

MAȘINI SPECIALE SINCRONE

În prezent, există o mare diversitate de mașini electrice speciale de tip sincron, dintre care se pot menționa:

- mașini sincrone excitate cu magneți permanenți;
- mașini sincrone reactive;
- motoare pas cu pas;
- motoare sincrone cu histerezis;
- mașini sincrone cu comutație statică.

1. Mașini sincrone cu magneți permanenți

În ultima vreme, o dată cu dezvoltarea producției de magneți permanenți cu performanțe îmbunătățite, s-a trecut, pe scara largă, la folosirea lor în excitarea mașinilor sincrone. Această soluție conduce la o serie de avantaje importante cum ar fi:

- construcție simplă – fără contacte alunecatoare și înfășurare de excitație;
- fiabilitate sporită;
- dimensiuni și greutatea specifice reduse;
- randamente superioare.

În anumite condiții motoarele cu magneți permanenți pot funcționa la $\cos\varphi = 1$ sau chiar capacitiv (în regim de *compensator sincron*, când se comporta ca o baterie de condensatoare, livrând putere reactivă) ceea ce constituie un avantaj important în comparație cu motoarele asincrone și, chiar cu cele sincrone reactive. Motoarele cu magneți permanenți se utilizează în acționări de viteză reglabilă, fiind alimentate prin convertizoare de frecvență: în industria chimică sau textilă, în medicină, în cinematografie, în sisteme automate, etc.

Construcția mașinilor sincrone cu magneți permanenți

Statorul mașinilor sincrone cu magneți permanenți este similar cu al mașinilor asincrone, posedând o înfășurare mono, bi, sau trifazată. Aceasta înfășurare este introdusă în creștături sau poate fi concentrată în jurul unor poli aparenti, mai ales la generatoarele sincrone.

Rotorul prezintă o mare diversitate constructivă, din care se pot distinge variantele:

- în construcție normală (cu poli aparenti și colivie de pornire) – figura 4.1;
- cu poli gheară – figura 4.2.

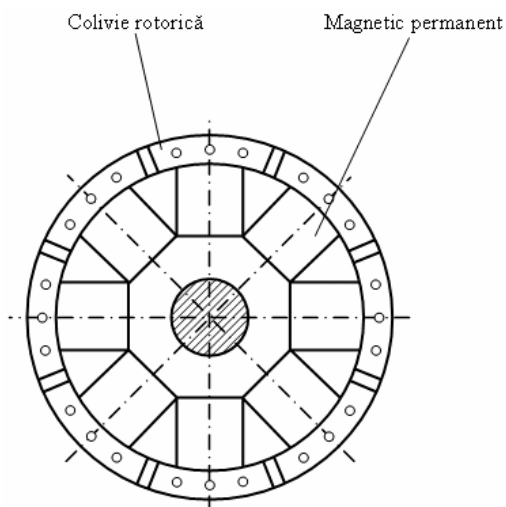


Fig. 4.1. Rotor cu poli aparenti și colivie de pornire.

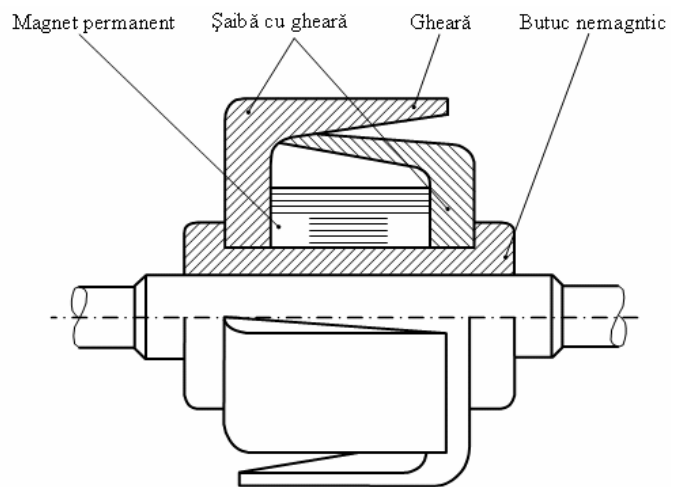


Fig. 4.2. Rotor cu poli gheară.

În figura 4.1, roata polară formată din magneți permanenți este plasată pe un butuc neferomagnetic purtând la exterior o coroană lamelară, în care sunt turnate bare din aluminiu, cupru sau aliaje ale acestuia, bare ce sunt scurtcircuitate prin inele frontale.

În figura 4.2, magnetul permanent are o forma de coroană cilindrică, magnetizată axial. Cele două șaibe feromagnetice prezintă gheare care constituie polii mașinii. Câmpul magnetic iese dintr-o gheara N , traversează întrefierul, o porțiune a statorului, alt întrefier și se închide prin gheara vecină S .

Prezența magnetului axial exclude posibilitatea demagnetizării sale de către câmpul de reacție al statorului. Ghearele masive permit pornirea acestor motoare, datorită curenților turbionari induși, întocmai ca la motoarele asincrone cu rotor masiv.

Construcția în formă de gheare este adoptată și la unele alternatoare de autovehicule, cu diferența că în locul magnetului permanent se folosește o înfășurare concentrată, cu spire realizate concentric cu butucul, înfășurarea respectivă fiind alimentată prin intermediul unui sistem de inele și perii de la un acumulator. Curentul de excitație este reglat, menținut între anumite limite, funcție de turație și de sarcină, de către un regulator automat.

Caracteristicile mașinilor sincrone cu magneți permanenți

Spre deosebire de mașinile sincrone clasice, care sunt utilizate, prin excelență, în regim de generator, mașinile sincrone excitate cu magneți permanenți sunt utilizate, cu preponderență, ca motoare. Cea mai importantă caracteristică a acestor mașini este reprezentată de *caracteristica unghiulară*, $M = f(\theta)$.

La fel ca la mașinile sincrone clasice (pentru simplitate, în analiză, se va considera cazul mașinilor sincrone cu poli înecați), dacă $\theta_0 \leq \theta$ (θ_0 fiind unghiul inițial de poziție al rotorului, legat de unghiul intern al mașinii, δ prin relația:

$$\theta_0 = -\frac{\pi}{2} - \delta, \quad (4.1)$$

și neglijând rezistența înfășurării statorice ($R = 0$), pentru *cuplul electromagnetic* dezvoltat de motor (considerat trifazat) se obține:

$$M = \frac{3 \cdot U \cdot E_{f0}}{\omega \cdot X_s} \sin|\theta_0|, \quad (4.2)$$

în care: U este tensiunea de fază statorică, E_{f0} este tensiunea indusă prin mișcarea magnetului permanent, ω reprezintă pulsația curenților statorici, iar X_s reprezintă reactanța sincronă.

Pe baza relației (4.2) se pot trasa caracteristicile unghiulare ale motorului. În realitate, valoarea maximă a cuplului sincron (exprimat de relația (4.2)) depinde, într-o măsură importantă, de valoarea rezistenței statorice. Se notează cu:

$$m = \frac{M}{M_{\max}}, \quad (4.3)$$

cuplul relativ la cuplul maxim. Cuplul maxim se obține pentru $\delta = 0$ și $E_{f0} = U_N$, și are expresia:

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot U_N^2}{\omega \cdot X_s}. \quad (4.4)$$

Expresia exactă a cuplului electromagnetic (când nu se neglijează rezistența R) este:

$$M = \frac{3}{\omega} \cdot \frac{U \cdot E_{f0} \cdot (R \cdot \cos \theta_0 - X_s \cdot \sin \theta_0) - R \cdot E_{f0}^2}{R^2 + X_s^2}. \quad (4.5)$$

Notând $b = R/X_s$, rezultă expresia cuplului relativ (specific):

$$m = \frac{b \cdot \cos|\theta_0| + \sin|\theta_0| - b}{1 + b^2}. \quad (4.6)$$

Valoarea maximă a cuplului m se obține pentru $b = \operatorname{ctg}|\theta_0|$ și are expresia:

$$m_{\max} = \frac{1 - \frac{b}{\sqrt{1 + b^2}}}{\sqrt{1 + b^2}}. \quad (4.7)$$

Pentru $b = 0$, rezultă:

$$m = \sin|\theta_0|, \quad (4.8)$$

iar pentru $\theta_0 = 0$, se obține $m = 0$, indiferent de valorile lui b .

În figura 4.3, sunt reprezentate caracteristicile unghiulare $m = f(\theta_0)$ pentru regimul de funcționare ca motor, pentru diferite valori ale lui b .

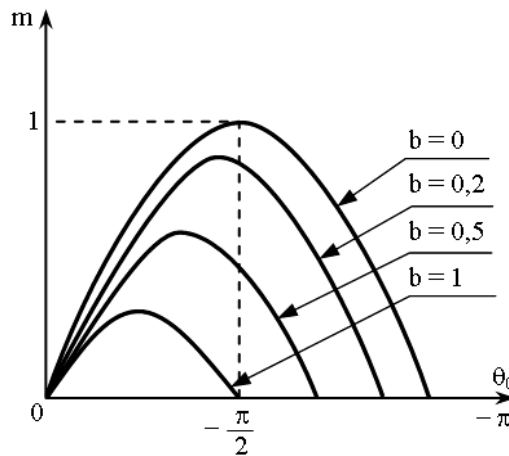


Fig. 4.3. Caracteristicile unghiulare ale mașinii sincrone cu magneți permanenți.

