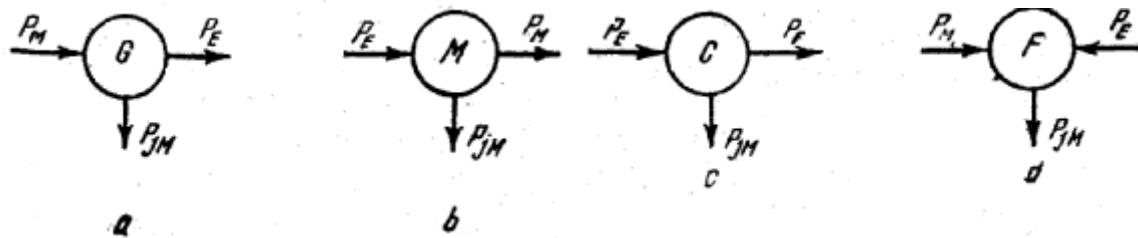


2. NOTIUNI COMUNE MAȘINILOR ELECTRICE

DEFINIREA MAȘINII ELECTRICE ȘI A PĂRȚILOR EI FUNCȚIONALE

Mașinile electrice sunt utilizate în toate sferile de activitate ale omului. Ele formează, practic, toate sursele de energie electrică și elementele de acționare în vederea efectuării unui lucru mecanic de către mecanisme și instalații.

În vastul proces de conversie (transformare) a energiei, un loc însemnat îl ocupă conversia electromecanică care se realizează cu ajutorul mașinilor electrice. Astfel, mașina care face conversia energiei mecanice în energie electrică se numește generator electric, iar cea care face conversia energiei electrice în energie mecanică, motor electric. Mașina electrică care, cu intervenția energiei mecanice, modifică parametrii unei transmisiuni de energie electrică (tensiune, curent, frecvență etc) se numește convertizor electric rotativ. Când mașina electrică primește atât energie electrică, cât și energie mecanică și le transformă în căldură, prin efectul Joule, ea are rol de frână (fig. 1).



**Fig. 1 Simbolizarea modurilor de conversie electromecanică:
a-generator(G); b-motor(M); c-convertizor(C); d-frana(F). P-putere mecanică; P_M ,
 P_E -putere electrică; P_{JM} -pierderi ireversibile de energie prin efectul Joule, prin
frecari și prin fier.**

3. MAȘINI SINCRONE

Mașina de curent alternativ la care turația rotorului este egală cu cea a câmpului învârtitor, indiferent de sarcină, se numește mașina sincronă. Armatura inductorului mașinii este formată dintr-o succesiune de poli N și S, realizați din electromagneți excitați c.c. sau din magneți permanenți (fig. 2). În general, inductorul este rotor și numai la mașinile mici, din motive de spațiu, poate fi stator, mașina fiind considerată în acest caz de construcție inversă. Inductorul poate fi cu poli aparenti și bobine concentrate așezate pe aceștia (fig. 2) sau cu poli plini (poli înecați), când înfășurarea de excitație este

repartizată în creștături (fig. 3). Înfășurarea de excitație are capetele legate la două inele de pe arbore, pe care calcă perile care fac legătura cu sursa exterioară de c.c. Mașinile sincrone mai au pe armatura inductoare o înfășurare de tip colivie (Ca la mașinile asincrone) numită *înfășurare de amortizare*, utilizată și la pornirea motoarelor (fig. 4). Circuitul magnetic al inductorului se poate realiza și din piese masive de oțel, deoarece fluxul fiind produs de c.c., nu variază în timp și nu se produc pierderi.

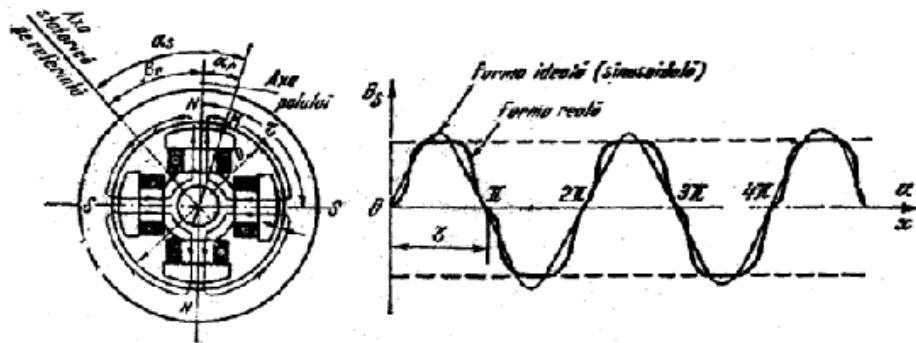


Fig. 2 Schița unei secțiuni printr-o mașină electrică cu poli aparenti și forma de variație a inducției in intrefier

