\sigma \underline{I} + jX_a \underline{I}. \quad (6.32)$$

În figura 6.21 -a) s-a construit diagrama fazorială completă de tensiuni, considerându-se că generatorul are o sarcină activ-inductivă. Solenația creată de înfășurarea de excitație se reprezintă printr-un fazor a cărui direcție se află pe axa longitudinală (d). La acest fazor se adaugă solenația de reacție a indusului V_a și se obține solenația rezultantă în întrefier V_δ . La tensiunea la borne se adună căderea de tensiune pe rezistență și căderile de tensiune datorate reactanței de dispersie și reactanței de reacție a indusului și se obține tensiunea electromotoare indusă de fluxul inductor; direcția ei coincide cu axa transversală. Dacă se neglijează rezistența înfășurării și se introduce notația:

$$X_s = X_\sigma + X_a, \quad (6.33)$$

se poate construi diagrama fazorială simplificată (Fig. 6.21 -b). Reactanța definită prin relația (6.33) se numește *reactanță sincronă*.

În diagrama fazorială se deosebesc trei unghiuri caracteristice:

φ - unghiul de defazaj dintre curentul de sarcină și tensiunea la borne;

ψ - unghiul de defazaj dintre curentul de sarcină și tensiunea electromotoare;

δ - unghiul intern dintre axa câmpului rezultat în întrefier și axa polilor inductor și se regăsește în diagrama simplificată ca unghiul dintre tensiunea la borne și tensiunea motoare indusă.

După același procedeu se scrie ecuația de tensiuni și la mașina cu poli aparenti, cu precizarea că intensitatea curentului se descompune pe cele două direcții semnificative, axa longitudinală și axa transversală:

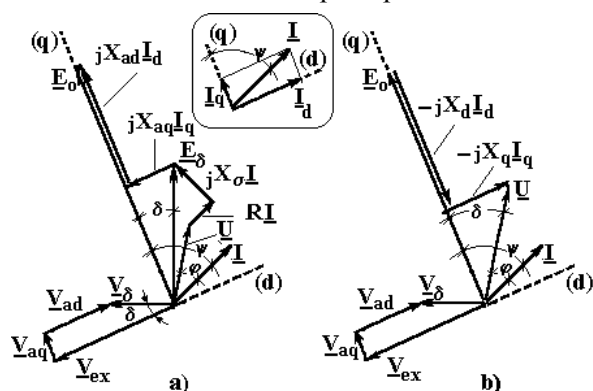


Fig. 6.22. Diagrama fazorială la mașina cu poli aparenti.

$$I_q = I \cos \psi; \quad I_d = I \sin \psi. \quad (6.34)$$

Ecuația de tensiuni în mărimi instantanee, la mașina cu poli aparenti are forma:

$$e_0 + e_\sigma + e_{aq} + e_{ad} = u + Ri, \quad (6.35)$$

iar în complex simplificat devine:

$$\underline{E}_0 + \underline{E}_\sigma + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_{ad} = \underline{U} + R\underline{I}, \quad (6.36)$$

și folosind relațiile (6.6) și (6.7), se obține tensiunea electromotoare de mers în gol:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX_\sigma \underline{I} + jX_{aq} \underline{I}_q + jX_{ad} \underline{I}_d, \quad (6.37)$$

căreia îi corespunde diagrama fazorială (Fig. 6.22 -a) pentru o sarcină activ-inductivă.

Se definesc *reactanțele sincrone pe axa transversală și longitudinală*:

$$\begin{aligned} X_{aq} + X_\sigma &= X_q; \\ X_{ad} + X_\sigma &= X_d, \end{aligned} \quad (6.38)$$

și se construiește diagrama fazorială simplificată (Fig. 6.22 -b). Acest lucru a fost posibil prin descompunerea căderii de tensiune cauzată de reactanța de dispersie pe cele două direcții și prin neglijarea rezistenței înfășurării.

6.6. PUTEREA ELECTROMAGNETICĂ A MAȘINII SINCRONE

Dacă se consideră o mașină sincronă conectată la o rețea de putere infinită (rețeaua la care tensiunea și frecvența sunt mărimi constante), se poate exprima cu ușurință puterea aparentă, puterea activă și reactivă, ce se vehiculează între rețea și mașină, funcție de principalii parametri ai mașinii.

Din diagrama fazorială simplificată (Fig. 6.22 -b), se deduc valorile componentelor curentului pe axa transversală:

$$I_q = \frac{U \sin \delta}{X_q}, \quad (6.39)$$

și longitudinală:

$$I_d = \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d}. \quad (6.40)$$

Se folosesc mărimile complexe pentru tensiunea la borne:

$$\underline{U} = U \cos \delta + jU \sin \delta, \quad (6.41)$$

și curentul de sarcină:

$$\underline{I} = I_q + jI_d. \quad (6.42)$$

Puterea aparentă complexă se calculează cu relația:

$$\underline{S} = m \underline{U} \underline{I}^*, \quad (6.43)$$

unde $\underline{I}^*$ este fazorul conjugat al curentului și m este numărul de faze al mașinii. Puterea aparentă complexă se calculează din relația (6.43), înlocuind tensiunea, curentul complex conjugat, componeta transversală și longitudinală a curentului, iar apoi se separă partea reală de partea imaginară:

$$\underline{S} = P - jQ = m (UI_q \cos \delta + UI_d \sin \delta) - j m (UI_d \cos \delta - UI_q \sin \delta). \quad (6.44)$$

Puterea activă are expresia:

$$P = \text{Re}(\underline{S}) = \frac{mUE_0}{X_d} \sin \delta \mp \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta,$$

(6.45)

iar puterea reactivă se deduce din partea imaginară a puterii aparente utilizând relațiile trigonometrice cunoscute:

$$\cos^2 \delta = \frac{1 + \cos 2\delta}{2}; \quad \sin^2 \delta = \frac{1 - \cos 2\delta}{2}, \quad (6.46)$$

în final fiind pusă sub forma:

$$Q = \frac{mUE_0}{X_d} \cos \delta - \frac{mU^2}{2} \left[\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} - \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta \right]. \quad (6.47)$$

Pentru mașina cu poli înecați reactanțele sincrone pe cele două direcții sunt egale:

$$X_d = X_q = X_s, \quad (6.48)$$

și puterea electromagnetică capătă o formă mult mai simplă:

$$P = \frac{mUE_0}{X_s} \sin \delta. \quad (6.49)$$

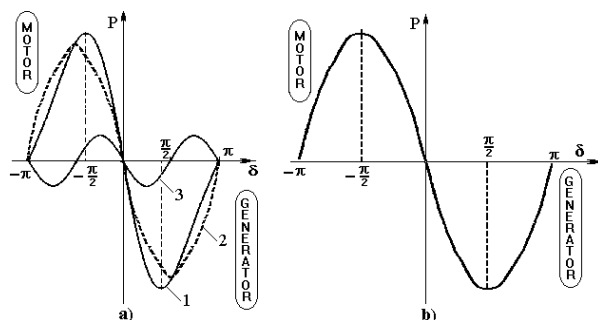


Fig. 6.23. Dependenta puterii electromagnetice functie de unghiul intern.

În figura 6.23 -b) s-a reprezentat puterea electromagnetică la mașina sincronă cu poli înecați conform relației (6.49), din care se observă că legea de variație este sinusoidală și prezintă un maxim la 90° electrice:

$$P_{\max} = \frac{mUE_0}{X_s}. \quad (6.50)$$

Prin același procedeu se determină și puterea reactivă (Fig. 6.24):

$$Q = \frac{mU}{X_s} (E_0 \cos \delta - U). \quad (6.51)$$

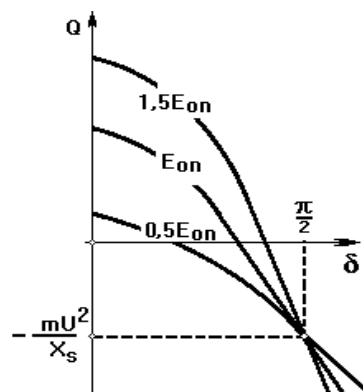


Fig. 6.24. Variația puterii reactive la mașina cu poli înecați $Q = f(\delta)$.

6.7. REGIMURILE DE FUNCȚIONARE ALE GENERATOARELOR SINCRONE

În situația în care un generator sincron este conectat la o rețea la care sunt cuplate și alte generatoare, se spune că generatorul respectiv funcționează *în paralel* cu celelalte. Dacă rețeaua la care sunt cuplate generatoarele sincrone își menține tensiunea și frecvența constantă la variația sarcinii atunci rețeaua se consideră de mare putere (se utilizează și termenul *rețea de putere infinită*).

Un al doilea regim de funcționare al generatorului sincron este *regimul autonom* în care generatorul sincron furnizează energia receptoarelor printr-o rețea proprie la care nu mai sunt conectate și alte generatoare.

6.7.1 FUNCȚIONAREA GENERATORULUI SINCRON CUPLAT LA O REȚEA DE MARE PUTERE

Un sistem energetic este alimentat de la mai multe centrale electrice la care diferă forma de obținere a energiei electrice (hidrocentrale, termocentrale, centrale nucleare). Sistemele neconvenționale de conversie a energiei mareelor, eoliene, solare în energie electrică nu pot fi incluse, de obicei, în sistemele energetice.

Fiecare centrală electrică, indiferent de modalitatea conversiei unei forme de energie, este utilată, de regulă, cu mai multe generatoare sincrone care debitează simultan pe o rețea dată, asimilată cu un generator sincron. În această situație, se pune problema cuplării și funcționării în paralel a două generatoare.

Condițiile de cuplare în paralel a două generatoare sincrone sunt impuse de respectarea următoarelor condiții:

- egalitatea tensiunilor;
- egalitatea frecvențelor;

- coincidența ordinii de succesiune a fazelor;
- existența condiției ca tensiunile celor două surse în momentul cuplării în paralel să fie în fază.

Se consideră că tensiunile celor două generatoare sincrone au același mod de variație în timp, de preferință de formă sinusoidală.

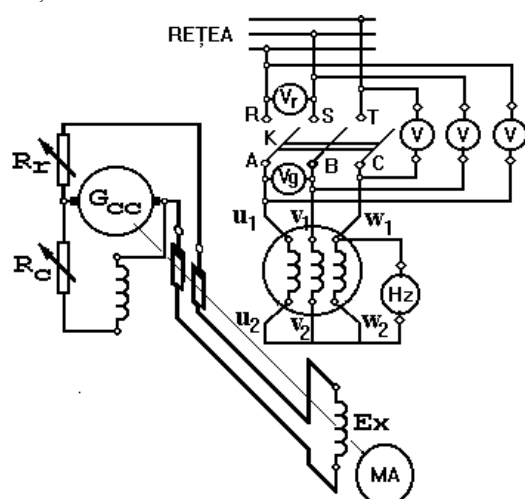


Fig. 6.25. Schema de cuplare în paralel cu rețeaua a generatorului sincron.

Tensiunile care se aplică la bornele întrerupătorului K de la rețea și de la generator, în situația în care se respectă ordinea de succesiune a fazelor, au expresiile:

$$\begin{aligned} u_R &= U_m \sin \omega_R t; & u_A &= U_m \sin (\omega_G t - \gamma); \\ u_S &= U_m \sin \left(\omega_R t - \frac{2\pi}{3} \right); & u_B &= U_m \sin \left(\omega_G t - \frac{2\pi}{3} - \gamma \right); \\ u_T &= U_m \sin \left(\omega_R t - \frac{4\pi}{3} \right); & u_C &= U_m \sin \left(\omega_G t - \frac{4\pi}{3} - \gamma \right), \end{aligned} \quad (6.52)$$

iar variația de tensiune la bornele întrerupătorului K pe cele trei faze este:

$$\begin{aligned} \Delta u_{RA} &= u_R - u_A = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} \right); \\ \Delta u_{SB} &= u_S - u_B = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} \right); \\ \Delta u_{TC} &= u_T - u_C = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} \right). \end{aligned} \quad (6.53)$$

Forma grafică a variației de tensiune la bornele întrerupătorului K pe cele trei faze este indicată în figura 6.26 (s-a considerat cazul în care $\gamma = 0$).

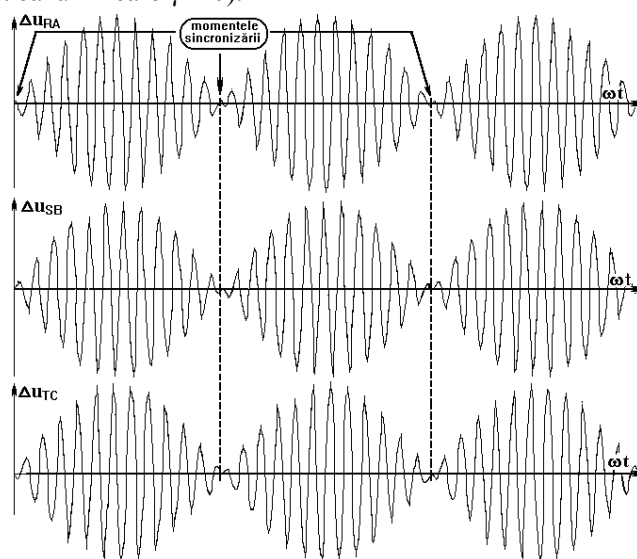


Fig. 6.26. Variația de tensiune la bornele întrerupătorului K pe cele trei faze.

Operațiunea de cuplare în paralel a celor două generatoare cu respectarea tuturor condițiilor enumerate se numește *sincronizare precisă*.

Timpul de realizare a tuturor condițiilor este relativ mare și în caz de avarie, sincronizarea precisă nu mai poate fi oportună. În această situație, dacă sistemul energetic este puternic, se utilizează *autosincronizarea* care nu necesită îndeplinirea tuturor condițiilor de punere în paralel.

În figura 6.25 se prezintă schema de cuplare în paralel cu rețeaua a unui generator sincron de construcție normală (cu excitația pe rotor). Rotorul este antrenat de o mașină primară de antrenare MA care poate fi turbină hidraulică, turbină cu abur sau gaz, motor Diesel sau motor electric. Pe același arbore se găsește cuplat indusul unui generator de curent continuu care asigură excitația generatorului sincron.

Verificarea egalității dintre tensiunea rețelei și tensiunea la bornele generatorului se face cu ajutorul voltmetrelor V_r și V_g , montate între două faze.

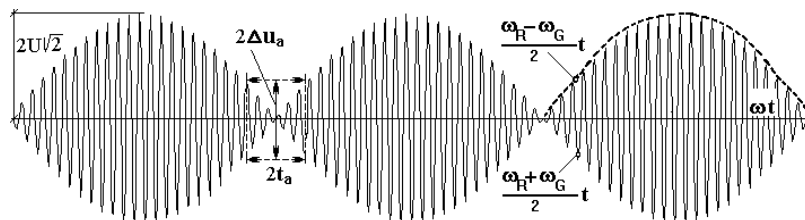


Fig. 6.27. Tensiunea la bornele intrerupătorului k, modulată în amplitudine.

Cele trei voltmetre vor măsura tensiuni de forma indicată în figura 6.27, care provin din modularea în amplitudine cu o pulsație egală cu semidiferența pulsațiilor tensiunii de la rețea și de la generator. Pulsația tensiunii rezultante este egală cu semisuma celor două pulsații.

Voltmetrele conectate între perechile de borne omologe trebuie să aibă scala de valoare mai mare decât valoarea efectivă dublă ($2U$) a tensiunii de fază a rețelei. Dacă tensiunile de la rețea și generator sunt egale și de frecvențe foarte apropiate în cazul în care se respectă aceeași ordine de succesiune a fazelor, cele trei voltmetre V vor oscila la fel, încât la trecerea simultană prin zero a celor trei voltmetre se închide întrerupătorul K , realizându-se cuplarea în paralel cu rețeaua a generatorului sincron.

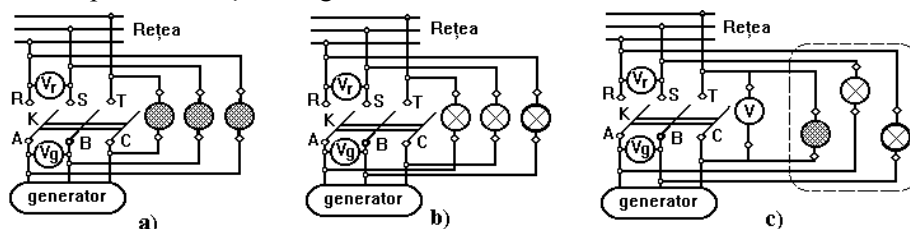


Fig. 6.28. Modalități de conectarea becurilor la cuplarea generatorului sincron în paralel cu rețeaua.

Identificarea momentului de sinfază a tensiunilor de la bornele generatorului cu cele ale rețelei, precum și a succesiunii fazelor se poate face și cu ajutorul becurilor electrice. Dacă becurile sunt conectate la fel cu voltmetrele V din figura 6.25, atunci cuplarea în paralel se poate face când toate cele trei becuri sunt stinse conform figurii 6.28 -a), operația numindu-se și *metoda becurilor stinse*. Becurile conectate după metoda indicată în figura 6.28 -a), se aprind și se sting simultan cu frecvența corespunzătoare pulsației unei modulatori ($(\omega_R - \omega_G)/2$). Deoarece iluminarea becurilor dispăre când tensiunea aplicată becurilor nu este nulă, se folosește *metoda becurilor aprinse* (Fig. 6.28 -b).

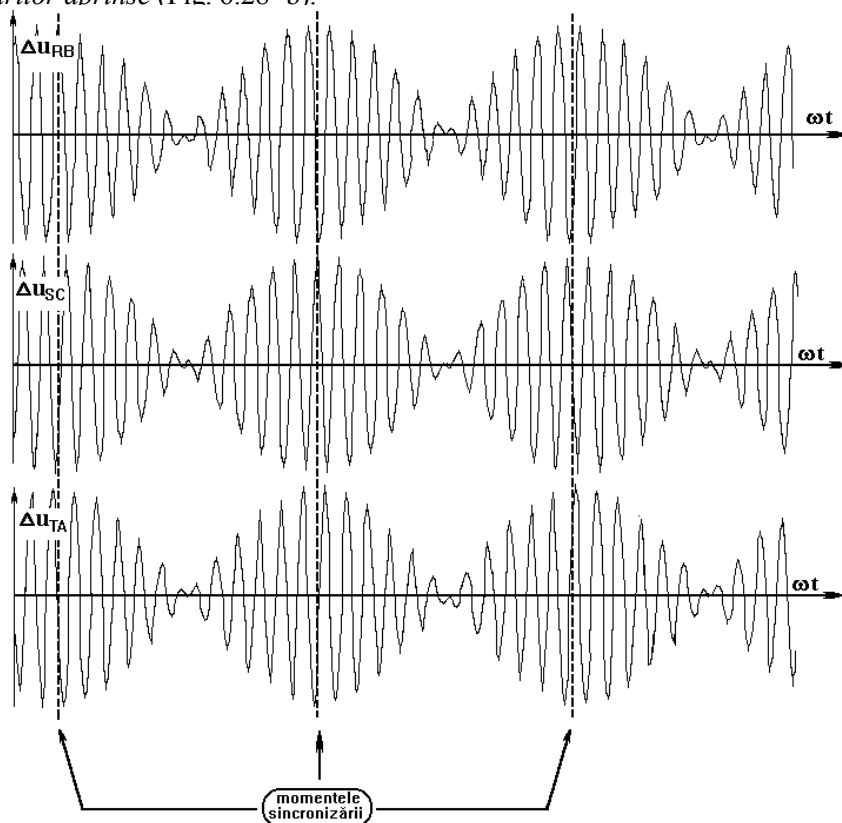


Fig. 6.29. Variația de tensiune la bornele becurilor conectate între faze.