După cum se observă, cuplul maxim și zona de funcționare stabilă se diminuează odată cu creșterea rezistenței statorice.

Din relația (4.5) se mai deduce faptul că, pentru rezistențe statorice mici, cuplul maxim crește odată cu E_{f0} , adică se obțin performanțe bune dacă magneții permanenți posedă inducții remanente cât mai mari. Motoarele cu magneți permanenți lucrează cu o capacitate de suprasarcină de 1,5 - 2, dacă unghiul $|\theta_0|$ are valori de $30^0 - 40^0$.

2. Tahogeneratoare sincrone

Satorul tahogeneratorului sincron cuprinde o înfășurare monofazată, de obicei, plasată în creștături sau concentrată în jurul unor poli aparenti. Rotorul, cu poli din magneți permanenți de polarități alternative (figura 4.4), este solidar cu organul mobil a cărui viteză trebuie evaluată.

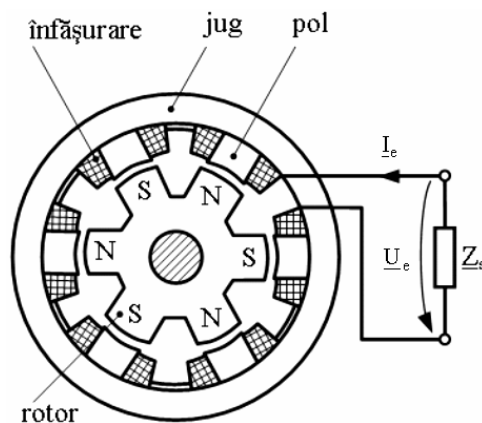


Fig. 4.4. Tahogeneratorul sincron.

Valoarea efectivă a tensiunii induse, la gol, în înfășurarea statorică, este:

$$E_{f0} = 4,44 \cdot f \cdot k_b \cdot N \cdot \Phi_e = 4,44 \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot k_b \cdot N \cdot \Phi_e = k_e \cdot n = k'_e \cdot \Omega, \quad (4.9)$$

adică este proporțională cu viteza, în condițiile în care fluxul de excitație, Φ_e , rămâne constant.

La funcționarea în sarcină, (caracterizată prin impedanța Z_s), apare o abatere de la liniaritate a caracteristicii $U_e = f(n)$, pe de o parte datorită faptului că intervine reacția indusului și căderea de tensiune internă, iar pe de alta parte, datorită faptului că tensiunea indusă și reactanțele interne și de sarcină depind de viteza de rotație n .

Ecuția tensiunilor se poate scrie în formă simplificată:

$$\underline{U}_e = \underline{E}_{f0} + \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_e, \quad (4.10)$$

în care Z_i reprezintă impedanța internă a tahogeneratorului, iar I_e este curentul de ieșire (de sarcină defazat față de \underline{E}_{f0} la un unghi de aproximativ π radiani. Astfel se poate aprecia că, în sarcină, modulul tensiunii \underline{U}_e scade față de situația de mers în gol.

Ținând cont de expresia curentului de sarcină:

$$\underline{I}_e = -\frac{\underline{E}_{f0}}{\underline{Z}_i + \underline{Z}_s}, \quad (4.11)$$

rezultă:

$$\underline{U}_e = -\underline{Z}_s \cdot \underline{I}_e = \frac{\underline{E}_{f0}}{1 + \frac{\underline{Z}_i}{\underline{Z}_s}} = \frac{k'_e}{1 + \frac{R_i + j \cdot p \cdot \Omega \cdot L_i}{R_s + j \cdot p \cdot \Omega \cdot L_s}}, \quad (4.12)$$

în care R_i, L_i , sunt parametrii înfășurării statorului, iar R_s, L_s , sunt parametrii sarcinii. În cele expuse mai sus, s-a considerat \underline{E}_{f0} drept origine a fazelor.

Expresia (4.12) arată că erorile de liniaritate sunt, în anumite condiții, destul de pronunțate, ceea ce face ca *aceste tahogeneratoare să fie folosite numai pentru măsurarea vitezei*, fără a fi folosite în sisteme automate. Demagnetizările accidentale ale magneților permanenți constituie o nouă sursă de erori ale tahogeneratoarelor sincrone.

3. Mașini sincrone reactive

Mașinile sincrone *reactive* sau *de reluctanță* sunt acele mașini la care una din armături, de obicei rotorul, nu prezintă înfășurare de excitație. Cuplul mașinii reactive se datorește neuniformității rotorului sau diferenței dintre reluctanțele mașinii pe cele două axe d și q . Absența înfășurării de excitație conduce la unele avantaje constructive (cost redus) precum și la unele avantaje în exploatare (absența contactelor perii – inele). În regim de motor, aceste mașini dezvoltă puteri de la zeci de watti la zeci de kilowatti, la factor de putere, gabarite și randamente apropiate de cele ale mașinilor asincrone. Domeniile de utilizare sunt diverse: la înregistrarea și redarea sunetelor, la instalații de radiolocație, în aparatura medicală, cinematografie, tehnica de calcul, pompe etalon în industria chimică, în industria textilă, ceasornicărie, etc.

Motoarele reactive pot fi monofazate sau trifazate, ultimele căpătând, în ultima vreme, o largă răspândire, fiind comandate și cu comutatoare statice de frecvență. Din punct de vedere al construcției, aceste motoare sunt asemănătoare cu cele asincrone, dar *rotorul prezintă poli aparenti fără înfășurare de excitație*. Statorul se execută, de obicei, în două variante: *cu înfășurare distribuită în creștături sau cu înfășurare concentrată*.

Construcția motoarelor sincrone reactive (cu reluctanță variabilă)

Pentru a se obține un factor de putere și un cuplu electromagnetic cât mai mare este necesar ca raportul X_d/X_q să aibă o valoare cât mai mare în raport cu unitatea. Spre exemplu, pentru $X_d/X_q = 5$, $(\cos \varphi)_{max} = 0,67$, în timp ce pentru $X_d/X_q = 1,5$ (în cazul mașinilor clasice cu excitație), $(\cos \varphi)_{max} = 0,2$. Prin aceasta se explică eforturile constructorilor de a mări raportul X_d/X_q astfel încât motorul sincron reactiv să poată concura cu alte tipuri de motoare de curent alternativ.

În acest scop se apelează la construcții de felul celor din figura 4.5, b, c, d spre deosebire de construcția normală prezentată în figura 4.5, a (pentru patru poli și cu bare formând o colivie necesară asigurării cuplului de pornire).

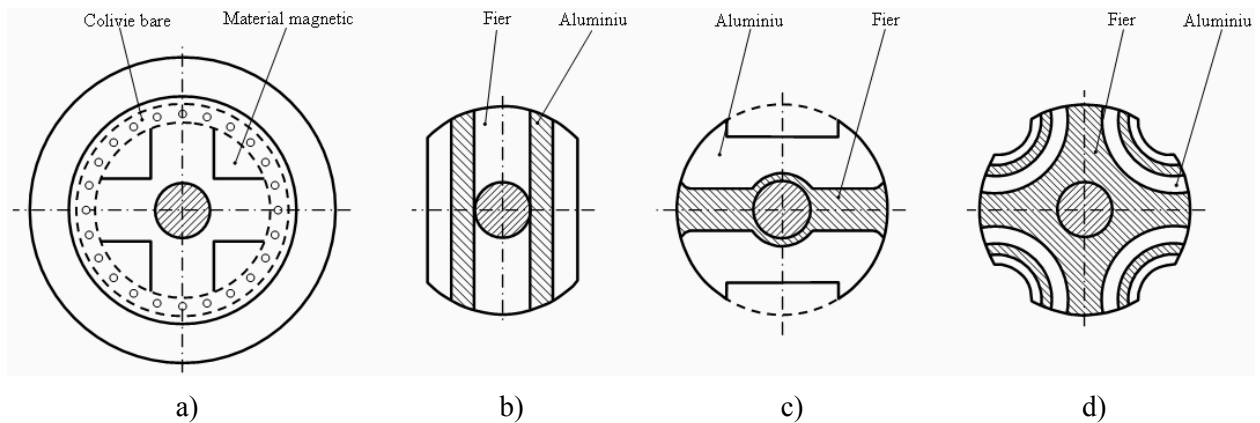


Fig.4.5. Variante constructive ale motoarelor sincrone reactive,

În figurile 4.5, b, c și d sunt schițate variante constructive pentru doi, respectiv, pentru patru poli cu “bariere” din aluminiu în drumul liniilor câmpului transversal. Rolul coliviei de pornire este îndeplinit de data aceasta de rotorul masiv în care se induc curenții turbionari.

Cu astfel de construcții se realizează valori ale raportului $X_d/X_q = 4 \div 5$. În figura 4 5 d, este prezentată o variantă constructivă a rotorului prin care se asigură $X_d/X_q = 8 \div 1$. Pentru asemenea valori ale raportului X_d/X_q motorul reactiv atinge performanțe energetice suficient de apropiate de cele ale motorului asincron.