În acest caz tensiunile aplicate becurilor variază conform relației (6.54), iar momentele când este posibilă sincronizarea sunt marcate în figura 6.29, aceste momente corespunzând iluminării maxime simultane pentru cele trei becuri.

$$\begin{aligned}\Delta u_{RB} &= u_R - u_B = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{3} \right); \\ \Delta u_{SC} &= u_S - u_C = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \pi \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{3} \right); \\ \Delta u_{TA} &= u_T - u_A = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{3} \right).\end{aligned}\quad (6.54)$$

Deoarece în practică este foarte dificilă realizarea sincronizării folosind metoda becurilor stinse (la trecerea prin zero a tensiunilor la bornele întrerupătorului) se admite o valoare admisibilă (Fig. 6.27) pentru variația de tensiune, definită prin relația:

$$\Delta u_a = 2 U_m \sin \frac{\omega_R - \omega_G}{2} t_a, \quad (6.55)$$

pentru care sincronizarea se face fără neplăceri. Din această relație, se poate determina timpul admis t_a dacă se ține cont de faptul că argumentul are valori mici:

$$t_a = \frac{\Delta u_a}{2 \pi U_m (f_R - f_G)}. \quad (6.56)$$

La baza realizării sincronoscoapelor (aparate folosite pentru verificarea îndeplinirii condițiilor de punere corectă în paralel) se folosește *metoda mixtă*, conform schemei din figura 6.28 -c, la care variațiile de tensiuni au expresiile:

$$\begin{aligned}\Delta u_{RB} &= u_R - u_B = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{3} \right); \\ \Delta u_{SA} &= u_S - u_A = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{3} \right); \\ \Delta u_{TC} &= u_T - u_C = 2 U_m \cos \left(\frac{\omega_R + \omega_G}{2} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \sin \left(\frac{\omega_R - \omega_G}{2} t + \frac{\gamma}{2} \right),\end{aligned}\quad (6.57)$$

iar momentele sincronizării sunt marcate în figura 6.30.

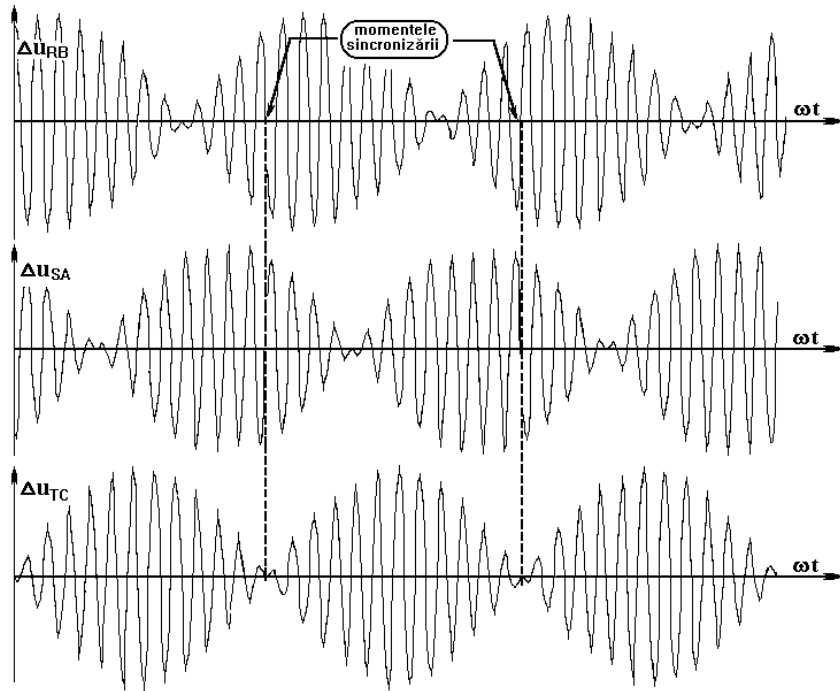


Fig. 6.30. Momentele sincronizării la metoda mixtă.

Tensiunile aplicate lămpilor vor fi, ca și în cazurile anterioare, sinusoidale cu frecvența apropiată de frecvența tensiunii de la rețea și modulate cu fază diferită cu pulsația $(\omega_R - \omega_G)/2$. Lămpile se vor stinge într-o anumită succesiune: dacă $\omega_R - \omega_G > 0$ lămpile se vor stinge într-o succesiune corespunzătoare sensului orar, iar în cazul în care $\omega_R - \omega_G < 0$, lămpile se vor stinge într-o succesiune corespunzătoare sensului antiorar. În cazul în care cele două pulsații sunt egale, lămpile vor avea intensitatea luminoasă constantă. Se pune în evidență imediat cum trebuie modificată viteza generatorului pentru ca să se obțină egalitatea celor două pulsații.

Inexistența defazajului se observă prin faptul că lampa alimentată între bornele T și C este stinsă, iar voltmetrul V montat în paralel cu lampa, conform schemei din figura 6.28 -c), indică valoarea zero. Momentele când este posibilă sincronizarea precisă folosind metoda mixtă sunt marcate în figura 6.30.

Prin metoda mixtă se determină imediat și situația în care nu s-a respectat condiția de succesiune a fazelor caz în care lămpile în loc să se stingă succesiv, se sting simultan.

Cele trei metode utilizate pentru sincronizarea precisă pot fi prezentate sugestiv prin reprezentarea fazorială a celor două sisteme trifazate de tensiuni (de la rețea și generator) precum și modul de conectare a lămpilor din care se vede clar situația în care lămpile sunt aprinse sau stinse (Fig. 6.31).

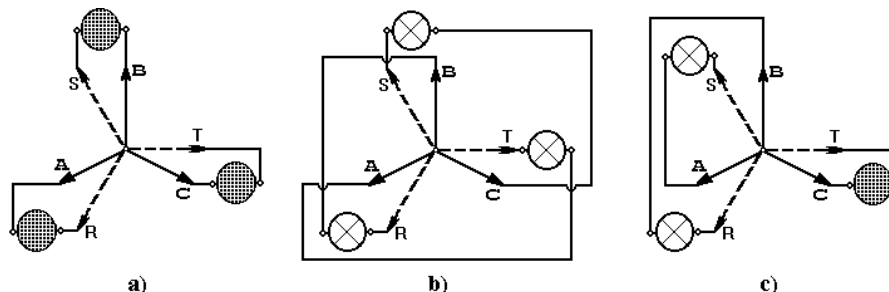


Fig. 6.31. Metodele de sincronizare precisă reprezentate prin diagrame fazoriale.

Sincronizarea precisă este admisă numai dacă $\Delta f = f_R - f_G$ nu depășește $0,2 \div 0,3$ Hz. Dacă se consideră că variația de tensiune admisibilă este de o zecime din valoarea maximă a tensiunii rețelei atunci rezultă conform relației (6.56), o valoare foarte mică pentru t_a de ordinul $0,05 \div 0,08$ secunde, fapt ce impune și utilizarea unor instalații automate la sincronizarea precisă pentru a înlătura eventualele greșeli ale operatorului ce execută cuplarea generatorului în paralel cu rețeaua. Deoarece timpul de acționare al întrerupătorului din momentul comandării cuplării depășește valoarea t_a este necesară introducerea unei perioade de anticipare care să țină cont de întârzierea în acționare a întrerupătorului.

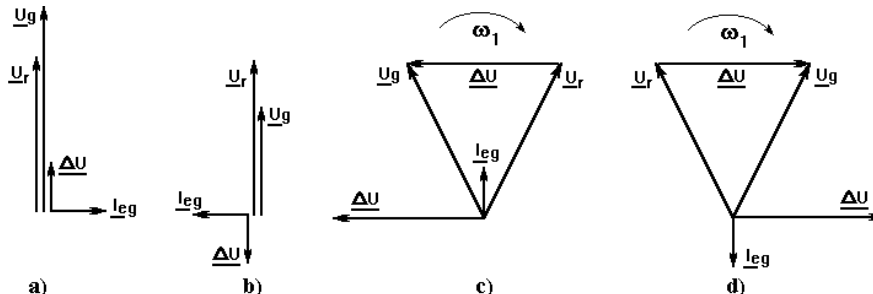


Fig. 6.32. Situații de sincronizare, când nu se respectă una din condițiile de cuplare în paralel, reprezentate prin diagrame fazoriale.

În situația în care nu este respectată condiția referitoare la egalitatea tensiunilor, atunci pot apare patru cazuri distincte (Fig. 6.32):

a) - dacă tensiunile sunt în fază, dar tensiunea la bornele generatorului este mai mare decât tensiunea rețelei, atunci curentul de egalizare, provocat de diferența de tensiune, se manifestă inductiv (efect demagnetizant al reacției indusului) pentru generator, conducând la scăderea tensiunii la bornele acestuia până când se egalează forțat tensiunile;

b) - dacă tensiunile sunt în fază, dar tensiunea la bornele generatorului este mai mică decât tensiunea rețelei, atunci curentul de egalizare, provocat de diferența de tensiune, se manifestă capacitiv (efect magnetizant al reacției indusului) pentru generator, conducând la creșterea tensiunii la bornele acestuia până când se egalează forțat tensiunile.

În cele două cazuri prezentate, între rețea și generator are loc numai o circulație de putere reactivă, fără șocuri mecanice asupra cuplajului dintre generator și mașina primară

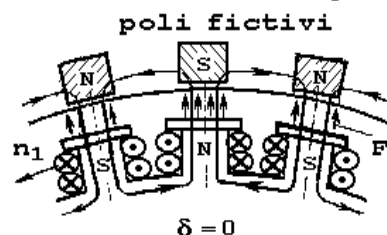


Fig. 6.33. Regimul de compensator sincron.

La funcționarea în gol, unghiul intern este nul (Fig. 6.33) și mașina poate funcționa în regim de *compensator sincron* dacă se mărește curentul de excitație la o valoare pentru care tensiunea electromotoare este mai mare ca tensiunea rețelei, furnizând în această situație putere reactivă în rețea (Fig. 6.32 -a). Acest regim de funcționare se întâlnește foarte des la marii consumatori industriali, prevăzuți cu sarcini inductive de mare putere, în scopul ameliorării factorului de putere, situație care nu mai poate fi rezolvată cu ajutorul bateriilor de condensatoare.

c) - în situația în care tensiunile de fază sunt egale dar nu sunt în o-

poziție, de fază, curentul de egalizare va avea și o componentă activă, care se manifestă prin prezența unui șoc mecanic la cuplajul dintre generator și mașina primară; dacă tensiunea generatorului este situată în urma tensiunii rețelei, față de sensul de rotație al fazorilor, atunci prezența componentei active a curentului de egalizare va da naștere unui cuplu motor de accelerare încât cele două tensiuni vor ajunge în fază (Fig. 6.32 -c);

d) - în situația în care tensiunile de fază sunt egale dar nu sunt în opoziție, tensiunea generatorului fiind situată în avans față de tensiunea rețelei, în raport cu sensul de rotație al fazorilor, atunci prezența componentei active a curentului de egalizare va da naștere unui cuplu generator de frânare, încât cele două tensiuni vor ajunge în fază (Fig. 6.32 -d).

Dacă decalajul între cele două tensiuni este de valoare apreciabilă, atunci asupra cuplajului mecanic se pot manifesta șocuri de putere care pun în pericol siguranța în funcționare a grupului mașină primară – generator sincron. Un asemenea caz poate fi întâlnit mai des la cuplarea în paralel când diferă frecvența tensiunii generatorului față de frecvența rețelei.

6.7.1.1. Caracteristicile unghiulare ale generatorului sincron

Caracteristica mecanică unghiulară indică modul de variație a cuplului electromagnetic funcție de unghiul intern δ . Deoarece viteza sincronă este constantă, caracteristica mecanică unghiulară se identifică la o anumită scară cu dependența puterii electromagnetice funcție de unghiul intern (Fig. 6.23). În timp ce la mașina sincronă cu poli aparenti, puterea maximă se obține la un unghi mai mic de 90° electrice, la mașina sincronă cu poli înecați, puterea maximă se obține chiar la valoarea de 90° electrice a unghiului intern. În figura 6.23 s-au indicat și regimurile de funcționare ale mașinii sincrone (*generator și motor*). În figura 6.34 este reprezentată poziția polilor reali față de polii fictivi pentru regimul de generator și motor (Fig. 6.34 -a, și b), la care unghiul intern este pozitiv sau negativ dacă se ia ca referință sensul de rotație și semnul cuplului electromagnetic (de frânare sau activ).

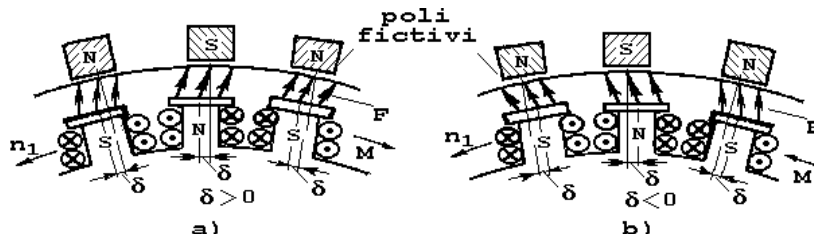


Fig. 6.34. Regimurile de funcționare ca generator și motor ale mașinii sincrone.

Din expresiile puterilor electromagnetice se deduc cu ușurință relațiile prin care se definesc cuplurile electromagnetice în cazul generatorului cu poli aparenti:

$$M = -\frac{mUE_0}{X_d \Omega_l} \sin \delta + \frac{mU^2}{2\Omega_l} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta, \quad (6.58)$$

și cu poli înecați:

$$M = -\frac{mUE_0}{\Omega_l X_s} \sin \delta. \quad (6.59)$$

Capacitatea de supraîncărcare a mașinii sincrone este dată de raportul dintre cuplul maxim și cuplul nominal:

$$k_s = \frac{M_{\max}}{M_N} = \frac{1}{\sin \delta_N}. \quad (6.60)$$

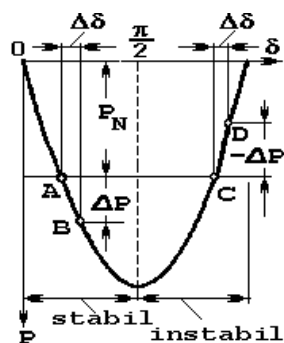


Fig. 6.35. Stabilitatea statică la mașina cu poli înecați.

În mod normal, mașina sincronă are capacitatea de supraîncărcare de 2...3, ceea ce corespunde unui unghi intern de $20^\circ \dots 30^\circ$.

O mașină sincronă funcționează mai stabil, cu cât este mai mare variația puterii electromagnetice la o variație mică a unghiului intern.

Comportarea mașinii sincrone la variații lente ale sarcinii este caracterizată de stabilitatea statică (Fig. 6.35).

Dacă la putere nominală punctul de funcționare se găsește în A și apare o creștere lentă a puterii electromagnetice, punctul se mută în B și se mărește unghiul intern în timp ce la funcționarea în punctul C, puterea electromagnetică scade și mașina iese din sincronism. Deci zona de funcționare stabilă se limitează numai pentru unghiuri cuprinse între 0 și 90° electrice.

La o creștere $\Delta\delta$ a unghiului intern, puterea electromagnetică devine $P(\delta + \Delta\delta)$; dacă se rețin din dezvoltarea în serie Taylor primii doi termeni rezultă:

$$P(\delta + \Delta\delta) = P(\delta) + \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta\delta, \quad (6.61)$$

și separând termenii se găsește relația de definiție a derivatei:

$$\frac{P(\delta + \Delta\delta) - P(\delta)}{\Delta\delta} = \frac{dP}{d\delta} = P_s, \quad (6.62)$$

denumită *putere sincronizantă*.

La mașina cu poli înecați, expresia puterii sincronizante are forma:

$$P_s = \frac{mU E_0}{X_s} \cos \delta, \quad (6.63)$$

și este reprezentată grafic în figura 6.36, curba 2. Se observă că puterea sincronizantă este maximă la funcționarea la gol a mașinii și este nulă la 90° electrice, valoarea ei crescând odată cu mărirea curentului de excitație.

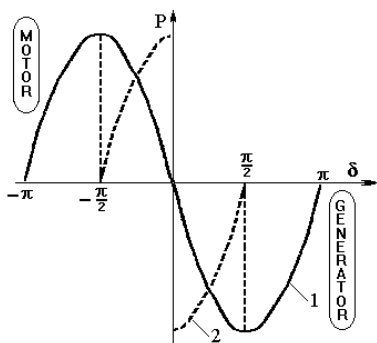


Fig. 6.36. Puterea sincronizantă la mașina cu poli înecați.

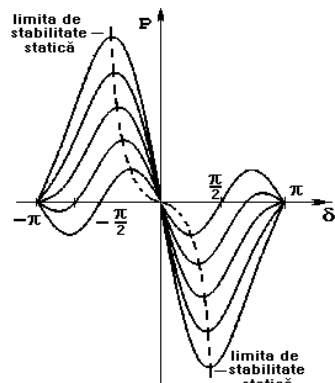


Fig. 6.37. Limita de stabilitate statică la o mașină cu poli aparenti.

În figura 6.37 este dat o familie de caracteristici obținute prin creșterea curentului de excitație și la care s-a marcat limita de stabilitate statică la o mașină cu poli aparenti.

La o mașină cu poli aparenti, puterea sincronizantă:

$$P_s = \frac{mUE_0}{X_d} \cos\delta + mU^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta, \quad (6.64)$$

este mai mare ca la mașina cu poli înecați, datorită termenului al doilea care reprezintă până la 25% din puterea principală.

6.7.1.2. Caracteristicile în "V" ale generatorului sincron

Caracteristicile în "V" ale generatorului sincron se obțin în situația în care generatorul sincron funcționează la putere activă constantă și curent de excitație variabil.

Pentru simplificare, se va considera generatorul cu poli înecați la care se neglijează pierderile prin efect electrocaloric în înfășurarea indusului, încât se poate folosi diagrama fazorială simplificată (figura 6.21 -b) obținută pentru cazul în care s-a neglijat rezistența înfășurării R.

Dacă se definește regimul de funcționare optim corespunzător factorului de putere unitar, atunci diagrama fazorială poate fi construită în trei cazuri: regim subexcitat, regim de excitație optimă și regim supraexcitat conform figurii 6.39.

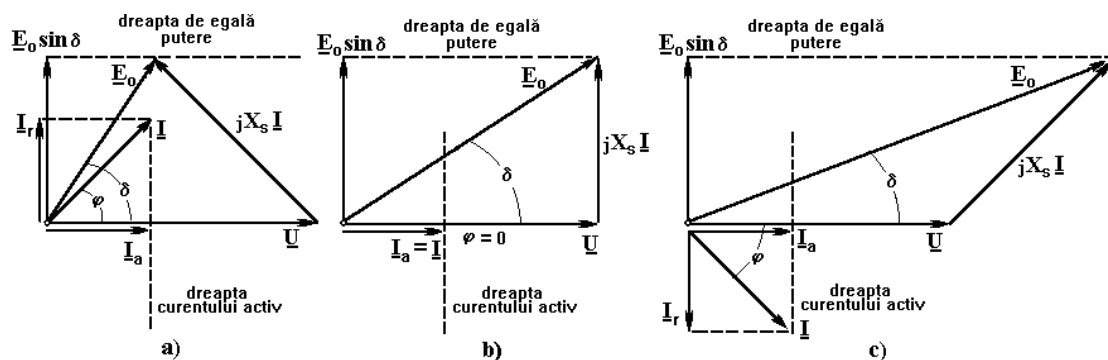


Fig. 6.39. Diagrammele fazoriale simplificate pentru trei regimuri de excitație: a) – subexcitat; b) – excitație optimă; c) - supraexcitat.

Din analiza expresiei puterii electromagnetice (relația 6.49) se deduce că această mărime rămâne constantă numai dacă produsul $E_0 \sin \delta$ (ce reprezintă proiecția fazorului E_0 pe ordonată) rămâne constant, iar vârful fazorului E_0 descrie, ca loc geometric, o dreaptă numită **dreaptă de egală putere**.

Utilizând cele trei diagrame fazoriale se pot construi cu ușurință caracteristicile în "V" ale generatorului sincron (Fig. 6.40-a).

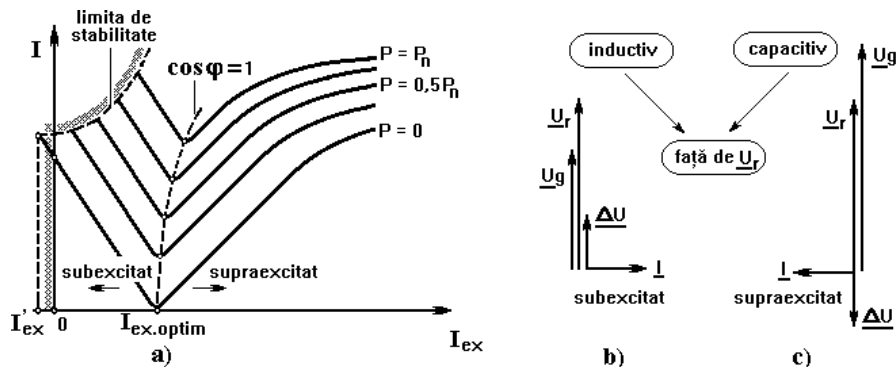


Fig. 6.40. Caracteristicile în "V" ale generatorului sincron.

Se consideră că generatorul sincron funcționează la putere activă constantă, conform relației:

$$P = m U I \cos \varphi = m U I_a = \text{const.} \quad (6.65)$$

În această situație, componenta activă a curentului de sarcină I se menține constantă, iar vârful fazorului I descrie, ca loc geometric, o dreaptă perpendiculară pe abscisă ce trece prin vârful lui I_a .

Pentru regimul de excitație optimă, generatorul funcționează cu factor de putere unitar astfel încât curentul debitat de generator către rețea conține numai componenta activă (Fig. 6.39 -b). Acest punct corespunde cu vârful caracteristicii în "V".

Dacă valoarea curentului de excitație devine mai mică decât curentul optim de excitație, atunci punctul de funcționare se stabilește pe ramura descendentă a caracteristicii în "V", curentul total crește deoarece apare o componentă reactivă care circulă dinspre rețea spre generator, acoperind deficitul de magnetizare. Reducerea curentului de excitație este posibilă până la o valoare pentru care se atinge limita de stabilitate când unghiul dintre E_0 și U ajunge la 90° electrice.

În cazul în care valoarea curentului de excitație devine mai mare decât curentul optim de excitație, atunci punctul de funcționare se stabilește pe ramura ascendentă a caracteristicii în "V", curentul total crește deoarece apare o componentă reactivă, care circulă dinspre generator spre rețea. De această dată generatorul se comportă ca o capacitate în raport cu rețeaua.

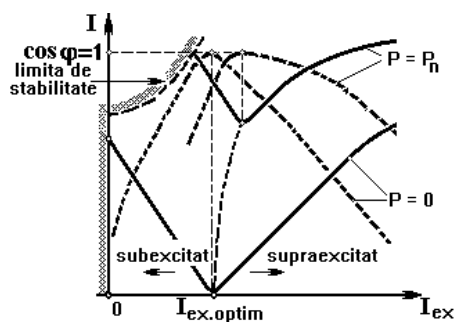


Fig. 6.41. Variația lui $\cos \varphi$ la trasarea curbelor în "V".

La funcționarea mașinii sincrone la gol ($P = 0$), curba în "V" s-a construit folosind diagramele fazoriale din figurile 6.40-b) și 6.40-c); componenta activă a curentului fiind nulă, curba se sprijină pe abscisă, iar ramura ascendentă a curbei corespunde regimului de compensator sincron.

Zona din cadranul II, corespunzătoare excitației negative, nu prezintă interes pentru funcționarea normală, iar valoarea I'_{ex} a curentului de excitație anulează cuplul reactiv (datorat diferenței de reactanțe pe cele două axe) și mașina iese din sincronism.

În figura 6.41 este reprezentată variația factorului de putere (cu linie întreruptă) în funcție de curentul de excitație în cazurile corespunzătoare caracteristicii în "V" la gol și la sarcină nominală.

Se deduce că reglarea puterii reactive la o mașină sincronă, cuplată în paralel cu rețeaua, se realizează prin modificarea curentului de excitație, în timp ce reglarea puterii active se face prin modificarea admisiei fluidului motor de la mașina primară de antrenare (abur, apă, motorină).

Pentru o anumită putere electromagnetică dată, puterea reactivă debitată este limitată de încălzirea înfășurării satorice sau a excitației.

6.7.2. FUNCȚIONAREA AUTONOMĂ A GENERATORULUI SINCRON

Generatorul sincron funcționează autonom dacă debitează puterea electrică produsă, unei impedențe de sarcină oarecare și nu este conectat la o rețea pe care debitează alte generatoare.

Asemenea cazuri se întâlnesc doar în instalațiile izolate: cabane, grupuri electrogene de rezervă, vehicule (autoturisme, vagoane de cale ferată, etc.).

Se presupune că generatorul sincron autonom este antrenat la viteza constantă de sincronism, adică frecvența tensiunii la borne nu se modifică.

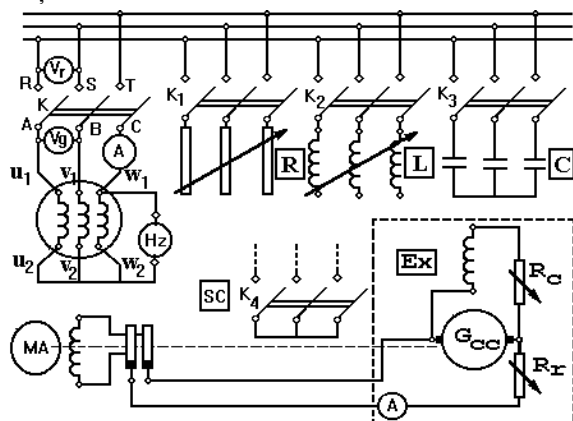


Fig. 6.42. Schema pentru trasarea caracteristicilor la generatorul sincron autonom.

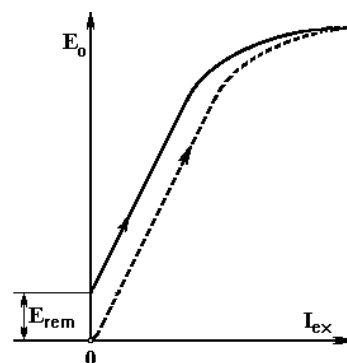


Fig. 6.43. Caracteristica de mers în gol.

Caracteristicile generatorului sincron autonom pot fi trasate cu ajutorul schemei prezentate în figura 6.42 și reprezintă relații exprimate grafic între diversele mărimi: tensiunea electromotoare E_0 la mersul în gol, tensiunea la bornele sarcinii U , curentul de sarcină I , curentul de excitație I_{ex} , considerându-se în mod obișnuit factorul de putere al sarcinii menținut constant.

Ca și în cazul generatoarelor de curent continuu, la generatoarele sincrone pot fi trasate: caracteristica de mers în gol, caracteristici externe, caracteristici de reglaj, caracteristici în sarcină și caracteristici de scurtcircuit.

Caracteristica de funcționare în gol se definește prin relația:

$$E_0 = f(I_{ex}); \quad n = n_1; \quad I = 0. \quad (6.66)$$

(Fig.6 43) și se ține cont de relația (4.101):

$$E_0 = 4,44 K_w W f \Phi. \quad (6.67)$$

Se știe că tensiunea electromotoare indusă de câmpul învârtitor de excitație este proporțională cu fluxul maxim care depinde de mărimea curentului de excitație. La o anumită scară, caracteristica de mers în gol este similară curbei de magnetizare. În situația în care polii nu prezintă un magnetism remanent, caracteristica de mers în gol pleacă din origine (curba cu linie întreruptă), iar în situația în care polii prezintă un magnetism remanent, în lipsa curentului de excitație, se obține o tensiune E_{rem} care reprezintă (5 – 10)% din tensiunea la borne corespunzătoare regimului nominal (curba cu linie plină).

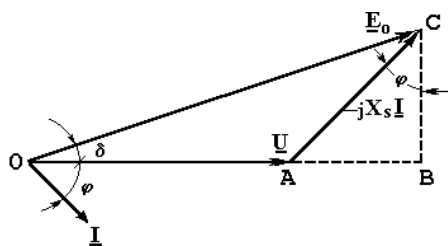


Fig. 6.44. Diagrama simplificată la mașina cu poli înecați.

Caracteristicile de funcționare ale generatorului sin- se deduc din ecuațiile și diagramele fazoriale aprofundate în capitolul 6.5. Se consideră diagrama fazorială simplificată, pentru mașina cu poli înecați dată în figura 6.44 în care se exprimă:

$$\begin{aligned} \overline{BC} &= E_0 \sin \delta = X_s I \cos \varphi; \\ \overline{OB} &= E_0 \cos \delta = X_s I \sin \varphi + U. \end{aligned} \quad (6.68)$$

Dacă se elimină unghiul δ , atunci se obține o relație:

$$E_0^2 = (U + X_s I \sin \varphi)^2 + (X_s I \cos \varphi)^2 = U^2 + 2 U X_s I \sin \varphi + (X_s I)^2, \quad (6.69)$$

care poate fi exprimată în unități relative, dacă se introduc notațiile:

$$u = \frac{U}{E_0}; \quad i = \frac{I}{I_g}; \quad I_{sc} = \frac{E_0}{X_s},$$

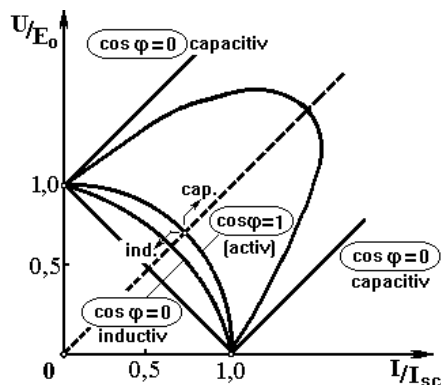


Fig. 6.45. Familia de caracteristici externe la generatorul sincron..

cron

(6.70)

și se împart toți termenii cu E_0^2 :

$$u^2 + i^2 + 2ui \sin \varphi = 1. \quad (6.71)$$

Relația (6.71) reprezintă, analitic, ecuația unei elipse prin care se pot exprima caracteristicile externe ale generatorului sincron.

Caracteristicile externe ale generatorului sincron (Fig. 6.45) se definesc prin relația:

$$U = f(I); \quad I_{ex} = \text{const.}; \quad \cos \varphi = \text{const.},$$

și pot fi obținute prin particularizarea relației (6.71).

Când $\sin \varphi = \text{const.}$, ecuația caracteristicii externe este o elipsă cu axele dispuse pe bisectoarele sistemului de coordonate (u, i) iar când $\sin \varphi = 0$, ecuația devine un cerc și corespunde sarcinii pur active. Dacă sarcina este pur reactivă, expresiile caracteristicilor externe devin drepte, conform relațiilor:

$$\varphi = +\frac{\pi}{2} \Rightarrow u + i = \pm 1 \text{ (caracter inductiv)};$$

$$\varphi = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow u - i = \pm 1 \text{ (caracter capacitiv)}.$$

În mod normal, caracteristicile externe se trasează pentru sarcini mixte (Fig. 6.46 -a) la sarcini crescătoare și (Fig. 6.46 -b) la sarcini descrescătoare.

Caracteristicile externe diferă ca alătură în funcție de natura sarcinii: la sarcină activă și activ-inductivă, odată cu creșterea sarcinii, tensiunea la borne U scade în raport cu tensiunea de mers în gol E_0 , datorită efectului distorsionant și respectiv demagnetizant al reacției indusului, în timp ce la o sarcină activ-capacitivă, odată cu creșterea sarcinii, tensiunea la borne U crește în raport cu tensiunea de mers în gol E_0 , datorită efectului magnetizant al reacției indusului.

Pentru definirea variației de tensiune la borne, se face diferența dintre E_0 (t.e.m. de mers în gol) și U_N (tensiunea la borne pentru mersul în sarcină nominală din figura 6.46-b):

$$\Delta u = E_0 - U_N, \quad (6.72)$$

sub un factor de putere dat la același curent de excitație și viteză de rotație n_1 .

Variația de tensiune se poate exprima și în unități relative, dacă expresia (6.72) se raportează la valoarea tensiunii nominale.

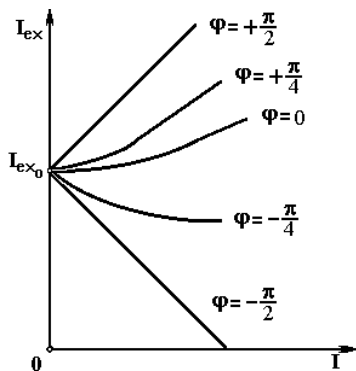


Fig. 6.47. Caracteristici de reglaj la generatorul sincron.

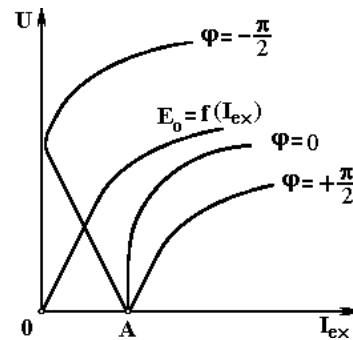


Fig. 6.48. Caracteristici interne la generatorul sincron.

Caracteristicile de reglaj (Fig. 6.47) sunt trasate în condițiile:

$$I_{ex} = f(I); \quad U_N = \text{const.}; \quad \cos \varphi = \text{const.},$$

și la care se poate constata influența reacției indusului în funcție de natura sarcinii ca și la caracteristicile externe.

Caracteristicile interne (Fig. 6.48) sunt trasate în condițiile:

$$U = f(I_{ex}); \quad I = \text{const.}; \quad \cos \varphi = \text{const.},$$

și servesc la determinarea reactanței Potier. La mașinile sincrone normale, la starea de saturație corespunzătoare tensiunii nominale la borne în sarcină inductivă, reactanța Potier $X_p = (1,3 \dots 1,5) X_\sigma$ la turbogeneratoare, iar pentru hidrogeneratoare de mare putere $X_p = (1,1 \dots 1,3) X_\sigma$.

Caracteristicile de scurtcircuit (Fig. 6.49) se definesc prin relația:

$$I_{sc} = f(I_{ex}); \quad U = 0; \quad n_1 = \text{const.}$$

Se constată că la același curent de excitație se obțin valori diferite ale curenților de scurtcircuit (la scurtcircuitul trifazat la borne curentul este mai mic decât în scurtcircuitul monofazat și respectiv bifazat), re-

acția demagnetizantă a indusului manifestându-se diferit. Caracteristicile de scurtcircuit au formă practic liniară în situația în care circuitul magnetic al mașinii sincrone nu se saturează pentru valori mai mari ale curentului de excitație.

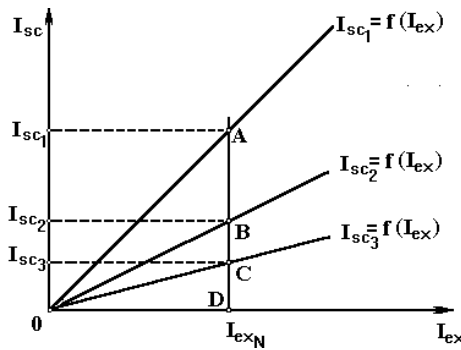


Fig. 6.49. Caracteristicile de scurtcircuit.

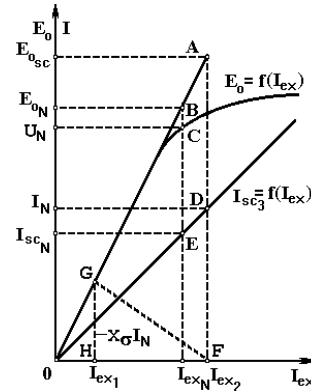
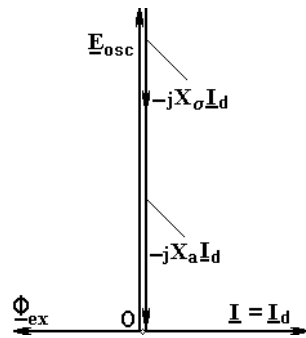


Fig. 6.50. Triunghiul de scurtcircuit.

În figura 6.50 se trasează triunghiul de scurtcircuit FGH cu ajutorul caracteristicii de mers în gol și a caracteristicii de scurtcircuit trifazat simetric. Dacă nu s-ar manifesta reacția indusului, atunci curentul nominal s-ar obține cu o tensiune electromotoare $GH = X_\sigma I_N$ corespunzătoare curentului de excitație I_{ex1} . La scurtcircuit se manifestă reacția longitudinală demagnetizantă, încât pentru obținerea curentului nominal este necesar un curent de excitație mai mare I_{ex2} . Curentul $\Delta I = I_{ex2} - I_{ex1}$, reprezintă, la scara curentului de excitație, măsura reacției longitudinale demagnetizante a indusului corespunzătoare curentului nominal. Triunghiul FGH se numește *triunghi de scurtcircuit* sau *triunghi Potier*.



Tot cu ajutorul caracteristicii de mers în gol și a caracteristicii de scurtcircuit trifazat simetric se poate determina *raportul de scurtcircuit RSC*, adică **raportul dintre curentul de scurtcircuit I_{scN} la curentul de excitație I_{exN} corespunzător tensiunii nominale U_N la mersul în gol și curentul nominal I_N** :

$$RSC = \frac{I_{scN}}{I_N} = \frac{I_{exN}}{I_{ex}} = \frac{E_{oN}}{E_{osc}} \quad (6.74)$$

Se poate defini valoarea nesaturată a reactanței longitudinale în mărimi reale și în unități relative prin relațiile:

$$X_d = \frac{E_{osc}}{I_N}; \quad x_d = \frac{X_d I_N}{U_N},$$

conform diagramei fazoriale alăturate (în cazul scurtcircuitului trifazat simetric).

Rezultă expresia raportului de scurtcircuit, care devine:

$$RSC = \frac{E_{oN}}{U_N x_d} = \frac{1}{x_d}, \quad (6.75)$$

în cazul în care se consideră mașina nesaturată, iar pentru curentul nominal de excitație, tensiunea electromotoare de mers în gol este egală cu tensiunea nominală. La turbogeneratoare $RSC = 0,5...0,7$ în timp ce la hidrogeneratoare $RSC = 1,0...1,4$ [17].

Generatoarele cu RSC mic sunt mai ieftine, datorită faptului că întrefierul este mai mic (reactanța sincronă longitudinală are valoare mai mare), necesitând o solenație de excitație mai redusă. În aceste condiții, rezultă un consum mai redus de cupru și o greutate mai mică a rotorului, în schimb generatoarele prezintă o variație mai mare a tensiunii la borne odată cu modificarea curentului de sarcină.

Raportul de scurtcircuit RSC constituie date de catalog pentru mașinile sincrone iar la mașinile cu poli înecați x_d se înlocuiește cu x_s .

6.8. MOTORUL SINCRON

Motoarele sincrone se preferă în acționări speciale, acolo unde intervin puteri de ordinul megawaților. Dezavantajul principal al motorului sincron constă în faptul că dezvoltă cuplul electromagnetic numai la viteza de sincronism și în plus prezintă o caracteristică mecanică absolut rigidă până când cuplul rezistent atinge valoarea maximă a cuplului electromagnetic și motorul iese din sincronism.

Dezvoltarea convertizoarelor de frecvență a eliminat problema dificilă a pornirii și reglării vitezei în limite largi reușind să se obțină caracteristici mecanice mai elastice. La comanda prin frecvență a motoarelor sincrone se folosesc două metode: *motorul autocomandat* sau mașina electrică cu comutație statică și *motorul cu comandă independentă*.

Se prezintă în continuare o schemă de principiu utilizată la acționări de mare putere (6,4 MW) utilizate la fabricile de ciment (Fig. 6.51).