Pornirea motoarelor de acest tip se face în asincron, colivia de bare, respectiv barierele nemagnetice jucând rolul coliviei de verviță.

Motoarele cu reluctanță variabilă sunt simple, robuste, ieftine și se construiesc într-o gamă largă de puteri, de la zeci de wați la zeci de kilowați, cu randamente și gabarite asemănătoare motoarelor asincrone.

Funcționarea motoarelor sincrone reactive se bazează pe utilizarea cuplurilor care se exercită în câmpurile magnetice asupra corpurilor feromagnetice și datorită cărora rotorul este adus în permanență în poziția pentru care reluctanța circuitului magnetic este minimă. Este evident că, dacă rotorul ar avea forma unui cilindru circular drept, din cauza simetriei magnetice radiale, nu s-ar putea dezvolta nici un cuplu util de rotație și de aceea rotoarele motoarelor sincrone reactive trebuie construite numai cu poli aparenti. Numai la o astfel de construcție, reluctanțele circuitelor magnetice după cele două axe principale ale mașinii au valori diferite.

3.1. Motoare sincrone reactive monofazate

Schema de principiu a motorului reactiv monofazat este prezentată în figura 4.6, a.

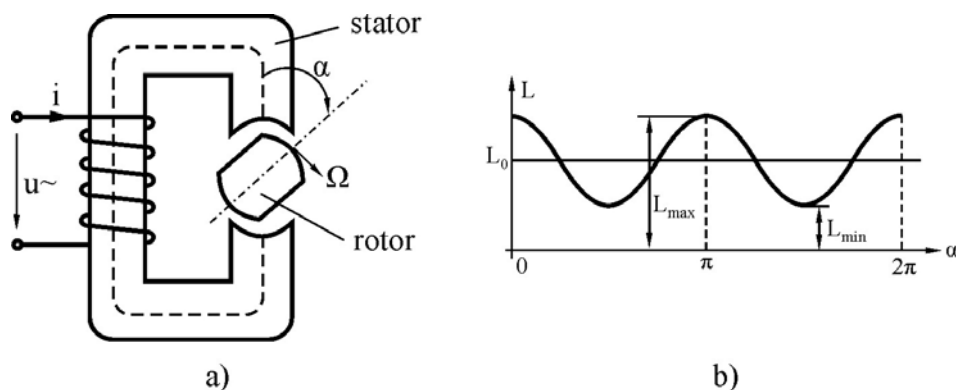


Fig. 4.6. Schema de principiu a motorului reactiv monofazat.

Ecuția tensiunilor circuitului statoric este de forma:

$$u = U_m \sin \omega t = R \cdot i + L \frac{di}{dt}, \quad (4.13)$$

în care s-a considerat tensiunea de alimentare u ca origine a fazelor.

Inductanța L a înfășurării statorice depinde de unghiul α dintre axa longitudinală d a rotorului, cu linia medie de câmp statorului. Variația inductanței statorice este reprezentată în figura 6.6, b. Forma analitică a inductanței L se poate aproxima prin relația:

$$L = L_0(1 + m \cdot \cos 2\alpha) , \quad (4.14)$$

în care:

$$m = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} ; \quad L_0 = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} . \quad (4.15)$$

Coeficientul m poartă numele de *grad de modulație a inductanței*.

Presupunând că rezistența înfășurării statorice este neglijabilă în raport cu reactanța medie a mașinii ωL_0 , relația (4.13) se poate scrie sub forma:

$$di = \frac{U_m \sin \omega t}{L_0(1 + m \cdot \cos 2\alpha)} dt , \quad (4.16)$$

de unde rezultă:

$$i = \frac{U_m}{L_0} \int \sin \omega t (1 - m \cdot \cos 2\alpha) dt , \quad (4.17)$$

în care s-a folosit dezvoltarea: $1/(1+x) = 1 - x + \dots$, valabilă cu o aproximație acceptabilă pentru x mici, adică:

$$x = m \cdot \cos 2\alpha \ll 1 , \quad (4.18)$$

deci pentru grade de modulație a inductanței statorice de valori reduse (sub 0,25).

Astfel, se obține expresia curentului statoric de forma:

$$i = \frac{U_m}{L_0} \left[\int \sin \omega t \cdot dt - \frac{m}{2} \int \sin(\omega t + 2\alpha) dt - \frac{m}{2} \int \sin(\omega t - 2\alpha) dt \right] . \quad (4.19)$$

Coordonata de poziție a rotorului α (figura 4.6, a), este:

$$\alpha = \Omega t + \alpha_0 , \quad (4.20)$$

în care Ω reprezintă viteza unghiulară, iar α_0 este poziția inițială a rotorului (la momentul $t = 0$).

Întroducând relația (4.20) în relația (4.19) și calculând integralele pentru un număr de perioade tinzând la infinit, va rezulta expresia curentului:

$$i = -\frac{U_m}{\omega L_0} \cos \omega t + \frac{m U_m}{2(\omega + 2\Omega)L_0} \cos[(\omega + 2\Omega)t + 2\alpha_0] + \frac{m U_m}{2(\omega - 2\Omega)L_0} \cos[(\omega - 2\Omega)t + 2\alpha_0] . \quad (4.21)$$

Puterea electrică instantanee schimbată de mașină cu sursa de alimentare este $p = u \cdot i$, iar puterea activă se deduce din relația:

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p \cdot dt , \quad n \in \mathbb{N} \rightarrow \infty , \quad (4.22)$$

adică:

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} \left\{ -\frac{U_m^2}{2\omega L_0} \sin 2\omega t + \frac{m U_m^2}{4(\omega + 2\Omega)L_0} \sin[(2\omega + 2\Omega)t + 2\alpha_0] \right\} dt + \frac{1}{nT} \int_0^{nT} \left\{ -\frac{m U_m^2}{4(\omega + 2\Omega)L_0} \sin(2\Omega t + 2\alpha_0) + \frac{m U_m^2}{4(\omega - 2\Omega)L_0} \sin[(2\omega - 2\Omega)t - 2\alpha_0] \right\} dt + \frac{1}{nT} \int_0^{nT} \left[\frac{m U_m^2}{4(\omega - 2\Omega)L_0} \sin(2\Omega t + 2\alpha_0) \right] dt . \quad (4.23)$$

Primul, al treilea și al cincilea termen de sub integrală, fiind mărimi armonice, vor da o putere activă nulă. Termenul al doilea și termenul al patrulea pot deveni nearmonici în anumite condiții, iar integralele lor nenule.

a) Pentru:

$$\Omega = \omega \quad \text{sau} \quad \frac{2\pi n}{60} = 2\pi f ; \quad n = 60 \cdot f , \quad (4.24)$$

$$P = \frac{mU_m^2}{4\omega L_0} \sin 2\alpha_0 . \quad (4.25)$$

b) Când:

$$\Omega = -\omega \text{ sau } n = -60 \cdot f , \quad (4.26)$$

puterea activă este cea dată de relația (4.25).

Aceasta înseamnă că mașina reactivă monofazată schimbă putere activă nenulă cu sursa de alimentare când rotorul se află la sincronism. Valoarea puterii active depinde de poziția inițială a rotorului α_0 , având valoarea maximă:

$$P_m = \frac{mU_m^2}{4\omega L_0} = \frac{mU^2}{2\omega L_0} , \quad (4.27)$$

pentru $\alpha_0 = \pi/4$.

Dependența $P = f(\alpha_0)$ poartă numele de *caracteristică unghiulară* a mașinii reactive.

Expresia puterii active (4.25) demonstrează că mașina poate funcționa stabil atât în regim de generator, când $P < 0$ și $\alpha_0 \in (-\pi/4, 0)$ (porțiunea OB din figura 4.7), cât și în regim de motor, când $P > 0$ și $\alpha_0 \in (0, \pi/4)$ (porțiunea OA din figura 4.7). Mașina poate funcționa în ambele sensuri de rotație cu performanțe identice, singura condiție fiind aceea de rotire a rotorului cu viteza de sincronism.

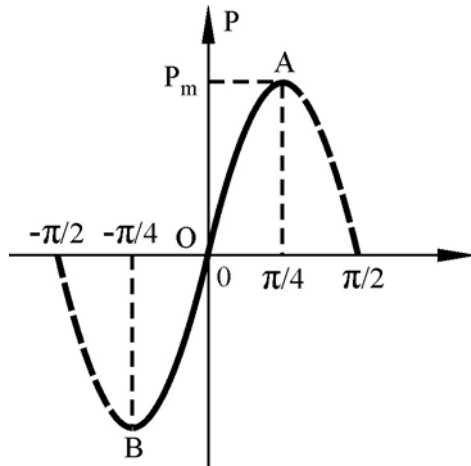


Fig. 4.7. Caracteristica unghiulară a mașinii reactive.