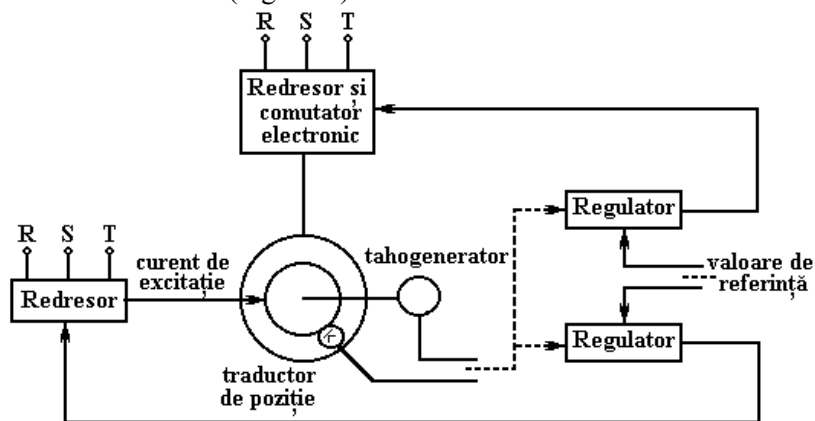


Fig. 6.51. Schema bloc a comenzii unui motor de 6,4 MW.

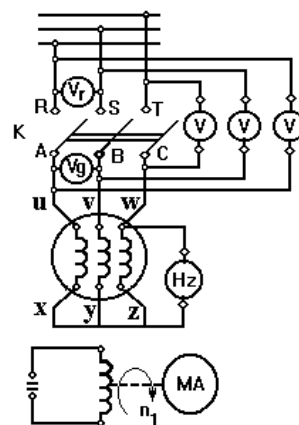


Fig. 6.52. Pornirea lansată a motorului sincron.

În vederea eliminării reductorului de turație și a plasării directe a rotorului pe tamburul morii de ciment, motorul sincron s-a realizat cu 44 de poli pe rotor, ceea ce corespunde la o viteză maximă de 15 rot/min și frecvența de 5,5 Hz. Statorul este alimentat printr-un comutator electronic de putere. Schema permite reglarea frecvenței tensiunii de alimentare a statorului, reglarea unghiului intern și reglarea amplitudinilor curenților.

Un alt procedeu de pornire folosit în cazul motorului sincron este pornirea lansată cu motor auxiliar (Fig. 6.52). Motorul sincron are rotorul antrenat până la viteza de sincronism de un motor auxiliar de putere redusă, capabil să compenseze pierderile în sistemul de acționare. Înfășurarea de excitație se alimentează cu o tensiune continuă crescătoare, până când tensiunea la bornele mașinii sincrone este egală cu tensiunea rețelei. Pentru cuplarea mașinii sincrone la rețea trebuie îndeplinite condițiile de punere în paralel de la generatoarele sincrone.

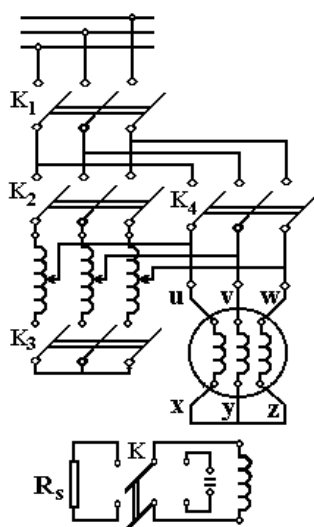


Fig. 6.53. Pornirea cu tensiune redusă.

Cea mai folosită metodă de pornire a motoarelor sincrone este *pornirea în asincron*.

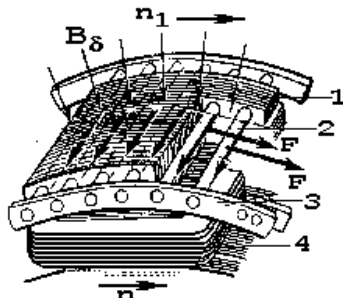


Fig. 6.54. Rolul coliviei de pornire.

Pentru a limita curenții la pornire se aplică o tensiune redusă obținută de la un autotransformator sau se limitează curenții prin înserierea unor bobine de reacțanță, conform schemei din figura 6.53. Pe timpul pornirii în asincron înfășurarea de excitație este conectată pe o rezistență suplimentară R_s , prin intermediul unui inverter pentru a evita fenomenele ce ar putea împiedica accelerarea rotorului până în apropierea vitezei de sincronism.

Se alimentează înfășurarea statorului care crează un câmp magnetic învârtitor în întrefier producând forțele electromagnetice F prin interacțiunea cu curenții ce apar în barele 2 ale coliviei scurtcircuitate prin inelele 3 (Fig. 6.54). Când rotorul a ajuns în apropierea vitezei de sincronism, se introduce curent continuu în înfășurarea de excitație și rotorul intră în sincronism datorită cuplului electromagnetic sincron. În cazul unei înfășurări monofazate închise și aflate în câmpul magnetic învârtitor se manifestă fenomenul Gorges. Curentul din înfășurarea monofazată are frecvența f_2 și produce un câmp alternativ.

Câmpul creat de înfășurarea monofazată este fix în raport cu rotorul, dar poate fi descompus în două câmpuri învârtitoare, a căror amplitudine este egală cu jumătate din cea a câmpului alternativ și care se rotesc în sensuri contrare, unul în raport cu celălalt, cu viteza sincronă n_2 .

Câmpul învârtitor direct se rotește în raport cu rotorul, cu viteza:

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{s f_1}{p} = s n_1 = n_1 - n, \quad (6.75)$$

iar în raport cu statorul, cu viteza:

$$n_d = n_2 + n = n_1, \quad (6.76)$$

având comportarea similară cu a câmpului învârtitor creat de stator.

Câmpul învârtitor invers se rotește în raport cu rotorul, cu viteza $-n_2$, iar în raport cu statorul are viteza:

$$n_i = -n_2 + n = n_1 (1 - 2s). \quad (6.77)$$

Acest câmp este fix față de stator la o valoare a alunecării egală cu 0,5 iar pentru alte valori ale alunecării, înfășurarea statorului se comportă ca un secundar scurtcircuitat în raport cu acest câmp (Fig.6.55).

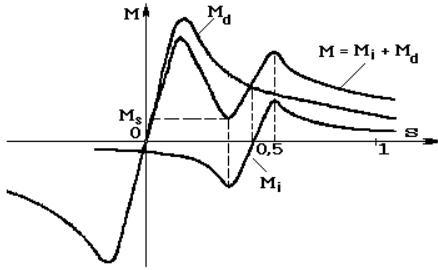


Fig. 6.55. Cuplul direct și invers la o înfășurare monofazată.

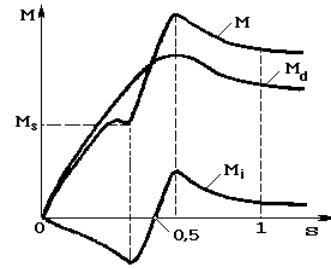


Fig. 6.56. Caracteristica de pornire în asincron a motorului sincron.

Rezistența suplimentară R_s din circuitul de excitație limitează curentul monofazat și prin urmare reduce amplitudinea câmpului produs de înfășurarea de excitație, fapt ce determină o curbă a cuplului electromagnetic rezultant mai avantajoasă pentru pornirea în asincron a motorului sincron (Fig. 6.56).

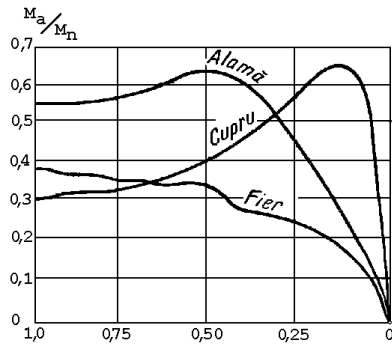


Fig. 6.57. Dependența cuplului asincron în funcție de natura materialului coliviei de amortizare.

În figura 6.57 se indică influența materialului din care sunt realizate barele coliviei de amortizare, constatându-se că soluția optimă constă în folosirea barelor din cupru sau alamă.

Nu se recomandă efectuarea pornirii în asincron cu înfășurarea de excitație deschisă, deoarece în această înfășurare s-ar induce o tensiune mare (deoarece numărul de spire este mare) care ar pune în pericol izolația înfășurării.

În momentul în care are loc stabilirea curentului continuu prin înfășurarea de excitație, începe procesul tranzitoriu de sincronizare care este dependent de mărimea unghiului dintre axa polilor inductori și axa câmpului rezultant (unghiul intern δ) conform figurii 6.58. Situația cea mai favorabilă pentru sincronizare corespunde cazului când valoarea unghiului intern δ este nulă, adică în fața unui pol real se găsește un pol fictiv de semn contrar. În această situație, cuplul sincron M este nul, iar alunecarea s fiind diferită de zero determină apariția unui cuplu asincron M_a , egal cu valoarea cuplului rezistent M_r . În figura 6.58 -a) este prezentată caracteristica unghiulară a motorului sincron și cuplul asincron considerat pozitiv sub dreapta CE (corespunzătoare cuplului rezistent M_r) și negativ deasupra dreptei CE [12].

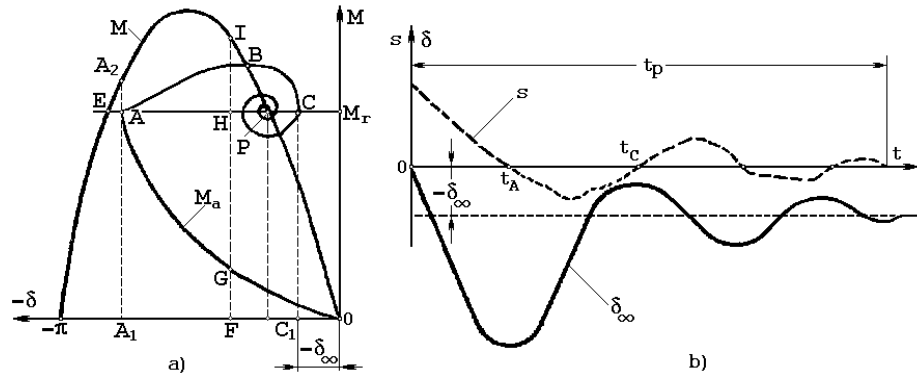


Fig. 6.58. Procesul de intrare în sincronism a motorului sincron.

După alimentarea înfășurării de excitație, rotorul rămâne în urma câmpului magnetic învârtitor determinând apariția cuplului sincron de același sens cu al cuplului asincron, fapt ce conduce la accelerarea rotorului și reducerea mărimei alunecării acestuia. La un moment dat, pentru valoarea unghiului intern (punctul F) corespunzătoare la cuplul rezistent FH, cuplul sincron este reprezentat prin segmentul FI, iar cuplul asincron prin segmentul HG. Cuplul rezultant depășește cuplul rezistent, cu valoarea dată de segmentul GI și este un cuplu antrenant care determină accelerarea rotorului până când valoarea unghiului intern ajunge la valoarea corespunzătoare punctului A_1 pentru care, atât alunecarea cât și cuplul asincron devin nule. În această situație, cuplul sincron depășește cuplul rezistent cu valoarea AA_2 , determinând accelerarea rotorului peste viteza de sincronism și obținerea unei alunecări negative. Cuplul asincron, corespunzător de această dată regimului de generator asincron cu excitație de la rețea, se manifestă ca un cuplu de frânare. În punctul B există echilibru între cu-

plul rezistent și cel antrenant, însă alunecarea rotorului este negativă (rotorul accelerând continuu). Din acest moment apare un cuplu decelerator care va conduce la reducerea unghiului intern până la valoarea minimă, corespunzătoare punctului C, situație în care alunecarea nevine nulă. Punctul C nu este stabil deoarece cuplul decelerator va determina creșterea unghiului intern astfel încât punctul de funcționare se mișcă pe spirala OABCD până se stabilizează în P, punct în care se intersectează curba cuplului sincron cu dreapta cuplului rezistent. Intrarea în sincronism a motorului sincron este posibilă atât timp cât punctul A se află în stânga punctului E (care reprezintă valoarea limită pentru care rotorul mai poate intra în sincronism).

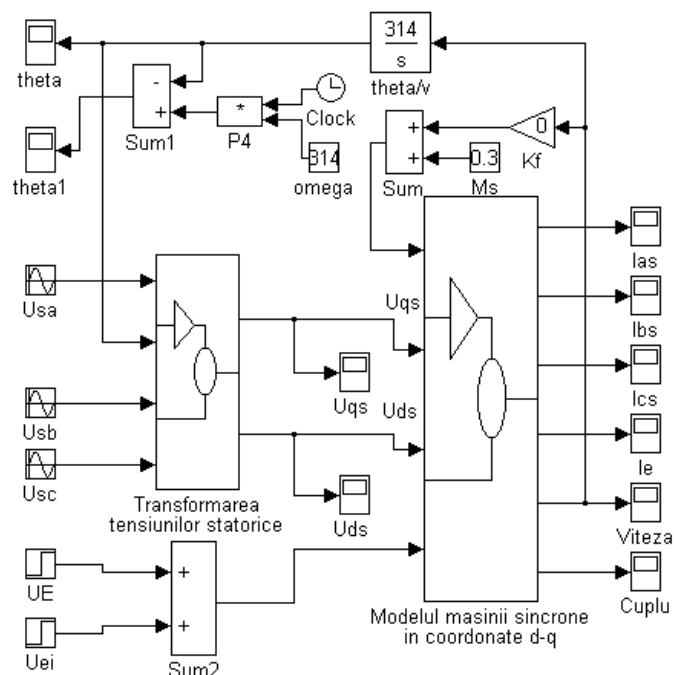


Fig. 6.59. Modelul SIMULINK al motorului sincron.

Studiul comportării motorului sincron în regim tranzitoriu electromecanic s-a făcut pe modelul SIMULINK din figura (6.59).

Modelul conține două blocuri principale: blocul de transformare a tensiunilor statorice din sistem trifazat în sistem bifazat [19], [37], [42] și blocul care reprezintă modelul mașinii sincrone într-un referențial $d-q$ solidar cu statorul, în mărimi relative [42]. Structura acestui bloc permite vizualizarea formelor de undă ale curenților statorici similari ca alioră ca la motorul asincron, a cuplului electromagnetic dezvoltat de mașină (Fig.6.60), a curentului de excitație (Fig. 6.61), a vitezei de rotație (Fig. 6.62), decroșarea motorului sincron la supraexcitarea cu semnal treaptă la un cuplu rezistent foarte mic (cuplul datorat pierderilor). Pornirea mașinii se face în asincron, la cuplu rezistent la arbore $M_s = 0$, singurul cuplu rezistent fiind datorat coeficientului de frecare $K_f = 0,022$, corespunzător pierderilor.

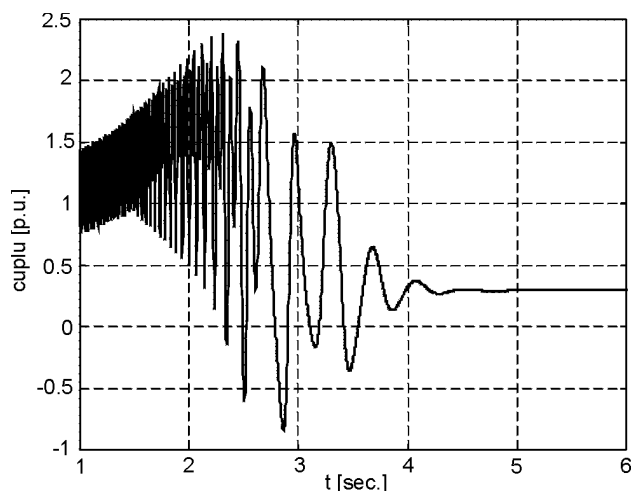


Fig. 6.60. Variația cuplului electromagnetic la pornirea în asincron.

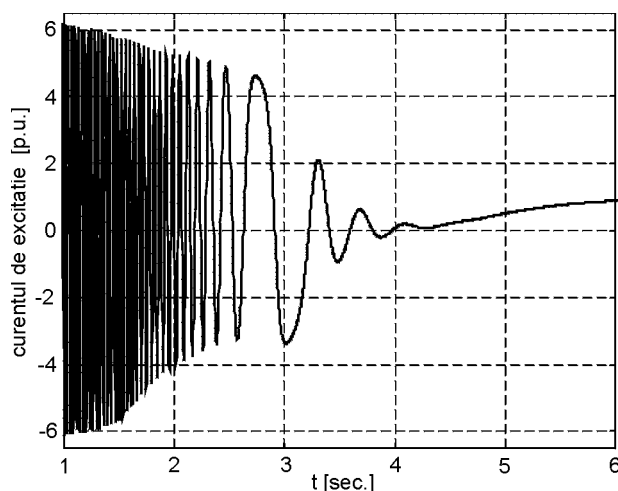


Fig. 6.61. Variația curentului de excitație la pornirea în asincron.

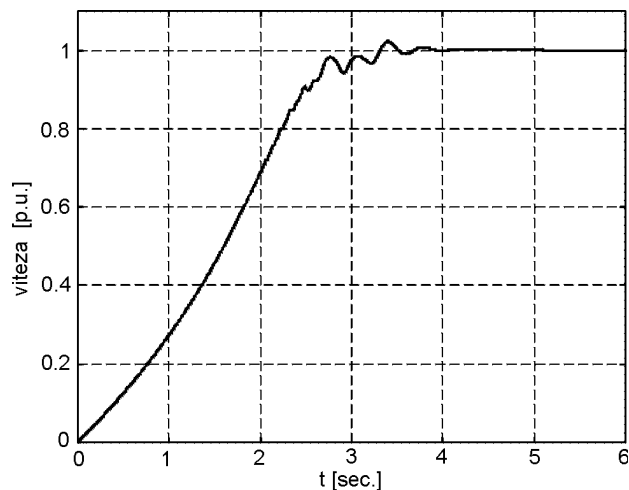


Fig. 6.62. Variația vitezei de rotație la pornirea în asincron.

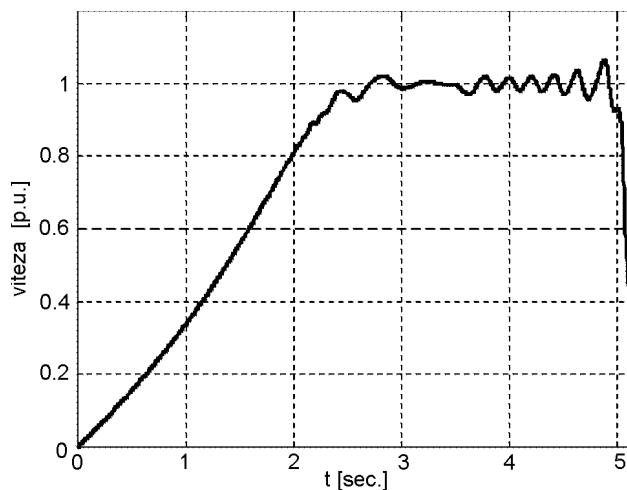


Fig. 6.63. Decroșarea motorului sincron la supraexcitarea cu semnal treaptă.

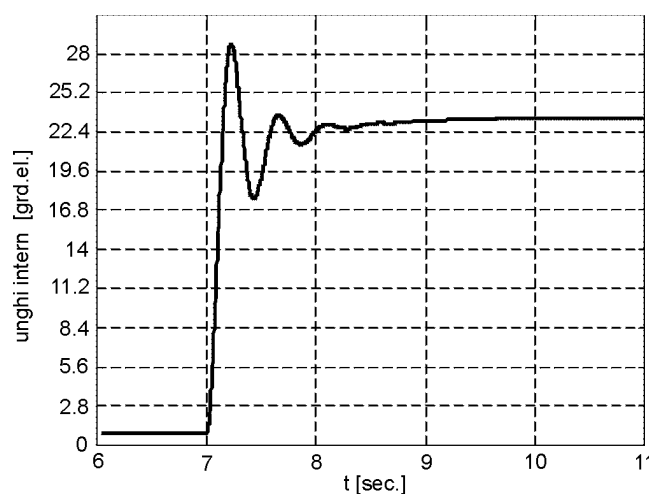


Fig. 6.64. Variația unghiului intern la aplicarea bruscă a unui cuplu rezistent.