Plecând de la expresia curentului din relația (4.21) și impunând condițiile de funcționare la sincronism (relația 4.24), se calculează:

$$i = -\frac{U_m}{\omega L_0} \cos \omega t - \frac{mU_m}{2\omega L_0} \cos(\omega t + 2\alpha_0) + \frac{mU_m}{6\omega L_0} \cos(3\omega t + 2\alpha_0) . \quad (4.28)$$

Conform relației de mai sus, curentul conține:

- o componentă defazată cu $\pi/2$ în urma tensiunii de alimentare (relația 4.13), care transferă numai putere reactivă între rețea și mașină (pentru care se justifică denumirea de *mașină reactivă*);

- o altă componentă, tot de frecvență ω , dar defazată față de tensiune cu unghiul $2\alpha_0$, dependent de sarcină.

Prin această componentă se realizează transferul de putere activă între rețea și mașină.

- o componentă de frecvență triplă, de trei ori mai mică decât precedenta și care întreține un regim deformant în sistemul rețea – mașină.

Datorită amplitudinii sale mici, ultima componentă se poate neglija, iar expresia curentului devine:

$$i = -I_{0m} \left[\cos \omega t + \frac{m}{2} \cos(\omega t + 2\alpha_0) \right] , \quad I_{0m} = \frac{U_m}{\omega L_0} . \quad (4.29)$$

Amplitudinea curentului depinde de sarcină, α_0 , și de gradul de modulație a inductanței. Limitele de variație ale curentului sunt:

$$I_{\min} = I_{0m} \left(1 - \frac{m}{2} \right) , \quad I_{\max} = I_{0m} \left(1 + \frac{m}{2} \right) . \quad (4.30)$$

Totodată:

$$I_{\max} + I_{\min} = 2 \cdot I_{0m} , \quad \text{iar} \quad I_{\max} - I_{\min} = m \cdot I_{0m} , \quad (4.31)$$

Curentul I_{0m} este valoarea medie a amplitudinilor curentului i , corespunzătoare cazului în care mașina are inductanța L_0 .

Utilizând relațiile (4.29), (4.31) și (4.15), expresia puterii din relația (4.27) se poate scrie sub forma:

$$P = \frac{m}{4} \omega L_0 I_{0m}^2 \sin 2\alpha_0 = \frac{\omega L_{\max} - \omega L_{\min}}{4} \frac{I_{0m}^2}{2} \sin 2\alpha_0 = \frac{X_d - X_q}{4} I_0^2 \sin 2\alpha_0 , \quad (4.32)$$

în care:

$$X_d = \omega L_{\max} ; \quad X_q = \omega L_{\min} ; \quad I_0 = \frac{I_{0m}}{\sqrt{2}} , \quad (4.33)$$

sunt: reactanța longitudinală (X_d), reactanța transversală (X_q), respectiv valoarea efectivă a curentului mediu prin înfășurare (I_0), în condițiile alimentării cu o tensiune de frecvență $f = \omega/2\pi$.

În conformitate cu relația (4.32), puterea mașinii și cuplul electromagnetic dezvoltat de aceasta, depind de diferența dintre reactanțele mașinii pe cele două axe sau de diferența dintre reluctanțe, precum și de pătratul curentului care circulă prin înfășurare.

Relațiile de mai sus furnizează informații globale asupra mărimii cuplului electromagnetic furnizat de mașină, fără să scoată în evidență fenomenele intime ale procesului de conversie electromecanică a energiei, care se desfășoară în sistemul rețea – mașină.

Pentru a analiza aceste fenomene, se consideră sistemul din figura 4.8.

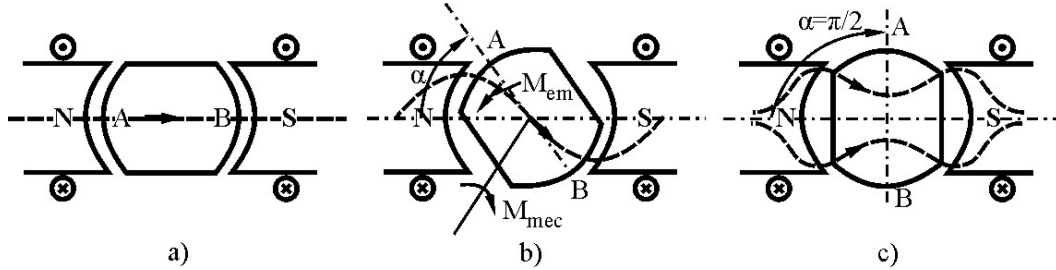


Fig. 4.8. Explicații la fenomenele de conversie electromecanică.

Se consideră un sistem format dintr-o bobină cu întrefier în care se găsește un rotor feromagnetic anizotrop (figura 4.8). În mod natural, rotorul se poziționează conform figurii 4.8, a). Rotorul este în legătură cu o sursă de energie mecanică exterioară, iar statorul are înfășurarea conectată la o sursă de energie electrică. În conformitate cu principiul conservării energiei:

$$W_{\text{mec}} + W_m = \text{const.} , \quad (4.34)$$

în care W_m reprezintă energia înmagazinată în câmpul magnetic. În procesele energetice intervine și energia electrică RI^2 , dar aceasta se transformă ireversibil în căldură.

Derivând relația (4.34) în funcție de unghiul de rotație α (unghiul dintre axa longitudinală a rotorului AB cu direcția câmpului magnetic creat de înfășurarea statorică, rezultă:

$$\frac{dW_{\text{mec}}}{d\alpha} + \frac{dW_m}{d\alpha} = 0, \quad \text{sau} \quad M_{\text{mec}} + M_{\text{em}} = 0 , \quad (4.35)$$

cunoscut fiind că derivata energiei în raport cu unghiul este cuplul. M_{mec} este cuplul mecanic, iar M_{em} este cuplul electromagnetic instantaneu. Energia magnetică W_m este dată de relația:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 . \quad (4.36)$$

Dacă curentul I este constant, rezultă:

$$M_{\text{em}} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} , \quad \text{dar} \quad L = L_0(1 + m \cos 2\alpha) , \quad (4.37)$$

adică:

$$M_{\text{em}} = -mL_0 I^2 \sin 2\alpha = -M_{\text{emmax}} \sin 2\alpha . \quad (4.38)$$

Aceasta înseamnă că în cazul în care rotorul este rotit din exterior, asupra lui acționând cuplul mecanic M_{mec} , echilibrul exprimat prin relația (4.35) se menține datorită apariției cuplului electromagnetic dat de relația (4.38). Cuplul electromagnetic M_{em} are tendința de a readuce rotorul în poziția inițială. Modificarea poziției rotorului se poate face spre unghiuri α de valori din ce în ce mai mari, până la $\alpha = \pi/4$. Fenomenele se petrec în mod similar și în cazul în care cuplul mecanic exterior își schimbă sensul, caz în care unghiul α își schimbă sensul și în consecință și cuplul electromagnetic M_{em} dat de relația (4.38) își schimbă sensul, menținându-se echilibrul reprezentat de relația (4.35). Pentru valori ale unghiului α cuprinse între $-\pi/4$ și $+\pi/4$, provocate de cupluri mecanice exterioare, la creșteri ale cuplurilor exterioare apar creșteri ale unghiului α , deci

creșteri ale cuplului electromagnetic, echilibrul lor restabilindu-se în orice moment. Se spune că mașina (sistemul) prezintă o *funcționare stabilă*.

Se presupune că rotorului i se aplică din exterior un cuplul mecanic astfel încât $\alpha = \pi/4$, conform figurii 4.8, b). Mărinđ valoarea cuplului exterior, unghiul α crește ($\alpha > \pi/4$), dar cuplul electromagnetic M_{em} scade în raport cu valoarea sa maximă și în consecință echilibrul dintre cupluri nu se mai poate menține. Dacă totuși, se aplică în continuare un cuplu mecanic din ce în ce mai mic, egalându-l în permanență pe M_{em} dat de relația (4.38), se poate ajunge ca la $\alpha = \pi/2$ (conform figurii 4.8, c) atât M_{mec} cât și M_{em} să fie nule, adică exact în situația corespunzătoare $\alpha = 0$. Rezultă că rotorul mașinii poate rămâne în poziția din figura 4.8, c), când cuplul mecanic aplicat din exterior este nul, așa cum era situația din cazul prezentat în figura 4.8, a). Acest fapt este valabil numai din punct de vedere teoretic, deoarece în practică, apariția unei perturbații exterioare (de natură mecanică de exemplu), poate duce la modificarea unghiului α . De exemplu, dacă perturbația externă determină micșorarea unghiului α sub valoarea $\alpha = \pi/2$, apare un cuplu M_{em} care se adună perturbației mecanice, conducând la o nouă micșorare a lui α , deci o nouă creștere a cuplului M_{em} , ș.a.m.d., până când rotorul revine în poziția din figura 4.8, a).

Creșterea continuă a cuplului M_{em} conduce la modificarea continuă a unghiului α , ceea ce înseamnă că rotorul capătă o viteză $d\alpha/dt$, care devine maximă în poziția corespunzătoare figurii 4.8, a). În acest moment rotorul are o energie cinetică maximă, care determină depășirea poziției de echilibru, iar unghiul α devine negativ, tinzând către valoarea $\alpha = -\pi/2$. În cazul ideal, rotorul va efectua mișcări oscilatorii în jurul poziției de echilibru $\alpha = 0$, cu amplitudinea $\pi/2$. În realitate intervin pierderile mecanice și electrice care detremină o mișcare oscilatorie amortizată spre poziția de echilibru $\alpha = 0$.