Se observă că, pe măsură ce rotorul accelerează, valoarea cuplului asincron și a frecvenței curentului din înfășurarea de excitație se reduce. În figura 6.63 se observă intrarea într-un regim de oscilații și ieșirea din sincronism a rotorului la aplicarea unui semnal treaptă (la $t=3,5$ seunde) de cinci ori mai mare decât valoarea nominală a curentului de excitație. Din figura 6.64 se poate vedea creșterea unghiului intern dacă se aplică un semnal treaptă de 0,5 din cuplul nominal.

Simularea s-a făcut pentru un motor sincron având următorii parametri: $S_N = 4$ MW; $U_N = 6$ kV; $I_N = 666,67$ A; $\omega_1 = 314$ rad/sec.; $R_s = 0,05$; $X_d = 1,2$; $X_d' = 0,25$; $X_d'' = 0,145$; $X_q = 0,74$; $X_q' = 0,156$.

Poziția rotorului se obține la ieșirea blocului "theta/v". Pentru a se putea obține unghiul intern al mașinii în diferite condiții de funcționare, a fost conceput ansamblul format din blocurile "omega",

"clock", "P4" și "Sum1". Curentul de excitație se poate modifica în trepte la momentele dorite, prin intermediul blocurilor "UE", "Ue1" și "Sum2".

Frânarea motoarelor asincrone nu prezintă interes deosebit. În condiții speciale, se recurge la frânarea dinamică (reostatică) prin deconectarea sta-torului de la rețeaua de alimentare și conectarea, prin intermediul întrerupătorului K_2 , pe rezistențele de frânare R (Fig. 6.65). Energia cinetică înmagazinată în rotorul în mișcare se transformă astfel în energie calorică.

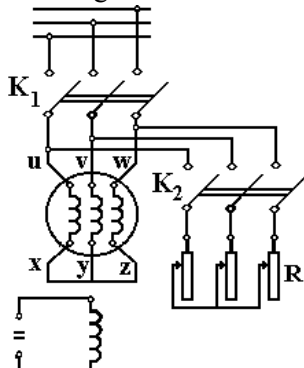


Fig. 6.65. Frânarea dinamică a motorului sincron.

Caracteristicile de funcționare cele mai importante sunt reprezentate de variația unor mărimi semnificative (viteză, cuplu electromagnetic, curent de sarcină, randament) în funcție de puterea utilă P_2 , pentru $U = \text{const.}$, $f = \text{const.}$, $I_{ex} = \text{const.}$, (Fig. 6.66). Întrucât motorul sincron are turația constantă $n = n_1$, indiferent de sarcină, caracteristica mecanică este o dreaptă paralelă cu axa absciselor.

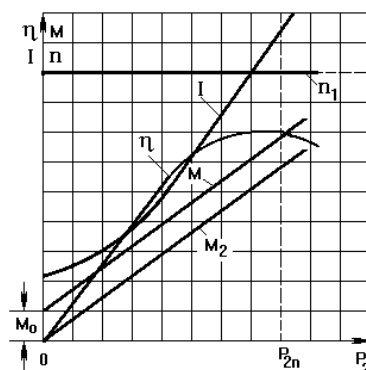


Fig. 6.66. Curbele caracteristice η , M , I , $I = f(P_2)$ ale motorului sincron.

Deoarece cuplul electromagnetic și cuplul mecanic se pot exprima prin relațiile:

$$M = M_0 + M_2 ; \quad M_2 = \Omega_l \cdot P_2 , \quad (6.78)$$

cuplul mecanic în funcție de puterea utilă se reprezintă printr-o dreaptă ce trece prin origine, iar cuplul electromagnetic se reprezintă printr-o dreaptă paralelă cu prima, dar trece prin punctul deordonată M_0 .

Curba randamentului are o alătură asemănătoare caracteristicilor ridicate la celelalte categorii de mașini.

6.9. MAȘINI SINCRONE CU MAGNEȚI PERMANENȚI

Mașinile sincrone cu magneți permanenți au fost obținute prin înlocuirea înfășurării de excitație, parcursă de curent continuu, cu magneți permanenți. Se adoptă una din variantele constructive pentru rotorul mașinii cu magneți permanenți, prezentate în figura 6.67.

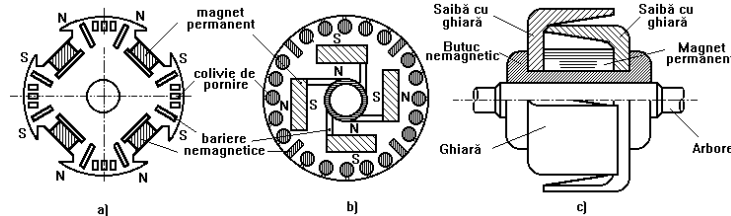


Fig. 6.67. Variante constructive de rotoare la motoare asincrone cu magneți permanenți:

a) – magneți interpolari; b) – magneți polari; c) – tip ghiață.

Motorul sincron cu magneți permanenți se realizează în două variante constructive: cu magneți interpolari (a) cu poli aparenti și cu magneți polari cu întrefier uniform (b).

Generatoarele cu magneți permanenți se construiesc cu poli aparenti (a) sau cu poli tip ghiață (c).

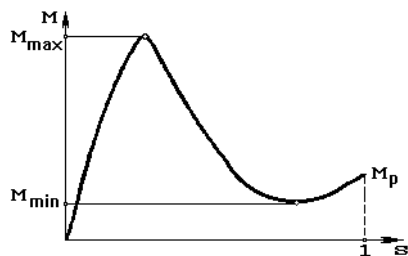


Fig. 6.68. Cuplul la pornirea motorului sincron cu magneți permanenți.

Avantajele acestei categorii de mașini constau în: dimensiuni de gabarit și greutate mai reduse, randament superior datorită pierderilor în excitație, preț de cost mai scăzut datorită simplificării construcției, lipsa contactelor alunecătoare asociate mașinilor cu excitație electromagnetică care conduce la mărirea siguranței în funcționare.

Mașinile sincrone cu magneți permanenți funcționează ca generatoare autonome la frecvența standard sau frecvențe mai ridicate.

În cazul pornirii motorului sincron cu magneți permanenți, fluxul constant al rotorului induce în fiecare fază a statorului o tensiune electromotoare ce determină apariția unui curent de frecvență variabilă datorită variației vitezei. Acest curent contribuie la apariția unui cuplu ce influențează apreciabil curba cuplului rezultat la alunecări mari (Fig. 6.68), fenomenul nemanifestându-se la pornirea motorului sincron cu excitație electromagnetică conectată pe o rezistență de valoare foarte mare. Curenții ce apar în circuitele de fază ale statorului pot atinge valori importante ce ar determina demagnetizarea magneților permanenți.

6.10. MAȘINI SINCRONE REACTIVE

Mașina sincronă cu poli aparenti la care lipsește înfășurarea de excitație poate funcționa în regim de motor sincron monofazat sau trifazat și este cunoscută sub denumirea de **motor sincron reactiv**. În această situație ecuația de tensiuni se simplifică deoarece $E_0 = 0$:

$$\underline{U} = R \underline{I} + jX_d \underline{I}_d + jX_q \underline{I}_q , \quad (6.79)$$

iar cuplul electromagnetic rezultat va avea expresia:

$$M = \frac{m U^2}{2 \Omega_l} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta , \quad (6.80)$$

valoarea cuplului fiind determinată de raportul dintre mărimile reactanțelor pe cele două axe (X_d/X_q). Deoarece lipsește înfășurarea de excitație, s-au realizat variante constructive la care acest raport să aibă o valoare cât mai mare față de unitate (Fig. 6.69).

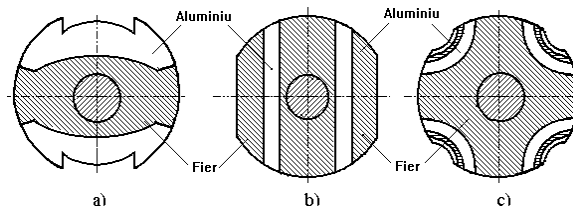


Fig. 6.69. Variante constructive de rotoare la motoare sincrone reactive.

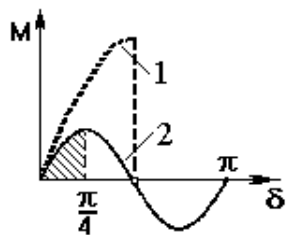


Fig. 6.70. Caracteristica unghiulară la motorul reactiv.

În figurile 6.69, a și b sunt prezentate variante constructive pentru doi poli la care se obține raportul $X_d/X_q = 4 \div 5$, iar în figura 6.69 -c) este prezentată o variantă pentru patru poli la care se obține raportul $X_d/X_q = 8 \div 10$. La asemenea valori pentru X_d/X_q , motorul reactiv se apropie ca performanțe energetice de motorul asincron [15].

În construcția rotoarelor se folosesc "bariere" de aluminiu în calea liniilor câmpului transversal care preiau rolul coliviei de pornire la pornirea în asincron.

Caracteristica unghiulară a motorului reactiv este prezentată în figura 6.70. Se constată că domeniul de funcționare stabilă se obține pentru unghiuri interne (exprimate în grade electrice) cuprinse între 0 și $\pi/4$.

6.11. DIAGRAMA CURENTULUI LA MAȘINA SINCRONĂ

Pentru construcția diagramei curentului la mașina sincronă se va considera constant curentul de excitație, încât tensiunea electromotoare E_0 se va menține constantă.

Dacă se neglijează rezistența indusului, se obține pentru curentul din indusul mașinii sincrone cu poli înecați expresia:

$$\underline{I} = (\underline{E}_0 - \underline{U}) / j X_s = -j \underline{E}_0 / X_s + j \underline{U} / X_s. \quad (6.81)$$

Locul geometric al curentului exprimat prin relația (6.81) este prezentat în figura 6.71. La variația unghiului intern δ vârful F al fazorului prin care se reprezintă curentul descrie un cerc corespunzător lui E_0 [17].

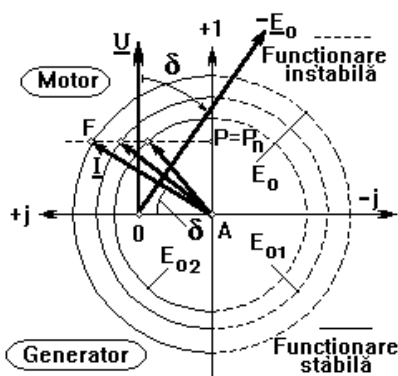


Fig. 6.71. Locul geometric al curentului la mașina sincronă cu poli înecați.

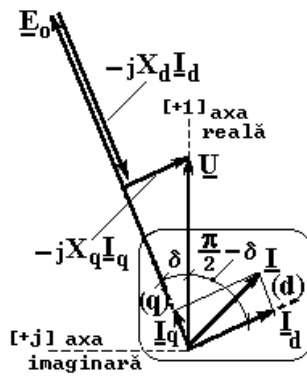


Fig. 6.72. Diagrama simplificată la mașina cu poli aparenti.

Cele două componente ale curentului au fost notate în figura 6.71 astfel:

$$\overline{AF} = -j \underline{E}_0 / X_s ; \overline{OA} = -j \underline{U} / X_s. \quad (6.82)$$

Pe figură sunt indicate zonele de funcționare ca motor și generator precum și limitele de stabilitate.

Pentru o altă valoare mai mică a curentului de excitație va corespunde o tensiune electromotoare mai mică (E_{01}), iar locul geometric va fi un cerc concentric cu primul dar cu diametrul mai mic. La fel se va întâmpla și în cazul în care curentul de excitație se reduce, obținându-se o valoare E_{02} pentru t.e.m.

La mașina sincronă cu poli aparenti, diagrama curentului se obține dacă se folosesc expresiile (6.39) și (6.40) ale celor două componente: transversală (I_q) și longitudinală (I_d).

Dacă se ia tensiunea la borne ca origine de fază atunci, cu ajutorul diagramei fazoriale simplificate din figura 6.72, se determină unghiurile corespunzătoare celor două componente ale curentului ($\pi/2 - \delta$ în sens matematic negativ, pentru componenta longitudinală și δ pentru componenta transversală în sens matematic pozitiv) încât fazorul curentului are expresia:

$$\underline{I} = I_d e^{-j(\frac{\pi}{2} - \delta)} + I_q e^{j\delta}. \quad (6.83)$$

În această relație, se înlocuiesc expresiile (6.39) și (6.40) ale celor două componente ale curentului obținându-se relația:

$$\underline{I} = I_d + I_q = \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d} \cdot e^{-j(\frac{\pi}{2} - \delta)} + \frac{U \sin \delta}{X_q} \cdot e^{j\delta}. \quad (6.84)$$

Se exprimă funcțiile trigonometrice prin formulele lui Euler rezultând:

$$\underline{I} = j \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) - j \frac{E_0}{X_d} e^{j\delta} - j \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) e^{j2\delta}. \quad (6.85)$$

Pentru început se construiește locul geometric al curentului al mașinii sincrone reactive, obținut din relația (6.85), dacă se consideră tensiunea electromotoare E_0 nulă:

$$\underline{I} = j \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) - j \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) e^{j2\delta}, \quad (6.86)$$

locul fiind un cerc conform figurii 6.73. În această figură, s-au făcut notațiile:

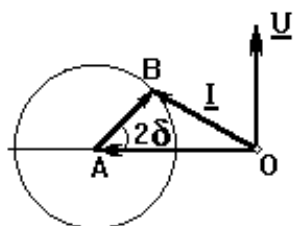


Fig. 6.73. Locul geometric al curentului la mașina reactivă.

$$\begin{aligned} \overline{OA} &= j \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right); \\ \overline{AB} &= -j \frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) e^{j2\delta}. \end{aligned} \quad (6.87)$$

Porțiunea de diagramă situată deasupra axei orizontale corespunde funcționării în regim de generator cu sarcină capacitivă, iar porțiunea situată sub axa absciselor corespunde funcționării mașinii în regim de motor. Pentru îmbunătățirea performanțelor energetice se realizează construcții hibride prin introducerea în rotor a magneților permanenți (în mod obișnuit ferite).

La mașina sincronă cu poli aparenti sunt prezente toate componentele curentului dat de relația (6.85), iar locul geometric al fazorului prin care se reprezintă curentul I , la variația unghiului intern δ , este o curbă geometrică denumită "melcul lui Pascal" (Fig. 6.74). În această figură, segmentul AB are aceeași valoare dată de relația (6.87), iar segmentul $AD = AO$ (definit în aceeași relație). Se face notația:

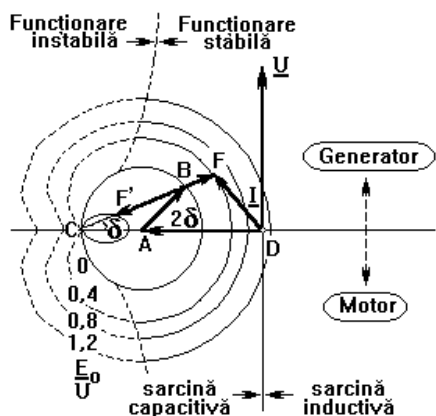


Fig. 6.74. Locul geometric al curentului la mașina sincronă cu poli aparenti.

$$\overline{BF} = -j \frac{E_o}{X_d} e^{j\delta} \quad (6.88)$$

direcția fiind stabilită de dreapta CB.

Puterea schimbată între mașină și rețea este maximă la unghiul intern δ_m (curba formată de mulțimea de puncte situate pe familia de curbe loc geometric corespunzătoare lui δ_m delimitează zona de funcționare stabilă a mașinii de zona de funcționare instabilă, marcată cu linie întreruptă).

6. 12. SCURTCIRCUITUL TRIFAZAT BRUSC LA MAȘINA SINCRONĂ

6.12.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Regimul de scurtcircuit brusc apare în situația în care se face o trecere bruscă de la regimul stabil de funcționare, la tensiune nominală, pe o sarcină oarecare, la un regim de funcționare la care impedanța de sarcină este nulă. Acest regim de funcționare, numit și **regim tranzitoriu de scurtcircuit**, se deosebește net de regimul de scurtcircuit stabil obținut prin reducerea treptată, până la zero a impedanței din circuitul exterior.

Fenomenul esențial care deosebește regimul scurtcircuitului brusc de regimul scurtcircuitului stabil constă în prezența cuplajului inductiv strâns dintre înfășurarea statorului și înfășurările de excitație și de amortizare din rotor. Se constată că în acest caz se modifică evident permeanțele căilor urmate de fluxurile magnetice (în mod deosebit de fluxul de reacție a indusului). Prin urmare, apare necesitatea introducerii unor noi parametri, care se manifestă în această situație (*reactanțe supratranzitorii și tranzitorii*) precum și *constantele de timp corespunzătoare amortizării*. Se face precizarea că analiza fenomenelor ce apar în cazul scurtcircuitului brusc se referă la un singur circuit de fază, concluziile extinzându-se și la celelalte circuite de fază.

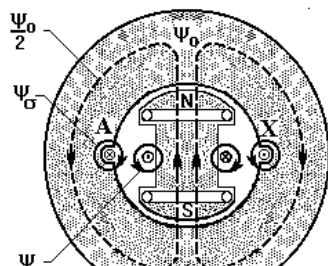


Fig. 6.75. Spectrul liniilor de câmp în cazul circuitului supraconductor.

Pentru a ușura studiul fenomenelor ce se manifestă în cazul scurtcircuitului brusc, se vor studia două cazuri limită în care *fluxul care străbate înfășurarea statorului este nul sau are valoare maximă*. Pentru început, la baza analizei scurtcircuitului brusc, se va lua în considerare că circuitul supus discuției este *supraconductor* ($R = 0$), stabilindu-se traseele liniilor de câmp conform figurii 6.75. Plecând de la acest aspect se pot scrie următoarele relații:

$$e_o = - \frac{d\psi_o}{dt}; \quad e_\sigma = - \frac{d(L_\sigma i)}{dt}, \quad (6.89)$$

care reprezintă tensiunile electromotoare induse în faza considerată, datorate fluxului util de excitație Φ_o și fluxului de scăpări Φ_σ . Aplicând teorema a doua a lui Kirchoff pe conturul unui circuit de fază, se obține

$$e_o + e_s = iR, \quad (6.90)$$

relația:

în care se introduc tensiunile electromotoare definite prin relația (6.89).

Se obține astfel expresia:

$$-\frac{d\psi_o}{dt} - \frac{d(L_\sigma i)}{dt} = i R, \quad (6.91)$$

în care se introduce condiția de circuit supraconductor ($R = 0$):

$$-\frac{d\psi_o}{dt} - \frac{d(L_\sigma i)}{dt} = 0, \quad (6.92)$$

și se trage concluzia că *fluxul total al circuitului supraconductor rămâne constant în orice condiție și în orice regim*:

$$\psi_o + L_\sigma i = \psi_o + \psi_\sigma = \text{const.} \quad (6.93)$$

Generatorul sincron se încadrează într-o situație apropiată de circuitul supraconductor deoarece prezintă constructiv trei circuite (înfășurarea statorului, înfășurarea de excitație și înfășurarea de amortizare) cu rezistențe ohmice foarte mici. Oricât de mici ar fi valoarea rezistențelor, ele nu se iau în calcul în prima etapă, dar apoi rezistențele constituie mărimile importante care intervin în procesul de amortizare.

În studiul scurtcircuitului brusc se disting două cazuri limită pentru valorile fluxului de excitație ce în-lănțuie spirele înfășurării statorului ($\Psi = 0$ și $\Psi = \Psi_{\max}$), cazuri ce conduc la forme diferite ale curentului de scurtcircuit.

În primul caz, curentul de scurtcircuit ce străbate înfășurarea statorului este **simetric**, în timp ce în al doilea caz este **nesimetric**.