Revenind la poziția din figura 4.8, c) și presupunând că asupra rotorului acționează o perturbație mecanică astfel încât unghiul α devine mai mare decât $\pi/2$, atunci apare un cuplu M_{em} pozitiv care se adună cu cuplul perturbator și unghiul α va crește către valoarea $\alpha = \pi$. Ca și în situația descrisă anterior, rotorul va executa o mișcare oscilatorie, dar zona A se va plasa în final, în dreptul zonei S a statorului, corespunzătoare unghiului $\alpha = \pi$. Așadar, pozițiile de echilibru stabil ale rotorului vor fi: $\alpha = 0$ și $\alpha = \pi$, adică pozițiile pentru care axa longitudinală a rotorului este coliniară cu axa câmpului magnetic de excitație statoric.

Din punct de vedere energetic, se poate constata imediat că în poziția de echilibru ($\alpha = 0$ sau $\alpha = \pi$), energia magnetică va avea valoarea maximă:

$$W_m = \frac{1}{2} L_{\max} I^2 = W_{m\max} , \quad (4.39)$$

iar pentru poziția de echilibru instabil $\alpha = \pi/2$, energia magnetică va avea valoarea minimă:

$$W_m = \frac{1}{2} L_{\min} I^2 = W_{m\min} , \quad (4.40)$$

În situația în care nu există legătură mecanică cu exteriorul, sistemul se stabilește la un echilibru corespunzător energiei magnetice înmagazinată maximă $W_{m\max}$, adică la $\alpha = 0$. Dacă sistemul beneficiază de un aport de energie mecanică (rotorul este rotit din exterior cu un unghi α), întrucât suma energiilor trebuie să rămână constantă (adică tot $W_{m\max}$), sistemul se va stabili în echilibru stabil la o energie magnetică mai mică, corespunzător unui unghi $\alpha \neq 0$. Energia mecanică introdusă în sistem va fi integrala cuplului mecanic în raport cu α , iar energia magnetică va avea expresia dată de relația (4.36), în care inductanța L are valoarea corespunzătoare unghiului α (relația 4.37).

Considerațiile de mai sus sunt valabile atât timp cât legătura mecanică exterioară se caracterizează prin cupluri mecanice mai mici sau cel mult egale cu valoarea maximă M_{em} a cuplului electromagnetic.

În cazul în care cuplul mecanic aplicat rotorului din exterior este mai mare decât $M_{em\max}$, și se exercită timp îndelungat în sens orar (spre exemplu figura 4.8), rotorul va executa o mișcare de rotație continuă impusă de cuplul mecanic din exterior. În acest proces de rotire continuă a rotorului, cuplul electromagnetic are valori cuprinse între $M_{em\max}$ și $-M_{em\max}$, iar pentru un număr întreg de rotații, energia magnetică va trece consecutiv prin valorile maximă și minimă, revenind

la valoarea inițială. În tot acest timp, energia magnetică prezintă modificări ale valorii sale. O parte din această energie se va regăsi ca energie mecanică, dar pe ansamblu, sistemul nu prezintă aport de energie spre sau dinspre exterior. Rotorul poate fi rotit din exterior cu o anumită viteză (constantă de exemplu), fără ca sistemul să realizeze conversie electromecanică. Sistemul din figura 4.8 se comportă analog cu un sistem în care rotorul ar fi neted (întrefier constant) și ar fi rotit din exterior într-un câmp magnetic constant.

Prin urmare, în cazul alimentării înfășurării de excitație în curent continuu, sistemul din figura 4.8 nu constituie o mașină electrică, deoarece nu realizează conversie electromecanică. În cazul în care cuplul mecanic aplicat din exterior este nul, rotorul sistemului se orientează cu axa d coliniară cu axa câmpului magnetic statoric.

Dacă înfășurarea statorică se alimentează în curent alternativ, iar curentul care circulă prin această înfășurare este de forma:

$$i = I_{0m} \cos \omega t, \quad (4.41)$$

în cazul în care rotorul este neted, situația este similară cu cea în care înfășurarea de excitație era alimentată în curent continuu, adică sistemul nu rerealizează conversie electromecanică.

Dacă rotorul este cu poli aparenti, fiind rotit la o viteză oarecare (diferită de viteza de sincronism) atunci pentru un număr mare de rotații se obține o succesiune de situații în care cuplul electromagnetic are un sens, urmate de situații în care același cuplu electromagnetic are sens contrar, astfel încât pe ansamblu aportul de energie este nul. Aceasta înseamnă că la o viteză oarecare diferită de viteza de sincronism, mașina nu realizează conversie electromecanică.

Se consideră cazul în care rotorul se rotește cu viteza de sincronism și în momentul inițial, pentru $\alpha_0 = 0$, curentul statoric și inductanța L trec prin valorile lor maxime, conform figurii 4.9, a) și b).

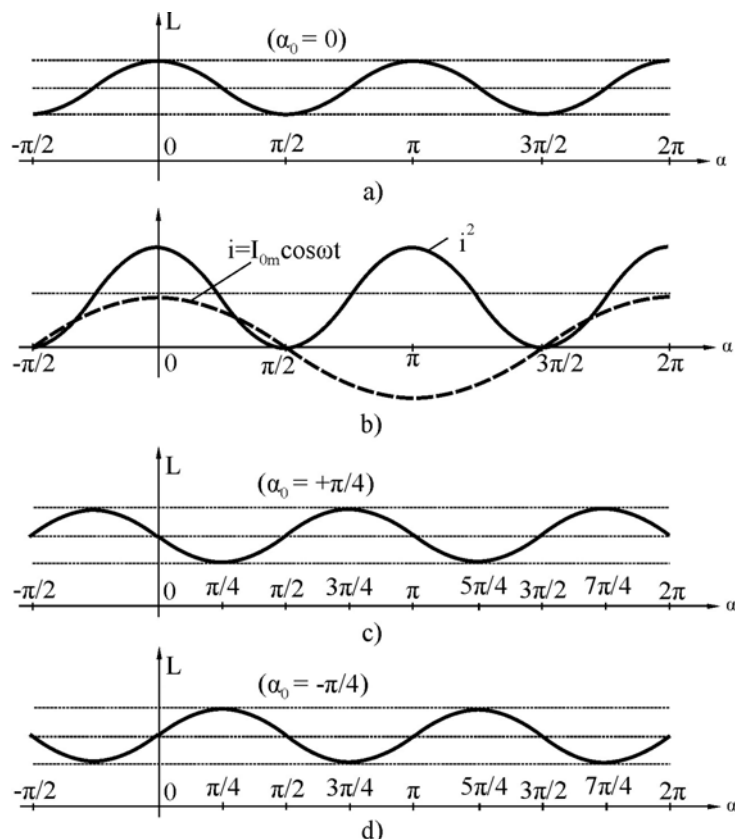


Fig.4.9. Explicativ pentru cazul în care rotorul se rotește cu viteza de sincronism.

Cuplul electromagnetic instantaneu dat de relația (4.37) este produsul dintre i^2 și variația inductanței $dL/d\alpha$ (panta tangentei la curba $L(\alpha)$).

Pentru $\alpha \in (0, \pi/2)$, $dL/d\alpha < 0$, deci cuplul M_{em} este negativ (i^2 este tot timpul pozitiv), mașina primește energie (putere) din exterior pe la rotor și trimite energie electrică activă spre rețeaua de alimentare.

Pentru $\alpha \in (\pi/2, \pi)$, $dL/d\alpha > 0$, deci cuplul M_{em} este pozitiv, mașina absoarbe putere electrică de la rețea prin stator și trimite putere mecanică spre exterior prin rotor.

Ținând cont de simetria curbelor L și i^2 față de $\alpha = \pi/2$, rezultă că exact aceeași energie electrică cedată rețelei în primul sfert de rotație este absorbită de stator în cel de-al doilea sfert de rotație. Similar și pentru energia mecanică comunicată prin rotor: în primul sfert de rotație este absorbită din exterior, iar în cel de-al doilea sfert de rotație este cedată spre exterior. Toretic, din punct de vedere energetic, fenomenele sunt aceleași ca atunci când rotorul ar avea o mișcare de oscilație cu amplitudinea de $\alpha = \pi/2$, în jurul poziției $\alpha = 0$. Ținând cont de inerția rotorului care se rotește cu viteza de sincronism, în momentul în care ajunge în poziția de echilibru instabil $\alpha = \pi/2$, el va trece către $\alpha > \pi/2$ și se va face orientarea rotorului către poziția de echilibru stabil $\alpha = \pi$, din care cauză se menține în continuare mișcarea rotorului cu o viteză medie egală cu viteza de sincronism.

În situația în care la $t = 0$ inductanța trece prin valoarea sa medie în scădere, ceea ce este echivalent cu $\alpha_0 = \pi/4$, (figura 4.9, c), pentru $\alpha \in (0, \pi/4)$, cuplul M_{em} este negativ ($dL/d\alpha < 0$), apoi pe intervalul $\alpha \in (\pi/4, 3\pi/4)$, cuplul M_{em} este pozitiv ($dL/d\alpha > 0$), determinat de i^2 , având valori sub axa medie, iar pe intervalul $\alpha \in (3\pi/4, 5\pi/4)$, M_{em} este negativ ($dL/d\alpha < 0$), dar determinat de i^2 , având valori deasupra axei medii, după care fenomenele se repetă. Rezultă că la o rotație completă energia (puterea) electrică determinată de diferitele valori ale cuplului M_{em} este negativă; mașina furnizează rețelei putere activă și absoarbe din exterior putere mecanică prin rotor. Mașina lucrează în regim de generator electric.

Fenomenele se desfășoară similar, dacă α_0 are valori cuprinse între 0 și $\pi/4$, numai că puterea activă furnizată rețelei este mai mică decât în cazul $\alpha_0 = \pi/4$, când această putere este maximă.

În cazul în care la $t = 0$, inductanța trece prin valoarea sa medie, dar în creștere, ceea ce este echivalent cu $\alpha_0 = -\pi/4$, (figura 4.9, d). Se constată că: pe intervalul $\alpha \in (\pi/4, 3\pi/4)$, $dL/d\alpha < 0$, cuplul M_{em} este negativ, determinat de valori ale lui i^2 situate sub valoarea medie, iar pe intervalul $\alpha \in (3\pi/4, 5\pi/4)$, $dL/d\alpha > 0$, cuplul M_{em} este pozitiv, dar determinat de valori ale lui i^2 situate peste linia medie, după care fenomenele se repetă. La o rotație completă, valorile diferite ale cuplurilor pe intervale, determină pe ansamblu o putere electrică pozitivă; mașina funcționează în regim de motor, furnizând putere mecanică prin intermediul rotorului către un mecanism de antrenat. Pentru unghiuri $\alpha_0 \in (-\pi/4, 0)$, mașina funcționează în regim de motor electric, dar furnizează mecanismului de antrenat puteri mecanice determinate de valoarea lui α_0 , mai mici decât puterea maximă. Unghiul α_0 este impus de sarcina cuplată la arbore.

Valoarea cuplului mediu dezvoltat de mașină se calculează integrând valoarea sa instantanee exprimată în relația (4.38) pe durata unei rotații complete:

$$\begin{aligned} M_{emmed} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_{em} d\alpha = -\frac{mL_0 I_{0m}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \cdot \sin 2(\alpha + \alpha_0) d\alpha = \\ &= -\frac{mL_0 I_{0m}^2}{4} \sin 2\alpha_0, \end{aligned} \quad (4.42)$$

în care s-au utilizat relațiile (4.38), (4.41) și (4.20).

Relația (4.42) conduce la următoarele concluzii:

- mașinile sincrone reactive monofazate dezvoltă cuplu electromagnetic nenul la viteza de sincronism, putând funcționa ca motor sau generator, regimul de funcționare fiind dictat de cuplul mecanic aplicat rotorului: rezistent sau activ;

- valoarea cuplului maxim se obține pentru un unghi de sarcină $\alpha_0 = \pi/4$ și depinde de gradul de modulație m și de pătratul curentului statoric;

- pentru cupluri mecanice apropiate de zero, deci pentru $\alpha_0 \approx 0$, rotorul se orientează cu axa d pe direcția axei statorice în momentele când curentul statoric trece prin valorile sale maxime, indiferent de sens.

4. Motorul de curent continuu fără perii (cu comutație electronică)

La motoarele de c.c. convenționale, excitația este plasată pe stator, iar înfășurarea indusă pe rotor. În astfel de condiții este imposibilă realizarea unui motor fără perii. De aceea, acest tip de motor utilizează construcția inversă, similară oarecum celei a unui motor sincron cu magneți permanenți. Înfășurarea indusă este deci pe stator și este similară unei mașini de c.a. polifazată, în cel mai eficient caz, trifazată (figura 4.10, a). Rotorul este bipolar și realizat din magneți permanenți. Motorul fără perii diferă însă de motorul sincron prin aceea că primul trebuie prevăzut cu un dispozitiv care să detecteze poziția rotorului și să comande contactoarele electronice prin semnale adecvate. Cele mai frecvente traductoare de poziție utilizează fie efectul Hall, fie senzori optici.

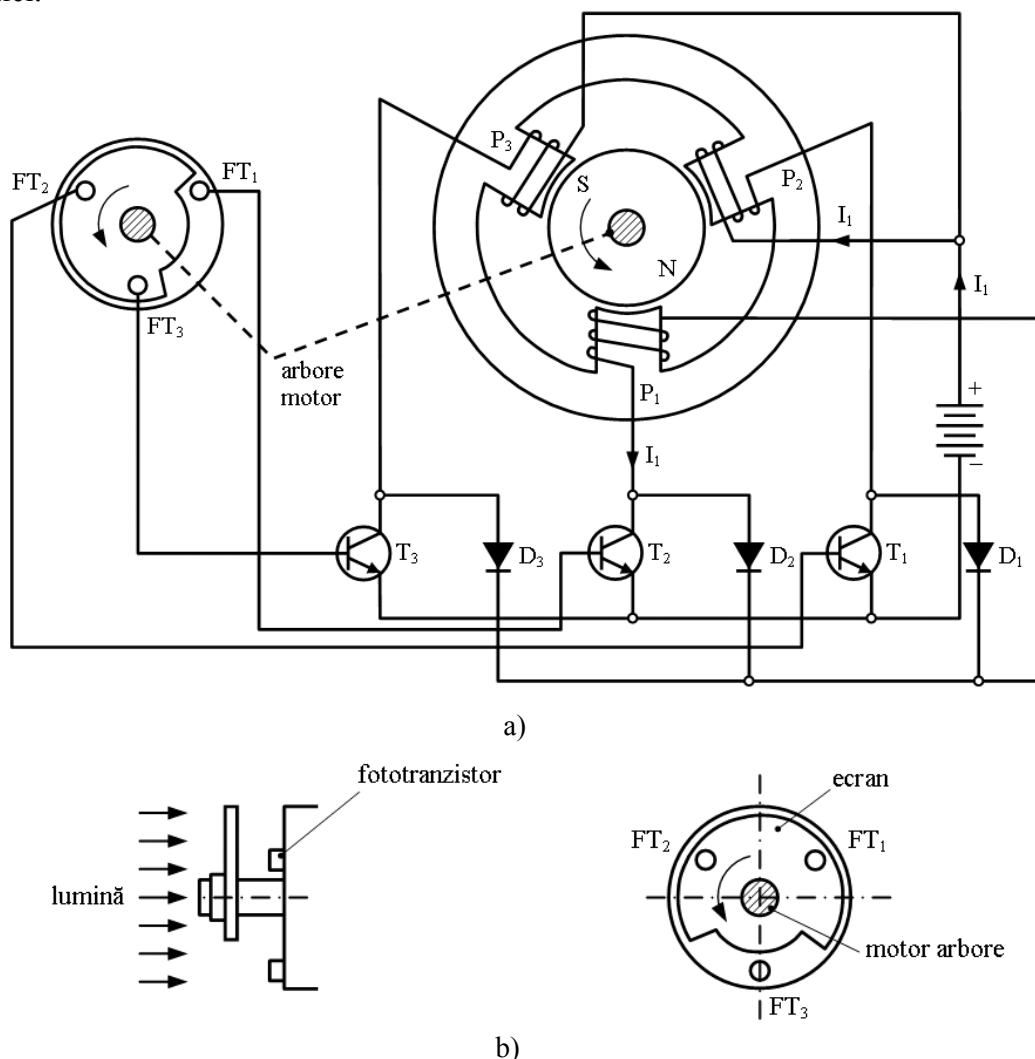


Fig. 4.10. Motorul de curent continuu fără perii, cu traductori optici de poziție.

Pentru a înțelege principiul de funcționare al motorului de c.c. fără perii, ne vom referi la figura 4.10, în care statorul are trei înfășurări de fază concentrate pe piesele polare P₁, P₂, P₃ (figura 4.10, a). În serie cu fazele statorice sunt conectate tranzistoarele T₁, T₂, T₃. Cele trei tranzistoare sunt comandate de trei fototranzistoare FT₁, FT₂, FT₃ plasate pe o placă frontală fixată de stator (figura 4.10, a, b) la unghiuri de 120°.

Aceste fototranzistoare sunt expuse succesiv la o sursă de lumină cu ajutorul unui ecran mobil, solidar cu arborele, care lasă un fototranzistor expus, în timp ce celelalte două sunt obturate.