6.12.2. SCURT-CIRCUITUL BRUSC PENTRU CAZUL $\Psi = 0$

Se studiază fenomenele ce se manifestă în mașina sincronă la scurtcircuitul brusc, pentru cazul $\Psi = 0$, în raport cu faza A-X. În această situație, axa polilor va coincide cu planul fazei A-X conform figurii 6.76. Potrivit acestei situații, în momentul inițial al scurtcircuitului ($t = 0$), tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea statorului este maximă ($e = E_m$), iar curentul prin înfășurare este nul ($I = 0$), circuitul considerându-se pur inductiv deoarece scurtcircuitul se produce la borne.

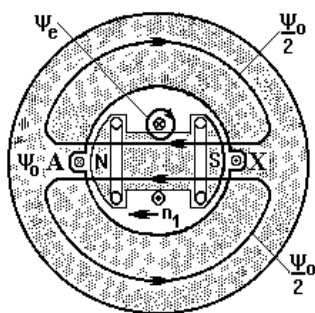


Fig. 6.76 Scurtcircuitul brusc pentru cazul $\Psi = 0$.

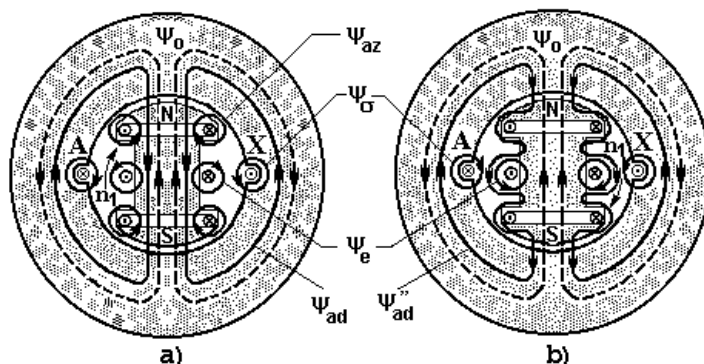


Fig. 6.77. Fluxurile în mașina sincronă în momentul imediat următor ($t = T/4$) a) – scurtcircuitul stabil; b) – scurtcircuitul brusc.

Dacă se neglijează rezistența fazei A-X, atunci fluxul total trebuie să rămână egal cu zero atât în momentul scurtcircuitului cât și în momentele următoare. Se ia în considerare cazul în care s-a scurs un timp $t = T/4$, din momentul scurtcircuitului, rotorul parcurgând 90° electrice. În această situație, curentul prin înfășurarea indusului devine maxim, iar tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea statorică este nulă deoarece fluxul de excitație care în-lănțuie spirele acestei înfășurări este maxim (Fig. 6.77).

În cazul scurtcircuitului stabil, prezența fluxului de reacție a indusului pentru situația sarcinii pur inductive se manifestă independent, conform traseului indicat prin linie continuă (Ψ_{ad}), cu efect demagnetizant (Fig. 6.77 -a).

În cazul scurtcircuitului brusc, situația se schimbă radical, întrucât în circuitul magnetic al mașinii trebuie să se mențină aceeași stare de magnetizare, anterioară scurtcircuitului brusc. Prin urmare, fluxurile totale care în-lănțuie înfășurările de excitație și de amortizare, trebuie să rămână neschimbate, acest lucru fiind posibil numai dacă fluxul de reacție longitudinal va fi obligat să se stabilească pe trasee de reluctanță mărită (corespunzătoare în cea mai mare parte fluxurilor de dispersie), conform figurii 6.77-b.

Reluctanța acestui traseu fiind mult mai mare decât reluctanța drumului normal prin miezul polilor, justifică necesitatea unui curent mai mare prin înfășurarea indusului (care să conducă la apariția fluxului Ψ''_{ad}) decât în cazul scurtcircuitului stabil. În același timp au loc salturi de curent în înfășurarea de excitație (Fig. 6.78) și în înfășurarea de amortizare (Fig. 6.79).

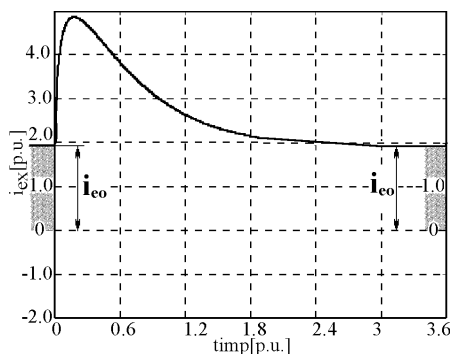


Fig. 6.78. Curentul prin înfășurarea de excitație în momentul următor scurtcircuitului brusc

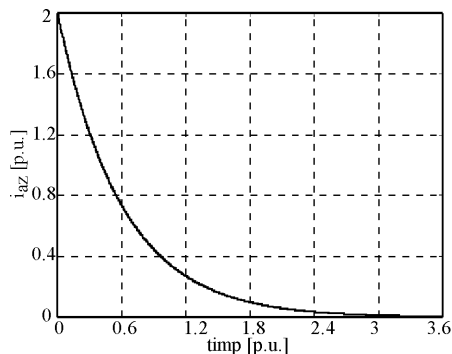


Fig. 6.79. Curentul prin înfășurarea de amortizare în momentul următor scurtcircuitului brusc.

Curentul în înfășurarea de excitație crește în primul moment al scurtcircuitului de la o valoare oarecare i_{eo} la o valoare maximă, în timp ce curentul în înfășurarea de amortizare ajunge la o valoare maximă plecând din zero.

Deoarece constanta de timp a înfășurării de amortizare T_{az} este mai mică decât constanta de timp a înfășurării de excitație T_{ex} , curentul prin înfășurarea de amortizare scade în zero după un timp mai scurt față de curentul din înfășurarea de excitație care revine la valoarea inițială i_{eo} după un timp mai lung (legea de variație fiind aperiodică în ambele cazuri). Se face precizarea că valoarea constantei de timp a unui circuit se definește prin raportul dintre inductanța circuitului și rezistența sa ohmică.

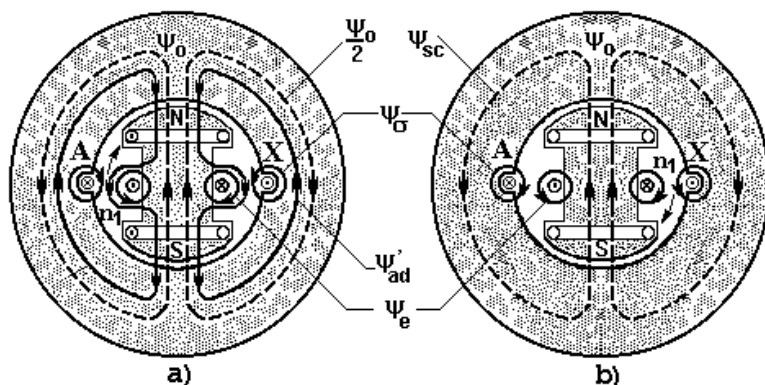


Fig. 6.80. Fluxurile în mașina sincronă; a) – în momentul următor scurtcircuitului Brusc; b) - în timpul scurtcircuitului brusc.

Participarea celor două înfășurări la stabilirea valorii rezultante a curentului de scurtcircuit definește *regimul supratranzitoriu de scurtcircuit*. După amortizarea componentei aperiodice a curentului din înfășurarea de amortizare, se definește *regimul tranzitoriu de scurtcircuit* determinat de curentul prin înfășurarea de excitație (Fig. 6.80 -a). Prin amortizarea componentei aperiodice din înfășurarea de excitație se ajunge la *regimul de scurtcircuit stabil* (Fig. 6.80 -b).

Curentul de scurtcircuit brusc simetric, rezultat (Fig. 6.84), pentru situația în care $\Psi = 0$, este un curent simetric față de axa abscisei și se compune din curentul de scurtcircuit produs de fluxul datorat înfășurării de amortizare (Fig. 6.81), curentul de scurtcircuit produs de fluxul datorat înfășurării de excitație (Fig. 6.82) și curentul de scurtcircuit stabil corespunzător curentului de excitație cu valoarea inițială i_{eo} (Fig. 6.83). Primul dintre curenții care se amortizează se numește *componentă supratranzitorie* a curentului de scurtcircuit trifazat brusc deoarece are constanta de timp T_{a3}' cea mai mică și este reprezentată în figura 6.81. Apoi se amortizează *componenta tranzitorie* a curentului de scurtcircuit trifazat brusc deoarece are constanta de timp $T_{a3} > T_{a3}'$ și este reprezentată în figura 6.82. După terminarea regimului tranzitoriu se obține *curentul stabil* al scurtcircuitului brusc trifazat (Fig. 6.83).

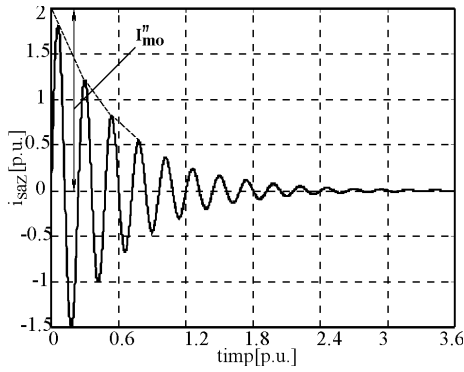


Fig. 6.81. Curentul de scurtcircuit produs de fluxul datorat înfășurării de amortizare.

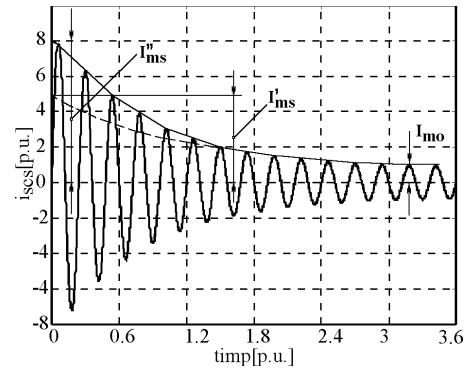


Fig. 6.82. Curentul de scurtcircuit produs de fluxul datorat înfășurării de excitație.

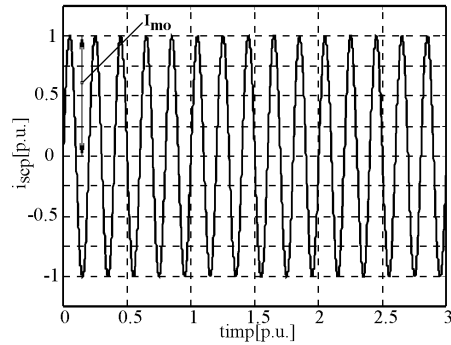


Fig. 6.83. Curentul de scurtcircuit în regim stabil.

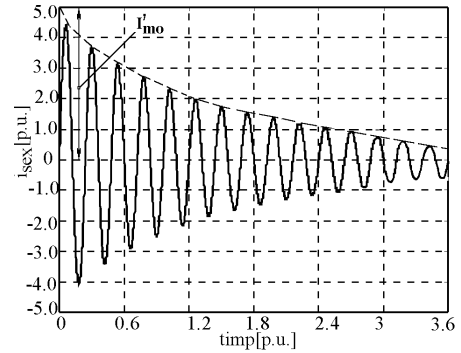


Fig. 6.84. Curentul de scurtcircuit simetric pentru $\Psi = 0$.

Pentru a obține amplitudinile inițiale ale celor trei componente: (I''_{mo} , I'_{mo} și I_{mo}), se prelungesc curbele care unesc amplitudinile curenților până când intersectează ordonatele, iar *amplitudinea inițială a curentului simetric supratranzitoriu la scurtcircuitul brusc* I''_{ms} (Fig. 6.84) se obține prin același procedeu și are expresia:

$$I''_{ms} = I''_{mo} + I'_{mo} + I_{mo} \quad (6.94)$$

În situația în care generatorul sincron nu prezintă înfășurare de amortizare, *amplitudinea inițială a curentului simetric tranzitoriu la scurtcircuitul brusc* I'_{ms} este mai mică și rezultă:

$$I'_{ms} = I'_{mo} + I_{mo} \quad (6.95)$$

Cu ajutorul relațiilor (6.94) și (6.95) se determină mărimea inițială:

$$I''_{mo} = I''_{ms} - I'_{ms} \quad (6.96)$$

Valoarea instantanee a *curentului simetric la scurtcircuitul brusc trifazat* i_{scs} este egală cu suma valorilor instantanee ale componentelor supratranzitorie, tranzitorie și stabilă ale curentului simetric de scurtcircuit trifazat brusc:

$$i_{scs} = i'' + i' + i, \quad (6.97)$$

relație în care cele trei componente se definesc astfel:

- valoarea instantanee a componentei supratranzitorii;

$$i'' = I''_{mo} \sin \omega t \cdot e^{-\frac{t}{T''_{a3}}} = (I''_{ms} - I'_{ms}) \sin \omega t \cdot e^{-\frac{t}{T''_{a3}}}; \quad (6.98)$$

- valoarea instantanee a componentei tranzitorii;

$$i' = I'_{mo} \sin \omega t \cdot e^{-\frac{t}{T'_{a3}}} = (I'_{ms} - I_{ms}) \sin \omega t \cdot e^{-\frac{t}{T'_{a3}}}; \quad (6.99)$$

-valoarea instantanee a componentei stabile;

$$i = I_{mo} \sin \omega t. \quad (6.100)$$

Dacă se înlocuiesc valorile instantanee, definite prin relațiile (6.98), (6.99) și (6.100) în relația (6.97), se obține valoarea instantanee a curentului simetric de scurtcircuit brusc:

$$i_{scs} = [(I''_{ms} - I'_{ms})e^{-\frac{t}{T'_{a3}}} + (I'_{ms} - I_{ms})e^{-\frac{t}{T'_{a3}}} + I_{m0}] \sin \omega t, \quad (6.101)$$

la care valoarea efectivă se calculează cu relația:

$$I_{sc3} = (I''_{sc} - I'_{sc})e^{-\frac{t}{T'_{a3}}} + (I'_{sc} - I_{sc})e^{-\frac{t}{T'_{a3}}} + I_{sc}, \quad (6.102)$$

în care sunt puse în evidență valorile efective ale componentelor supratranzitorie, tranzitorie și stabilă din curentului simetric de scurtcircuit trifazat brusc: I''_{sc} , I'_{sc} și I_{sc} .

6.12.3. SCURT CIRCUITUL BRUSC PENTRU CAZUL $\Psi = \Psi_{MAX}$

Se studiază fenomenele ce se manifestă în mașina sincronă la scurtcircuitul brusc, pentru cazul $\Psi = \Psi_{max}$, în raport cu faza A-X. În această situație axa polilor va fi perpendiculară pe planul fazei A-X conform fi-

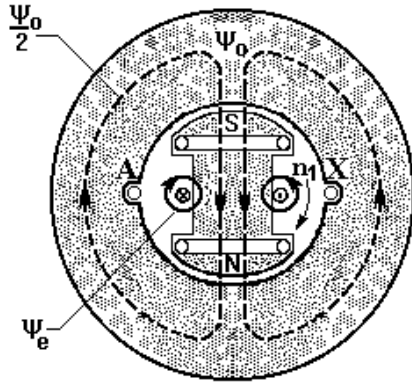


Fig. 6.85. Scurtcircuitul brusc pentru cazul $\Psi = \Psi_{max}$.

gurii 6.85. Potrivit acestei situații, în momentul inițial al scurtcircuitului ($t = 0$), tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea statorului este nulă ($e = 0$), iar curentul prin înfășurare este maxim ($I = I_m$), circuitul considerându-se pur inductiv (prin neglijarea rezistenței înfășurării) întrucât scurtcircuitul se produce la borne.

Deoarece în momentul scurtcircuitului brusc, din punct de vedere fizic, la momentul $t = 0$, curentul prin înfășurare nu poate avea valoarea maximă, deci trebuie să pornească din zero sau de la valoarea regimului staționar, corespunzătoare momentului inițial (valoare care este foarte mică în raport cu valoarea curentului de scurtcircuit brusc și care poate fi neglijată).

Acest fenomen este posibil numai dacă în înfășurarea statorului apare o componentă aperiodică a cărei valoare maximă I_{ma} (curba 2 - Fig. 6.86) este egală și de semn contrar cu valoarea instantanee a curentului simetric la scurtcircuitul brusc trifazat i_{scs} (curba 1 - Fig. 6.86)

în momentul scurtcircuitului ($t = 0$).

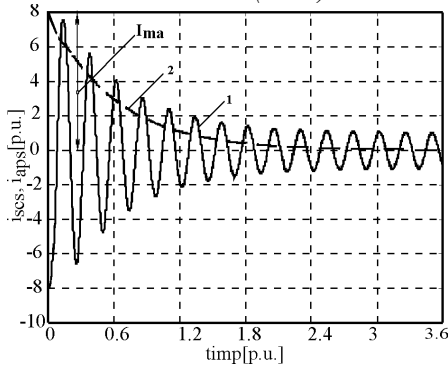


Fig. 6.86. Componentele curentului la scurtcircuitul brusc pentru cazul $\Psi = \Psi_{max}$.

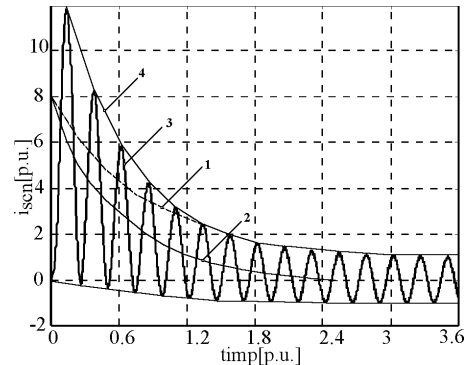


Fig. 6.87. Forma curentului la scurtcircuitul brusc pentru cazul $\Psi = \Psi_{max}$.

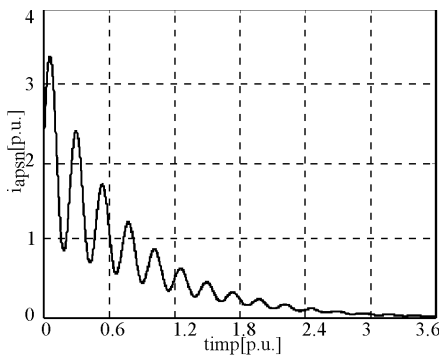


Fig. 6.88. Forma curentului prin înfășurarea de amortizare pentru $\Psi = \Psi_{max}$.

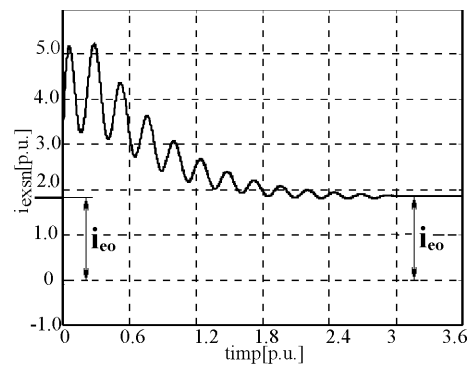


Fig. 6.89. Forma curentului prin înfășurarea de excitație pentru $\Psi = \Psi_{max}$.

Forma rezultantă a curentului la scurtcircuitul brusc, pentru cazul $\Psi = \Psi_{max}$, este prezentată în figura 6.87 și se observă **nesimetria** în raport cu abscisa, introdusă de componenta aperiodică. Prezența componentei

aperiodice în înfășurarea statorului determină apariția unor curenți alternativi în înfășurările de amortizare și de excitație care se compun cu valorile componentelor aperiodice ale curenților existenți în aceste înfășurări în momentul scurtcircuitului brusc, conform figurilor 6.88 și 6.89.

Reprezentarea fluxurilor pentru cazul scurtcircuitului brusc nesimetric este dată în figura 6.90.

Fluxurile create de prezența curenților în înfășurările de amortizare și de excitație se opun fluxului longitudinal de reacție a indusului Ψ_{ad} marcat în figura 6.90 -a), obligându-l să se stabilească pe trasee de reluctanță mărită în scopul menținerii stării de magnetizare a circuitului, similară cu cea premergătoare scurtcircuitului. Traseul componentei supratranzitorii a fluxului de reacție Ψ''_{ad} este prezentat în figura 6.90 -b).