Se presupune că înainte de a se conecta sursa de c.c., rotorul motorului și ecranul se află în poziția arătată în figura 4.10, a). La conectarea sursei, în situația precizată este iluminat FT_1 și tranzistorul T_1 intră în conducție, curentul debitat de sursa de c.c. trecând prin spirele fazei 1. Polul P_1 este de polaritate N , liniile de câmp ieșind din pol. Rotorul - magnet permanent se va roti și va tinde să se așeze cu polul său S în dreptul polului N_1 statoric, deplasarea fiind de 120° de grade în sens trigonometric. Dar înainte de a realiza rotirea de 120° , fototranzistorul FT_1 va fi obturat, tranzistorul T_1 blocându-se. În schimb fototranzistorul FT_2 va fi iluminat, iar faza 2 va fi alimentată prin tranzistorul T_2 . Rotorul își va continua mișcarea de rotație căutând să-și plaseze polul S în dreptul polului N_2 ș.a.m.d.. Energia localizată în câmpul magnetic al fazei 1, alimentată anterior, se va epuiza printr-un curent care se va închide prin dioda de recuperare D_1 , faza 1 influențând, deci, mișcarea rotorului printr-un cuplu de sens opus mișcării principale impuse acum de faza 2.

Motorul descris prezintă și un alt dezavantaj, și anume curentul prin fazele statorice trece numai într-un singur sens, cel permis de tranzistor și de dioda respectivă. Se poate crește eficiența motorului, dacă curentul de fază va fi alternativ, ceea ce se poate obține cu motorul prezentat schematic în figura 4.11, a). Cele trei faze sunt alimentate printr-o punte de tranzistoare $T_1...T_6$, comandate prin același traductor optic de poziție cu cele șase fototranzistoare și ecran solidar cu arborele (rotorul). Ecranul este astfel realizat (figura 4.11, b) și c) încât ține în conducție simultană trei tranzistoare, conform schemei din tabelul 1, în care cifra 1 semnifică starea de conducție, iar cifra 0 starea de blocare.

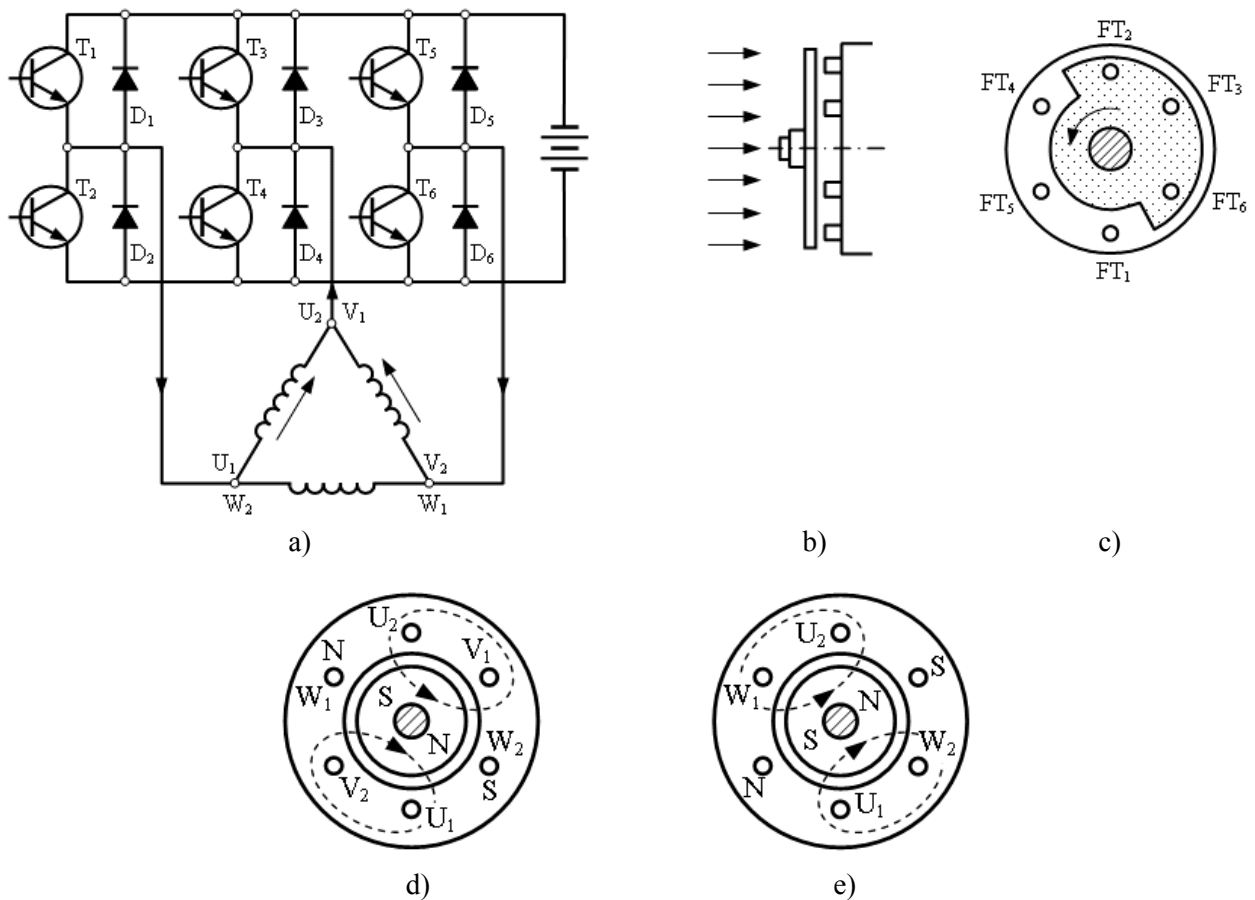


Fig. 4.11. Motorul de curent continuu fără perii, cu înfășurările fază parcurse de curenți alternativi.

În figura 4.11, d) se prezintă poziția rotorului magnet - permanent înainte de a se conecta sursa de c.c. la puntea de tiristoare. În momentul conectării sursei (intervalul 1 în tabelul 1), foto-

tranzistoarele FT_1 , FT_4 și FT_5 fiind iluminate de sursa de lumină, vor comanda intrarea în conducție a tranzistoarelor respective T_1 , T_4 și T_5 .

Tabelul 1

INTERVALUL	1	2	3	4	5	6
T_1	1	1	1	0	0	0
T_2	0	0	0	1	1	1
T_3	0	0	1	1	1	0
T_4	1	1	0	0	0	1
T_5	1	0	0	0	1	1
T_6	0	1	1	1	0	0

Curentul sursei va trece prin faza $U_1 - U_2$ și respectiv $V_1 - V_2$, cu sensurile indicate și în figurile 4.11, a) și d). Liniile câmpului magnetic vor polariza statorul după axa înfășurării $W_1 - W_2$ neparcursă de curent. Rotorul va fi solicitat de un cuplu electromagnetic de sens trigonometric și va tinde cu axa sa $S - N$ să se plaseze pe această axă $W_1 - W_2$. Dar odată cu deplasarea sa, ecranul obturează fototranzistorul FT_5 și permite iluminarea fototranzistorului FT_6 . Tranzistorul T_5 se va bloca, iar tranzistorul T_6 intră în conducție.

Începe intervalul 2 din tabelul 1. Curentul debitat de sursă va trece jumătate prin faza $U_1 - U_2$ și jumătate prin faza $W_2 - W_1$, axa magnetică statorică mutându-se pe axa $V_2 - V_1$. Rotorul va fi atras spre noua axă statorică ș.a.m.d..

Se remarcă imediat că printr-o fază statorică oarecare curentul este alternativ, faza respectivă contribuind la dezvoltarea cuplului activ la ambele alternanțe ale curentului. Evident, tensiunea aplicată unei faze este, de asemenea, alternativă.

În cazul mașinii de c.c fără perii, faza tensiunii de alimentare depinde de direcția rotorului, respectiv de unghiul dintre fazorul tensiunii \underline{U} aplicate și cel al t.e.m. \underline{E}_0 induse de excitație (rotor), fiind fixată prin poziția traductorului de poziție. Rezultă deci că, în comparație cu motorul sincron, motorul de curent continuu fără perii acționează la unghi intern θ constant, independent de gradul de încărcare al motorului. În consecință, acest motor va avea caracteristici mecanice distincte.

Ca la orice mașină sincronă, presupunând rotorul cu poli înecați și stator cilindric, prin neglijarea rezistenței înfășurării de fază, rezultă pentru cuplul electromagnetic expresia:

$$M = -\frac{3 \cdot U \cdot E_0}{X_s \cdot \Omega} \sin \theta, \quad (4.43)$$

în care U este tensiunea de alimentare, E_0 este tensiunea indusă de câmpul magnetic de excitație (câmpul rotoric), Ω este viteza unghiulară, iar X_s reprezintă reactanța sincronă.

Deoarece:

$$E_0 = k_E \cdot \Phi_E \cdot \Omega, \quad (4.44)$$

este tensiunea indusă de câmpul de excitație, iar:

$$X_s = \omega \cdot L_s = p \cdot \Omega \cdot L_s, \quad (4.45)$$

în care ω este pulsația tensiunii, L_s este inductanța înfășurării de fază, p numărul de perechi de poli ai mașinii, cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină se poate scrie sub forma:

$$M = -\frac{3 \cdot U \cdot k_E \cdot \Phi_E}{L_s \cdot \Omega} \sin \theta. \quad (4.46)$$

Dar $\theta = \text{ct.}$ și, deci, dependența $\Omega = f(M)$, adică chiar caracteristica mecanică, este o hiperbolă echilaterală, deci o caracteristică foarte apropiată de cea a motorului serie de c.c.