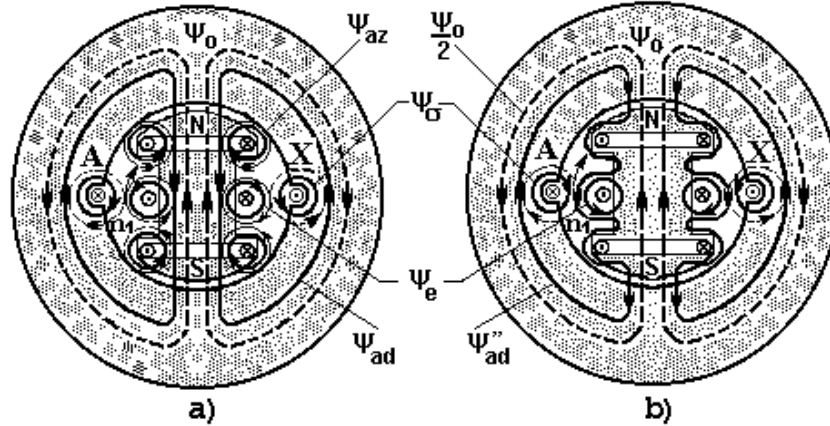


Fig. 6.90. Fluxurile în mașina sincronă în momentul scurtcircuitului brusc nesimetric:
a) – reprezentarea separată; b) – spectrul rezultat.

Curba rezultantă a curenților de scurtcircuit nesimetric 3 are ca înfășurătoare curba 4, a cărei valoare inițială determină amplitudinea inițială a curenților de scurtcircuit brusc nesimetric (Fig. 6.87):

$$I_{mscn} = I''_{ms} + I_{ma} = 2 I''_{ms} . \quad (6.102)$$

În relația (6.102) s-a ținut cont de faptul că valoarea maximă a componentei aperiodice este egală cu valoarea maximă a curenților simetric supratranzitoriu la scurtcircuitul brusc:

$$I''_{ms} = I_{ma} . \quad (6.103)$$

Valoarea instantanee a componentei aperiodice a curenților de scurtcircuitul brusc poate fi scrisă dacă se ține cont de constanta de timp:

$$i_a = I_{ma} e^{-\frac{t}{T_{a3}}} . \quad (6.104)$$

Dacă se ia în considerare că momentul inițial al scurtcircuitului brusc nesimetric corespunde cu trecerea prin valoarea maximă a curenților de scurtcircuit simetric (relația 6.101), atunci se deduce ușor că momentul inițial al scurtcircuitului brusc nesimetric este decalat cu 90° în urma curenților de scurtcircuit brusc simetric când apare componenta aperiodică a carei valoare este egală și de semn contrar. Pe baza acestui raționament se deduce valoarea instantanee a curenților de scurtcircuit nesimetric astfel:

$$i_{scn} = i_{scs} + i_a = [(I''_{ms} - I'_{ms}) e^{-\frac{t}{T'_{a3}}} + (I'_{ms} - I_{ms}) e^{-\frac{t}{T_{a3}}} + I_{mo}] \sin(\omega t - 90^\circ) + I_{ma} e^{-\frac{t}{T_{a3}}} . \quad (6.105)$$

În momentul inițial, valoarea efectivă a curenților de scurtcircuit brusc nesimetric rezultat se calculează cu relația:

$$I_{scn}(t=0) = \sqrt{(I''_{sc})^2 + I_{ma}^2} , \quad (6.106)$$

deoarece diferă periodicitățile celor două componente și ținând cont de relația (6.103) se poate scrie:

$$I_{ma} = I''_{ms} = I''_{sc} \sqrt{2} . \quad (6.107)$$

Valorile din relația (6.107) se introduc în relația (6.106) și se obține:

$$I_{scn}(t=0) = \sqrt{(I''_{sc})^2 + (I''_{sc} \sqrt{2})^2} = \sqrt{3} I''_{sc} . \quad (6.108)$$

Se trage concluzia că în cazul scurtcircuitului brusc nesimetric, valoarea efectivă a componentei supratranzitorii (în momentul inițial) este mai mare de 1,73 ori față de scurtcircuitul brusc simetric. Depășirea cu 0,73 față de componenta supratranzitorie cazul scurtcircuitului simetric se amortizează după o aperiodică a cărei constantă de timp este T_a . De aceea, pentru un moment oarecare, expresia curenților rezultat în cazul scurtcircuitului brusc nesimetric se determină cu ajutorul relației:

$$I_{sc3r} = (I''_{sc3} - I'_{sc}) e^{-\frac{t}{T'_{a3}}} + (I'_{sc3} - I_{sc3}) e^{-\frac{t}{T_{a3}}} + I_{sc3} + 0,73 I'_{sc3} e^{-\frac{t}{T_{a3}}} . \quad (6.109)$$

Această creștere se datorează componentei aperiodice i_a din înfășurarea statorului care dă naștere unui flux magnetic fix în spațiu și care se amortizează cu aceeași constantă de timp T_a . Componentele alternative ale curenților ce se induc în înfășurările de amortizare și de excitație au aceeași frecvență ca și frecvența curenților din înfășurarea statorului (figurile 6.88 și 6.89).

6.12.4. SCHEMELE ECHIVALENTE LA SCURTCIRCUIT ALE MAȘINII SINCRONE

În cazul scurtcircuitului brusc se consideră că valoarea tensiunii electromotoare, produsă de fluxul de excitație, este o mărime constantă. În această situație, creșterea curentului în momentul scurtcircuitului se explică prin modificarea valorii reactanțelor generatorului sincron. Pentru a studia contribuția modificării reactanțelor asupra variației curentului de scurtcircuit se vor studia fenomenele ce se manifestă în timpul scurtcircuitului brusc pe baza reprezentării din figura 6.77 -b). Se constată că în primele momente ale scurtcircuitului, fluxul reacției indusului este obligat să parcurgă trei porțiuni ale circuitului magnetic legate în serie și caracterizate prin reluctanța rezultantă:

$$\mathfrak{R}''_{ad} = \mathfrak{R}_{ad} + \mathfrak{R}_{az} + \mathfrak{R}_{ex} . \quad (6.110)$$

Cele trei porțiuni ale circuitului magnetic sunt caracterizate prin următoarele reluctanțe care intervin în relația (6.110):

- a) - reluctanța traseului statoric în care se include și întrefierul (ponderea lui fiind determinantă);
- b) - reluctanța traseului pe care se închide fluxul de scăpări al înfășurării de amortizare;
- c) - reluctanța traseului pe care se închide fluxul de scăpări al înfășurării de excitație.

Se face precizarea că nu au fost luate în considerare reluctanțele porțiunilor din traseul ce străbate circuitul feromagnetic al polilor, deoarece au valori foarte mici în raport cu reluctanțele porțiunilor din traseul care se închide prin aer.

Dacă reluctanțele din relația (6.110) se înlocuiesc prin permeanțele corespunzătoare, atunci se obține relația:

$$\frac{1}{\Lambda''_{ad}} = \frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_{az}} + \frac{1}{\Lambda_{ex}} , \quad (6.111)$$

din care se deduce permeanța:

$$\Lambda''_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_{az}} + \frac{1}{\Lambda_{ex}}} . \quad (6.112)$$

Deoarece permeanța magnetică totală a fluxului produs de curent în momentul scurtcircuitului brusc depinde și de permeanța corespunzătoare a fluxului de scăpări al statorului, aceasta se determină cu relația:

$$\Lambda''_d = \Lambda_{\sigma} + \Lambda''_{ad} = \Lambda_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_{az}} + \frac{1}{\Lambda_{ex}}} . \quad (6.113)$$

Pentru o frecvență dată, la fiecare permeanță magnetică va corespunde o inductanță cu ajutorul căreia se determină reactanța corespunzătoare, încât relația (6.113) devine:

$$X''_d = X_{\sigma} + X''_{ad} = X_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{az}} + \frac{1}{X_{ex}}} . \quad (6.114)$$

Schema echivalentă la scurtcircuit trifazat brusc în cazul regimului supratranzitoriu, dedusă pe baza relației (6.113) este prezentată în figura 6.91 -a).

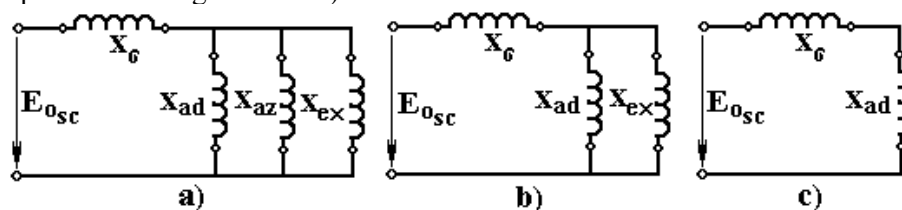


Fig. 6.91. Schemele echivalente ale mașinii sincrone la scurtcircuitul brusc.

Parametrii care intervin în relația (6.113) au următoarea semnificație:

X''_d - reactanța longitudinală supratranzitorie;

X_{σ} - reactanța de scăpări a statorului;

X''_{ad} - reactanța longitudinală supratranzitorie a reacției indusului;

X_{ad} - reactanța longitudinală a reacției indusului;

X_{az} - reactanța de scăpări a înfășurării de amortizare;

X_{ex} - reactanța de scăpări a înfășurării de excitație.

Componenta supratranzitorie a curentului de scurtcircuit, determinată de saltul de curent din înfășurarea de amortizare, se amortizează cel mai repede. În felul acesta, înfășurarea de amortizare este eliminată din participarea la scurtcircuit prin dispariția cauzei care împiedică închiderea fluxului de reacție a indusului prin conturul acestei înfășurări. În această situație, fluxul de reacție a indusului se stabilește numai pe traseul scăpărilor înfășurării de excitație, conform figurii 6.80 -a). Prin urmare, schema echivalentă a mașinii sincrone la scurtcircuit, corespunzătoare regimului tranzitoriu, este prezentată în figura 6.91 -b). Această schemă are aceeași

formă cu schema corespunzătoare generatoarelor sincrone care nu sunt prevăzute cu înfășurare de amortizare. Reactanța tranzitorie se determină cu relația:

$$X'_d = X_\sigma + X'_{ad} = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{ex}}}, \quad (6.114)$$

în care semnificația parametrilor este următoarea:

X'_d - reactanța longitudinală tranzitorie;

X_{ad} - reactanța longitudinală tranzitorie a reacției indusului.

Componenta tranzitorie a curentului de scurtcircuit, determinată de saltul de curent din înfășurarea de excitație, se amortizează într-un timp mai mare de 7 - 8 ori față de componenta supratranzitorie. În felul acesta se ajunge la scurtcircuitul stabil cu distribuția fluxului conform figurii 6.80 -b), iar schema echivalentă a mașinii sincrone la scurtcircuit, corespunzătoare acestui regim, este prezentată în figura 6.91-c). Reactanța sincronă în această situație, se calculează cu relația cunoscută (6.38) din regimul staționar:

$$X_d = X_\sigma + X_{ad}. \quad (6.115)$$

6.12.5. CURENTUL DE SCURTCIRCUIT BRUSC TRIFAZAT

Valoarea cea mai importantă a curentului de scurtcircuit brusc trifazat o constituie valoarea efectivă în momentul inițial, definită cu ajutorul relației (6.108) și corespunde situației cele mai dezavantajoase:

$$I_{sc3(t=0)} = \sqrt{3} I''_{sc3}. \quad (6.116)$$

În relație s-a introdus indicele "3" pentru a preciza că valoarea se referă la cazul trifazat. Componenta simetrică a curentului de scurtcircuit brusc trifazat se determină ca și curentul de scurtcircuit stabil (paragraful 6.7.2 și Fig. 6.92), cu singura diferență că în locul reactanței sincrone longitudinale X_d se introduce reactanța sincronă longitudinală supratranzitorie X''_d :

$$I''_{sc3} = \frac{E_{0sc}}{X''_d}, \quad (6.117)$$

iar valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit brusc trifazat în momentul inițial este:

$$I''_{sc3(t=0)} = 1,73 E_{0sc} / X''_d, \quad (6.118)$$

E_{0sc} fiind tensiunea electromotoare indusă de fluxul rezultat, pentru o anumită valoare a curentului de excitație.

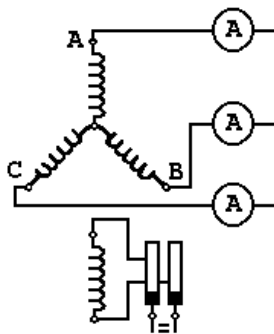


Fig. 6.92. Scurtcircuitul brusc trifazat simetric.

6.12.6. CURENTUL DE SCURTCIRCUIT BRUSC BIFAZAT

Scurtcircuitul bifazat se încadrează în categoria scurtcircuitelor nesimetrice, studiul făcându-se cu ajutorul metodei componentelor simetrice. Fenomenul se desfășoară ca în cazul scurtcircuitului trifazat, încât determinarea curentului se face cu o relație similară relației (6.109) în care se folosește indicele "2" atât pentru curenți cât și pentru constante de timp:

$$I_{sc2r} = (I''_{sc2} - I'_{sc2}) e^{-\frac{t}{T''_{a2}}} + (I'_{sc2} - I_{sc2}) e^{-\frac{t}{T'_{a2}}} + I_{sc2} + 0,73 I''_{sc2} e^{-\frac{t}{T_{a2}}}. \quad (6.119)$$

Schema electrică de principiu a mașinii sincrone, în cazul scurtcircuitului bifazat, este dată în figura 6.93.

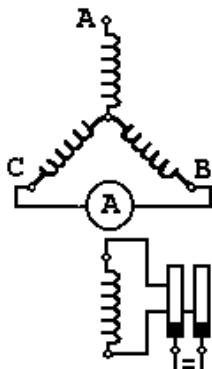


Fig. 6.93. Scurtcircuitul brusc bifazat.

Se va defini un sistem direct, unul invers și unul homopolar conform relațiilor cunoscute:

$$\begin{aligned} \underline{A}_d &= \frac{1}{3} (\underline{A}_A + a \underline{A}_B + a^2 \underline{A}_C); \\ \underline{A}_i &= \frac{1}{3} (\underline{A}_A + a^2 \underline{A}_B + a \underline{A}_C); \\ \underline{A}_0 &= \frac{1}{3} (\underline{A}_A + \underline{A}_B + \underline{A}_C), \end{aligned} \quad (6.120)$$

în care se pun condițiile:

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_C; \quad \underline{I}_A = 0; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_C = 0, \quad (6.121)$$

deduse din schema de scurtcircuit.

Utilizându-se relațiile (6.120) se determină legătura între curenții de secvență directă, inversă, homopolară și curenții reali:

$$\begin{aligned} \underline{I}_d &= \frac{1}{3} (a - a^2) = j \frac{1}{\sqrt{3}}; \\ \underline{I}_i &= \frac{1}{3} (a^2 - a) = -j \frac{1}{\sqrt{3}} \Rightarrow \underline{I}_d = \underline{I}_i; \\ \underline{I}_0 &= 0, \end{aligned} \quad (6.122)$$

iar pentru tensiuni:

$$\underline{U}_d = \underline{U} / 3; \quad \underline{U}_i = \underline{U} / 3; \quad (6.123)$$

Dacă se ține cont de relațiile:

$$\begin{aligned} \underline{U}_d &= \underline{E}_0 - \underline{Z}_d \underline{I}_d; \\ \underline{U}_i &= -\underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i, \end{aligned} \quad (6.124)$$

și se neglijează rezistențele din expresiile impedanțelor:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_d &= R + j X_d \approx j X_d; \\ \underline{Z}_i &= R + j X_2 \approx j X_2; \\ \underline{Z}_0 &= R + j X_0 \approx j X_0, \end{aligned} \quad (6.125)$$

atunci se obține, pentru tensiunea electromotoare indusă, relația:

$$\underline{E}_0 = j X_d \underline{I}_d - j X_2 \underline{I}_i. \quad (6.126)$$

Prin înlocuirea componentelor de secvență directă și inversă pentru curenți, conform relației (6.122), se obține:

$$\underline{E}_0 = j (X_d + X_2) \frac{I}{\sqrt{3}}, \quad (6.127)$$

din care se deduce valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit bifazat și respectiv valoarea curentului de scurtcircuit bifazat în momentul inițial:

$$I_{sc2} = \frac{\sqrt{3} E_0}{X_d + X_2}; \quad I_{sc2(t=0)} = 1.73 \frac{\sqrt{3} E_0}{X_d + X_2}. \quad (6.128)$$

6.12.7. CURENTUL DE SCURTCIRCUIT BRUSC MONOFAZAT

Scurtcircuitul monofazat se încadrează, ca și scurtcircuitul bifazat, în categoria scurtcircuitelor nesimetrice. Fenomenul se desfășoară ca în cazul scurtcircuitului trifazat, încât determinarea curentului se face cu o relație similară relației (6.109) în care se folosește indicile "1" atât pentru curenți cât și pentru constante de timp:

$$I_{sc1r} = (I''_{sc1} - I'_{sc1}) e^{-\frac{t}{T''_{a1}}} + (I'_{sc1} - I_{sc1}) e^{-\frac{t}{T'_{a1}}} + I_{sc1} + 0,73 I''_{sc1} e^{-\frac{t}{T_{a1}}}. \quad (6.129)$$

Schema electrică de principiu a mașinii sincrone, în cazul scurtcircuitului monofazat este dată în figura 6.94.

Utilizând relațiile (6.120) și condiția corespunzătoare schemei scurtcircuitului monofazat:

$$I_B = I_C = 0; \quad I_A = I_{sc1}, \quad (6.130)$$

se deduce relația:

$$I_d = I_i = I_0 = I_{sc1} \frac{1}{3}. \quad (6.131)$$

Pe baza relației:

$$\underline{E}_0 = \underline{Z}_d \underline{I}_d + \underline{Z}_i \underline{I}_i + \underline{Z}_0 \underline{I}_0, \quad (6.132)$$

și ținând cont de relațiile (6.125), (6.131) se obține:

$$\underline{E}_0 = j \frac{I_{sc1}}{3} (X_d + X_2 + X_0), \quad (6.133)$$

din care se determină valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit monofazat și respectiv valoarea curentului de scurtcircuit monofazat în momentul inițial:

$$I_{sc1} = \frac{3 E}{X_d + X_2 + X_0}; \quad I_{sc1(t=0)} = \frac{3 E}{X''_d + X_2 + X_0}. \quad (6.134)$$

Dacă generatorul sincron nu prezintă înfășurare de amortizare, atunci în relațiile (6.128) și (6.134) reactanța supratranzitorie longitudinală - X_d'' - este înlocuită cu reactanța longitudinală tranzitorie - X_d' .

6.13. PARAMETRII MAȘINII SINCRONE

6.13.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Funcționarea mașinilor sincrone este definită de impedanțele corespunzătoare regimurilor: *staționar, tranzitoriu și supratranzitoriu*.

Dacă se ține cont de faptul că valoarea rezistenței indusului este redusă și poate fi neglijată atunci cele trei regimuri de funcționare sunt influențate de mărimile reactanțelor. La stabilirea valorii reactanțelor este necesară luarea în considerare și a gradului de saturație care modifică mărimea acestora. Reactanțele se exprimă în ohmi sau în mărimi relative, pe baza raportului:

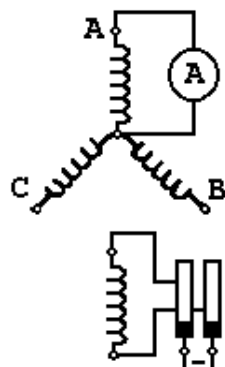


Fig. 6.94. Scurtcircuitul brusc monofazat.

$$X^* = \frac{X I_N}{U_N} = \frac{X}{X_N}, \quad (6.135)$$

în care I_N și U_N sunt mărimile nominale pe fază, iar X_N este reactanța corespunzătoare regimului de funcționare nominal.

Deoarece reactanțele sistemului invers și homopolar al fazelor, X_2 și X_0 , corespund fluxurilor de scă-pări, se poate considera că ele rămân constante, independent de caracterul scurtcircuitului.