Avantajele motorului de c.c. fără perii sunt importante:

- dispariția colectorului și a periilor (lipsa uzurii și a necesității întreținerii acestora);
- reducerea dimensiunilor (prin dispariția colectorului și a polilor auxiliari);
- sursa de căldură cea mai importantă, adică înfășurările de fază, sunt plasate pe stator, facilitând transmiterea căldurii spre exterior;
- viteze ridicate: până la 30.000 rot/min, cât permite comutația tranzistoarelor;

- funcționare silențioasă.
- Printre dezavantaje, se menționează:
- necesitatea unui echipament electronic relativ complex;
 - preț de cost ridicat;
 - sensibilitate la suprasarcini și scurtcircuit.

Motorul de c.c. fără perii (cu comutație electronică sau cu comutație statică), cunoscut și sub denumirea de *motor sincron autocondus* se utilizează la puteri foarte mici și mici cu deosebit succes la imprimantele cu laser, acționarea floppy-discurilor, sonare, pick-upuri, etc., precum și la puteri medii la acționarea avansurilor mașinilor unelte cu comandă numerică (prin calculator) și a roboților industriali.

5. Motorul pas-cu-pas

Acest tip de motor, denumit uneori și *motor sincron cu pulsuri*, transformă impulsurile electrice de tensiune în deplasări unghiulare discrete. La primirea unui impuls rotorul motorului își schimbă poziția cu un unghi bine precizat, în funcție de impulsul primit. Unghiul minim de deplasare a rotorului este denumit *pas*. Motoarele pas-cu-pas și-au găsit o largă aplicare în sistemele de comandă automată pe bază de program a acționărilor mașinilor unelte, a unor mecanisme și dispozitive, în tehnica rachetelor. Ele îndeplinesc deci funcția unor elemente decodificatoare, transformând informația primită sub forma unor impulsuri electrice în pași unghiulari de poziție.

Motoarele pas-cu-pas permit realizarea unor sisteme automate de tip discret care nu au nevoie de legături inverse (reacții), deoarece stabilesc o corespondență directă riguros univocă între informația primită și deplasarea unghiulară realizată.

În practică, motoarele pas-cu-pas se construiesc în multe variante: motoare cu unul sau mai multe statoare, cu înfășurări de comandă distribuite sau concentrate, cu rotor cu poli aparenti fără înfășurare de excitație (motor reactiv) sau cu magneți permanenți.

Un tip de motor reactiv utilizat deseori în acționarea mașinilor-unelte, are statorul cu poli aparenti cu înfășurări de comandă concentrate în număr de șase (figura 4.12). Bobinele polilor diametral opuși se conectează în serie și cele trei circuite astfel realizate pentru cei șase poli se alimentează de la o sursă de curent continuu prin intermediul unui comutator electronic.

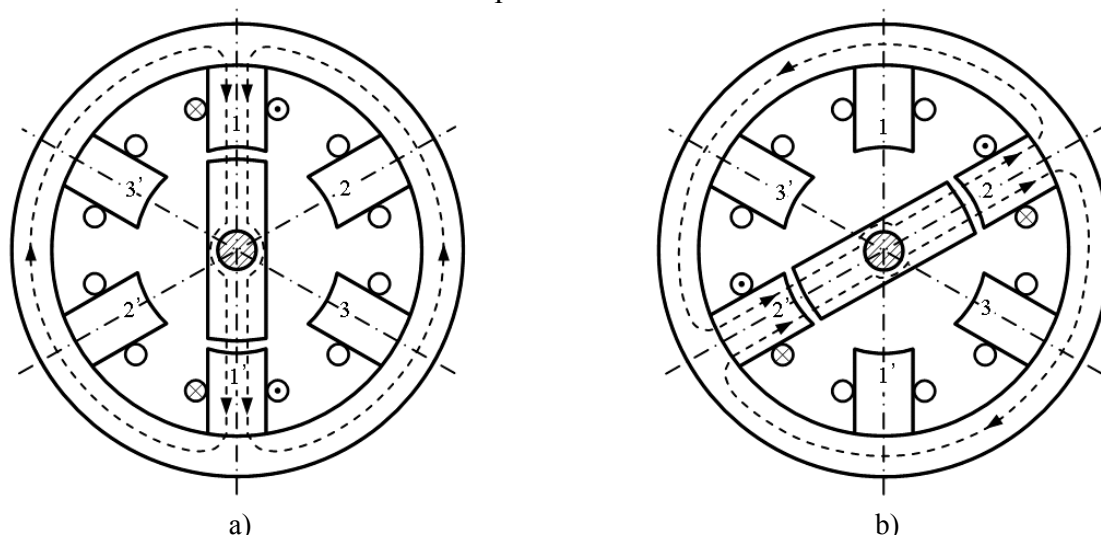


Fig. 4.12. Motorul pas-cu-pas cu șase pași.

Rotorul motorului este cu poli aparenti (fără înfășurare) în număr de doi. La aplicarea unui impuls de curent în bobinele polilor $1-1'$, rotorul este supus unui cuplu reactiv, sub acțiunea căruia are loc rotirea sa până când axa lui coincide cu axa polilor $1-1'$ (figura 4.12, a). Dacă, apoi, se alimentează bobinele polilor $2-2'$, atunci rotorul se deplasează înspre polii $2-2'$, ocu-

pând în cele din urma o poziție în care axa sa coincide cu axa de simetrie 2—2', pasul realizat fiind de 60° (figura 4.12, b). Continuând în maniera prezentată alimentarea succesivă a bobinelor statorice, motorul pas-cu-pas descris realizează 6 pași la o rotație completă.

Dacă rotorul are patru proeminente polare, atunci sub acțiunea a două impulsuri succesive de excitație, pasul realizat este de 30° (figura 4.13). În acest fel motorul realizează la o rotație completă, un număr dublu de pași, adică 12 pași.

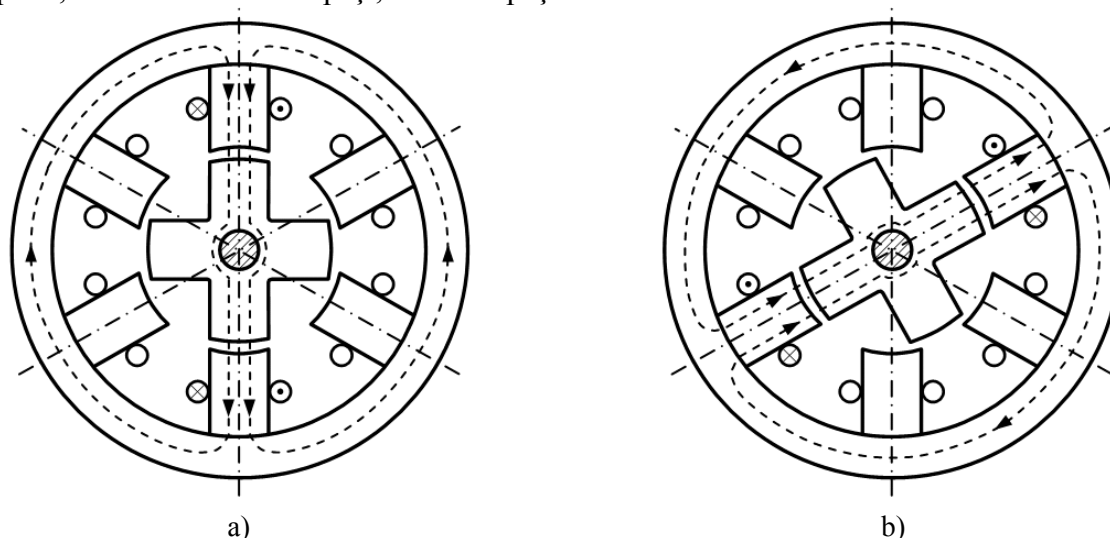


Fig. 4.13. Motorul pas-cu-pas cu 12 pași.

Motoarele pas-cu-pas de tip reactiv dezvoltă cupluri electromagnetice de sincronizare mai mici, dar pot fi utilizate la frecvențe de succesiune a pulsurilor de comandă de până la 2000 - 3000 Hz.

Motoarele pas-cu-pas cu magneți permanenți pot ajunge până la 300 - 400 Hz. La cupluri rezistente mari, motoarele electrice pas-cu-pas se asociază cu amplificatoare hidraulice de cuplu.

Parametrii mai importanți ai motoarelor pas-cu-pas sunt:

- **pasul** exprimat în grade, indică valoarea unghiului de rotație realizat la primirea unui impuls de comandă;
- **cuplul critic** reprezintă cuplul maxim rezistent pentru care rotorul nu se pune în mișcare, o înfășurare de comandă fiind alimentată;
- **cuplul limită** se definește pentru o frecvență dată a impulsurilor de comandă ca fiind cuplul rezistent maxim la care motorul răspunde fără a ieși din sincronism cu impulsurile de comandă, fără a pierde pași;
- **frecvența maximă de pornire** reprezintă frecvența impulsurilor de comandă la pornire, pentru care motorul nu pierde pași;
- **frecvența maximă de oprire** se definește analog din condiția ca motorul să nu piardă pași la oprire.