În tabelul 6.1 sunt date valorile principalilor parametri ai mașinilor sincrone de construcție normală re-actanțe în mărimi raportate, constante de timp în secunde și rezistența unui circuit de fază în mărimi raportate [9].

Tabelul 6.1

Valori numerice ale parametrilor mașinilor sincrone

	Turbogeneratoare		Hidrogeneratoare		Compensatoare
	p = 1	p = 2	cu amortizor	fără amortizor	
X_d^*	$\frac{1,6}{0,9 \div 2,0}$	$\frac{1,2}{0,9 \div 1,5}$	$\frac{1,2}{0,7 \div 1,6}$	$\frac{1,2}{0,9 \div 1,6}$	$\frac{1,8}{1,5 \div 2,2}$
X_q^*	$\frac{1,35}{0,85 \div 1,90}$	$\frac{1,5}{0,85 \div 1,15}$	$\frac{0,75}{0,45 \div 1,0}$	$\frac{0,75}{0,45 \div 1,0}$	$\frac{1,1}{0,9 \div 1,4}$
$X_d'^*$	$\frac{0,24}{0,14 \div 0,34}$	$\frac{0,24}{0,2 \div 0,28}$	$\frac{0,37}{0,2 \div 0,5}$	$\frac{0,35}{0,2 \div 0,45}$	$\frac{0,4}{0,3 \div 0,6}$
$X_d''^*$	$\frac{0,15}{0,1 \div 0,24}$	$\frac{0,15}{0,12 \div 0,17}$	$\frac{0,22}{0,13 \div 0,3}$	$\frac{0,3}{0,18 \div 0,4}$	$\frac{0,25}{0,18 \div 0,38}$
$X_q''^*$	$(1 \div 1,3) X_d''^*$	—	$(1 \div 1,1) X_d''^*$	$\cong 2,3 X_d''^*$	$\cong X_d''^*$
X_2^*	$\cong 1,22 X_d''^*$	$\cong 1,22 X_d''^*$	$\cong 1,05 X_d''^*$	$(1,4 \div 1,6) X_d''^*$	$\cong X_d''^*$
X_0^*	$0,01 \div 0,08$	$0,015 \div 0,14$	$0,02 \div 0,2$	$0,04 \div 0,25$	$0,02 \div 0,25$
T_a	$\frac{5,5}{3 \div 12}$	$\frac{6,2}{4 \div 9,2}$	$\frac{5,6}{2 \div 9}$	$\frac{5,6}{2 \div 9}$	$\frac{8}{5 \div 14}$
T_a'	$\frac{0,7}{0,4 \div 1,6}$	$\frac{1,1}{0,9 \div 1,6}$	$\frac{1,3}{0,8 \div 2,5}$	$\frac{1,3}{0,8 \div 2,5}$	$\frac{1,5}{3 \div 2,8}$
T_a''	$\frac{0,06}{0,03 \div 0,18}$	$\frac{0,04}{0,02 \div 0,08}$	$\frac{0,03}{0,01 \div 0,08}$	—	$\frac{0,03}{0,02 \div 0,08}$
T_{az}	$\frac{0,32}{0,04 \div 0,5}$	$\frac{0,2}{0,15 \div 0,35}$	$\frac{0,3}{0,1 \div 0,5}$	$\frac{0,17}{0,1 \div 0,3}$	$\frac{0,17}{0,1 \div 0,3}$
R^*	$0,25 \div 0,04$	$0,03 \div 0,045$	$0,012 \div 0,02$	$0,03 \div 0,045$	$0,025 \div 0,07$

Reactanțele pentru diversele regimuri pot fi calculate utilizând caracteristica de mers în gol și caracte-risticile de scurtcircuit utilizând relațiile deduse pentru diversele tipuri de scurtcircuite (Fig. 6.95). Sunt repre-zentate patru caracteristici la scurtcircuit:

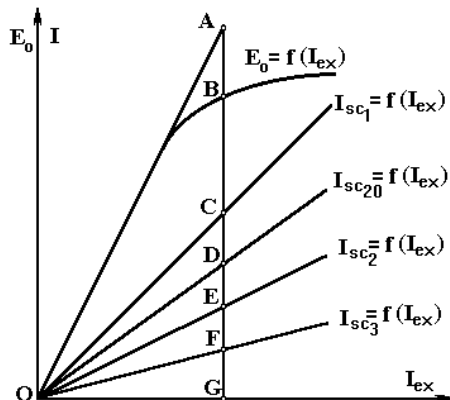


Fig. 6.95. Caracteristica de mers în gol și caracteristicile de scurtcircuit.

- scurtcircuit monofazat;
- scurtcircuit bifazat la neutru;
- scurtcircuit bifazat;
- scurtcircuit trifazat simetric.

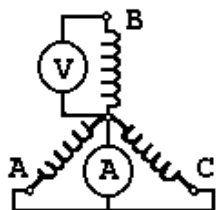
Valoarea nesaturată a reactanței sincrone longitudinale este dată de raportul:

$$x_d = \frac{E_0}{I_{sc3}} = \frac{\overline{AG}}{\overline{FG}}, \quad (6.136)$$

dintre tensiunea electromotoare de mers în gol (luată pe prelungirea porțiunii liniare a caracteristicii de mers în gol), corespunzătoare cu-rentului de excitație $I_{ex} = OG$ și curentul de scurtcircuit trifazat, deter-minat de același curent de excitație.

Reactanța sistemului invers al fazelor se calculează astfel:

$$X_2 = \frac{\sqrt{3} E_0}{I_{sc2}} - X_d = \overline{AG} \left(\frac{\sqrt{3}}{\overline{EG}} - \frac{1}{\overline{FG}} \right), \quad (6.137)$$



segmentele din relație fiind luate din figura 6.95, iar reactanța sistemului homopolar se determină cu relația:

$$X_0 = \frac{3E_0}{I_{sc1}} - (X_d + X_2) = \frac{3E_0}{I_{sc1}} - \frac{\sqrt{3}E_0}{I_{sc2}} = \overline{AG} \left(\frac{\sqrt{3}}{CG} - \frac{1}{EG} \right). \quad (6.138)$$

Reactanța sistemului homopolar se poate determina printr-o încercare de scurtcircuit bifazat la neutru, conform schemei din figura 6.96, cu relația:

$$x_0 = \frac{U_{0B}}{I_{sc20}} = \frac{U_{0B}}{DG}, \quad (6.139)$$

Fig. 6.96. Scurtcircuitul bifazat la neutru.

în care U_{0B} este tensiunea fazei libere iar I_{sc20} este curentul de scurtcircuit care circulă prin ampermetrul montat între nul și conductorul ce scurtcircuitează cele două faze (segmentul DG - Fig. 6.96).

6.13.2. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A REACTANȚELOR

Pentru *determinarea reactanțelor sincrone longitudinale și transversale* se folosește *metoda alunecării*. Acest procedeu constă în antrenarea rotorului la o viteză (inferioară sau superioară) apropiată de viteza de sincronism. Înfășurarea indusului se alimentează de la o sursă de tensiune reglabilă (Fig. 6.97) cu tensiune redusă ($0,25 \div 0,3$ din tensiunea nominală) pentru a evita saturația circuitului magnetic și eventala apariție a unei tensiuni periculoase în înfășurarea de excitație la bornele căreia este conectat un voltmetru.

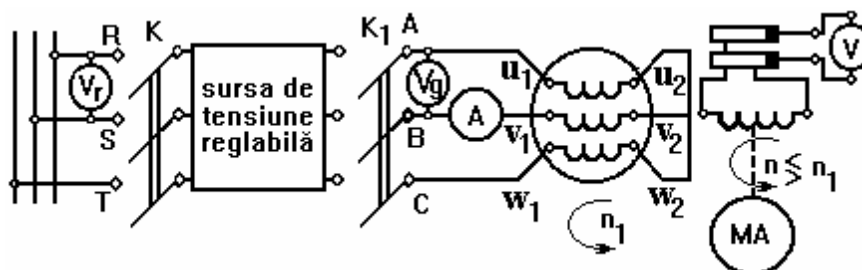


Fig. 6.97. Schema pentru determinarea reactanțelor sincrone (longitudinală și transversală).

Când se alimentează înfășurarea indusului, aceasta crează un câmp învârtitor care induce în înfășurarea de excitație (rotorul fiind în repaus) o tensiune a cărei frecvență este egală cu frecvența tensiunii de alimentare. Se antrenează rotorul în sensul de rotație pentru care tensiunea la inele scade. Acesta este indiciul care stabilește că rotorul este antrenat în același sens cu sensul câmpului învârtitor. În apropierea vitezei de sincronism, tensiunea la inele se reduce considerabil deoarece scade frecvența, iar ampermetrul montat pe un circuit de fază începe să oscileze între două valori limită, I_{min} și I_{max} conform figurii 6.98. Oscilațiile se datorează modificării lente a unghiului dintre axa câmpului învârtitor și axa polilor inductorilor. Când cele două axe se suprapun întrefierul este minim, iar curentul absorbit are valoarea I_{min} deoarece reactanța corespunzătoare este maximă. Este cazul corespunzător reactanței sincrone longitudinale. Dacă sursa este de putere redusă, atunci odată cu oscilația curentului va oscila voltmetrul care indică tensiunea aplicată înfășurării statorice încât *reactanța sincronă longitudinală* se determină cu relația:

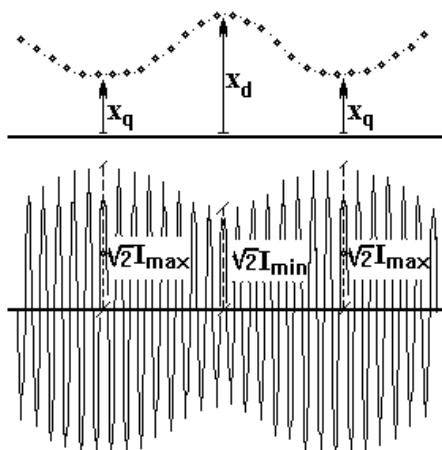


Fig. 6.98. Oscilația curentului din stator în apropierea vitezei de sincronism.

$$x_d = \frac{U_{max}}{\sqrt{3} I_{min}}. \quad (6.140)$$

Când cele două axe sunt în quadratură, întrefierul este maxim iar curentul absorbit are valoarea I_{max} deoarece reactanța corespunzătoare este minimă. Este cazul corespunzător *reactanței sincrone transversale*:

$$x_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3} I_{max}}. \quad (6.141)$$

Determinarea *reactanței sincrone transversale* se poate face prin *metoda excitației negative*. În acest scop se realizează montajul din figura 6.99 pentru pornirea în asincron a motorului sincron folosind, pentru limitarea curentului la pornire, o sursă de tensiune redusă.

Înfășurarea de excitație a mașinii sincrone este alimentată de la excitatoarea Ex printr-un inversor K_e , care permite schimbarea polarității curentului de excitație. Pentru limitarea efectului câmpului monofazat în timpul pornirii, se introduce în circuitul de excitație o rezistență suplimentară R_s care se scurtcircuituează după sincronizare prin întrerupătorul K_s .

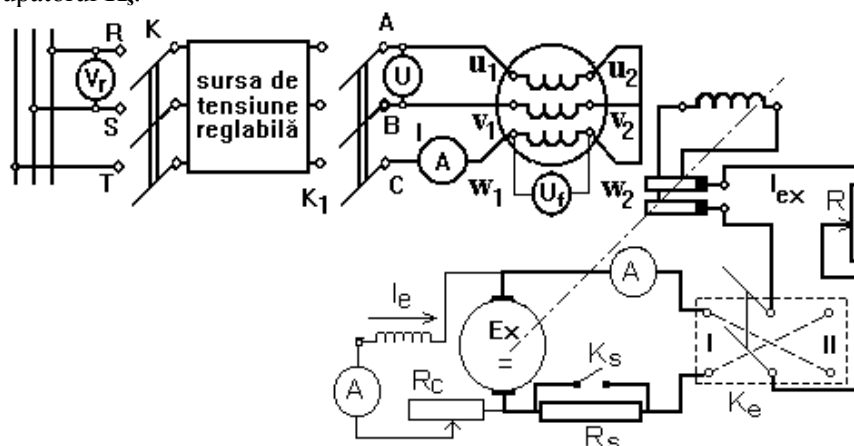


Fig. 6.99. Schema pentru determinarea reactanței sincrone transversale prin metoda excitației negative.

Se pornește motorul sincron în asincron conform capitolului 6.8, iar după sincronizare se reduce curentul de excitație pînă la zero, iar apoi se inversează sensul acestuia prin schimbarea poziției inversorului. Se mărește valoarea curentului de excitație și se determină curentul din înfășurarea statorului în momentul decroșării (ieșirii din sincronism), tensiunea menținându-se constantă. Reactanța sincronă transversală se determină ca raport dintre tensiunea pe fază U_f și curentul din stator în momentul ieșirii din sincronism:

$$x_q = \frac{U_f}{I}, \quad (6.142)$$

iar valoarea calculată poate fi influențată de saturație.

Determinarea *reactanței sistemului invers al fazelor* x_2 se realizează utilizând metoda frânei asincrone, conform montajului din figura 6.98.

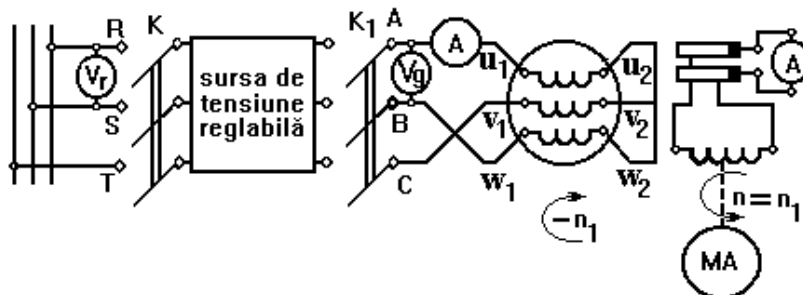


Fig. 6.98. Schema pentru determinarea reactanței inverse.

Față de montajul pentru determinarea reactanțelor directe, la alimentarea înfășurării statorului se inversează două faze pentru a pune în evidență câmpul invers, iar rotorul se antrenează în același sens la viteza de sincronism. La înle se leagă în locul voltmetrului un ampermetru, realizându-se condiții apropiate de cele reale când înfășurarea de excitație se comportă față de câmpul invers ca înfășurarea secundară a unui transformator, scurtcircuitată de sursa de curent continuu.

Reactanța sistemului invers este dată de relația:

$$x_2 = \frac{U}{\sqrt{3} I}. \quad (6.143)$$

Pentru determinarea *reactanței homopolare* x_0 se alimentează înfășurarea statorului, legată cu cele trei faze în paralel (a) sau în triunghi deschis (b), cu o tensiune monofazată conform montajului din figura 6.99. De această dată rotorul rămâne în repaus, înfășurarea de excitație fiind scurtcircuitată.

În cazul în care se folosește schema din figura 6.99 -a), când înfășurările statorului sunt legate în paralel, reactanța homopolară se determină cu relația:

$$x_0 = \frac{3 U}{I}, \quad (6.144)$$

în care tensiunea U se măsoară cu voltmetrul V_g , iar curentul I este măsurat cu ajutorul ampermetrului înseriat cu cele trei înfășurări.

Dacă se folosește schema din figura 6.99 -b), când înfășurările statorului sunt legate în serie, reactanța homopolară se determină cu relația:

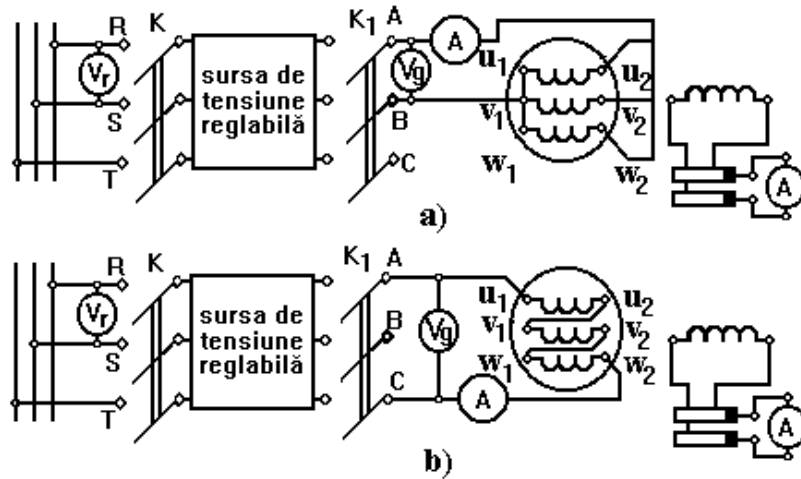


Fig. 6.99. Scheme pentru determinarea reactanței homopolare.

$$x_0 = \frac{U}{3I}, \quad (6.145)$$

în care tensiunea U se măsoară cu voltmetrul V_g iar curentul I este măsurat cu ajutorul ampermetrului înseriat cu cele trei înfășurări.

La mașinile cu poli aparenti, reactanța homopolară variază odată cu modificarea poziției rotorului față de înfășurările statorului între două limite corespunzătoare reactanței homopolare longitudinale și transversale:

$$x_{od} = \frac{U}{3I_{\max}}; \quad x_{oq} = \frac{U}{3I_{\min}}. \quad (6.146)$$

Deoarece diferența între reactanțele homopolare pe cele două direcții este mică, se obișnuiește să se folosească în calcule o valoare unică definită prin media aritmetică a celor două reactanțe:

$$x_0 = \frac{x_{oq} + x_{od}}{2}, \quad (6.147)$$

fără să afecteze studiul comportamentului mașinii în regimuri asimetrice.

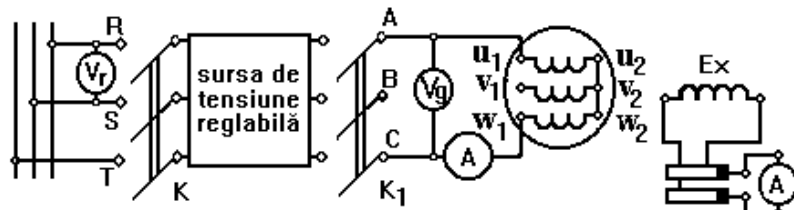


Fig. 6.100. Schemă pentru determinarea reactanțelor supratranzitorii.

Pentru determinarea reactanțelor supratranzitorii longitudinale și transversale se folosește montajul din figura 6.100, în care cele două faze ale înfășurării statorului sunt alimentate în monofazat, de la o sursă de tensiune reglabilă, cu tensiune redusă astfel încât să nu fie depășit curentul nominal. Dacă poziția rotorului corespunde reactanței supratranzitorii longitudinale, curentul absorbit de înfășurarea statorică este maxim, deoarece în această poziție înfășurările de excitație și de amortizare se comportă ca spire în scurtcircuit față de fluxul indusului. Prin rotirea manuală a rotorului se caută poziția pentru care curentul absorbit este minim. Această poziție corespunde reactanței supratranzitorii transversale. La această încercare înfășurarea de excitație este scurtcircuitată printr-un ampermetru.

Cele două reactanțe au expresiile:

$$x''_d = \frac{U}{2I_{\max}}; \quad x''_q = \frac{U}{I_{\min}}.$$

Modul de variație al curentului și reactanțelor supratranzitorii în raport cu unghiul de rotație α al rotorului în raport cu axa înfășurării alimentate este prezentat în figura 6.101.

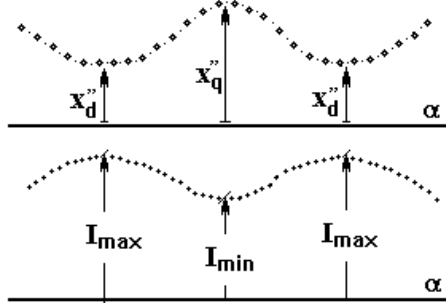


Fig. 6.101. Variația curentului din stator la determinarea reactanțelor supratranzitorii.