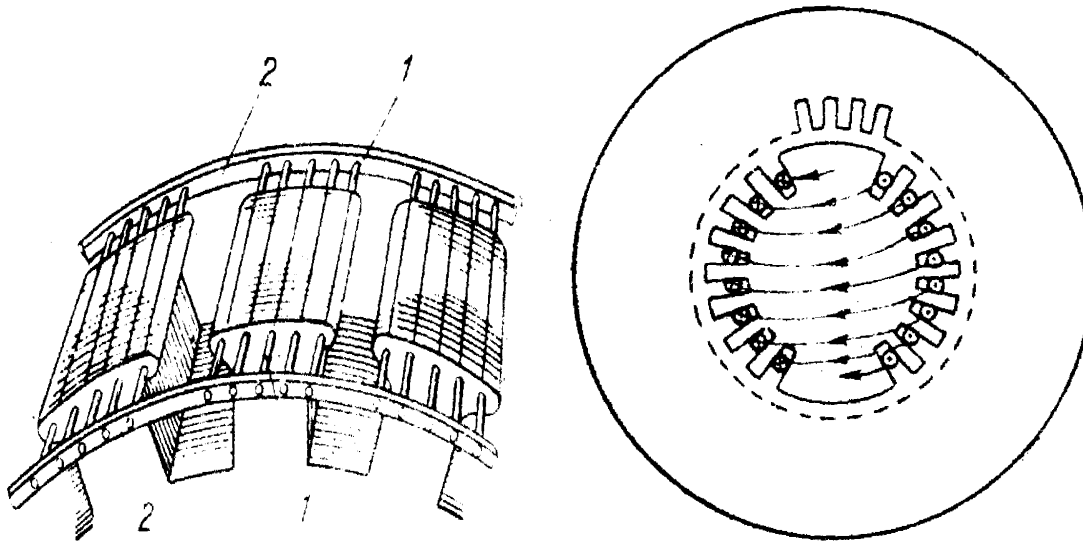


Fig. 3 Schita de principiu a unei
Infasurarea de
masini sincrone cu polii inecati
o masina

Fig. 4
amortizare la
cu poli aparenti

Armatura indusului este formată din pachete de tole și în creștăturile ei se găsește o înfășurare trifazată conectată în stea. Gama largă de puteri, ca și locul de utilizare, a condus la numeroase forme constructive ale căror elemente în afara celor indicate mai înainte, pot diferi de la un tip la altul. Astfel în fig. 5 se dau unele elemente specifice mașinii sincrone

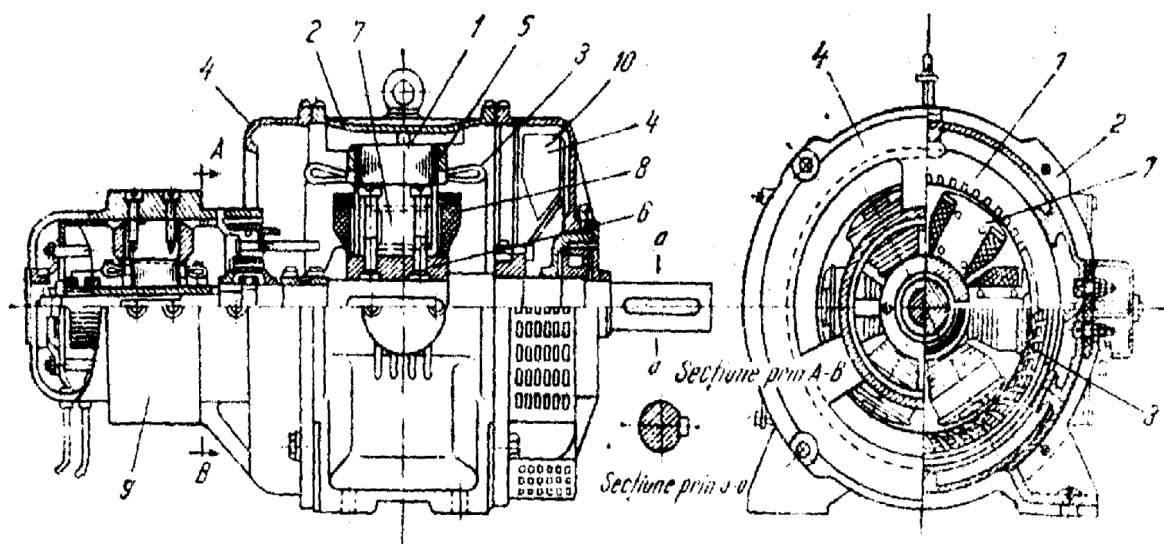


Fig. 5. Msina sincrona cu poli aparenti ($2p=6$)

1-circuit magnetic statoric; 2-carcasa; 3-înfasurare indusa; 4-șcuturile; 5-placi de strângerea pachetelor de tole stator; 6-butucul armaturii rotorice; 7-poli inductori; 8-înfasurare excitatie 9-excitatoare(masina de c.c cuplata pe acelesi ax care alimenteaza înfasurarea de excitatie); 10-ventilatorul

2. Semne convenționale

În figura 6 se dau o parte din semnele convenționale pentru mașinile sincrone. Înfășurările indusului sunt notate cu U , V și W ca la mașina asincronă, înfășurarea de excitație cu F

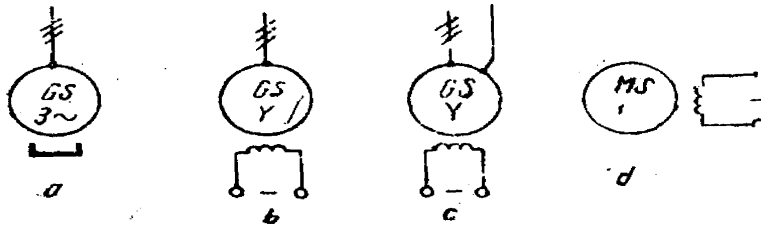


Fig 6 Semne conventionale pentru masinile sincrone:

a-generator cu poli formatii de magneti permanenti; b-generator trifazat,in stea;
c-generator trifazat in stea cu nulul scos; d-motor sincron

3. Domenii de utilizare

Mașinile sincrone pot funcționa în regim de generator, de motor și într-un regim specific de compensator de putere reactivă (compensator sincron).

- **Generatoarele sincrone**, numite și alternatoare, constituie sursele de curent alternativ de frecvență industrială din centralele electrice. Tendința este ca ele să se realizeze cu puteri cât mai mari pe unitate, pentru obținerea de randamente mari și consumuri specifice mici de materiale.

Generatoarele sincrone mari cu poli înecați (fig. 3), antrenate de turbine cu abur sau gaze la turații de 3000 rot/min și mai rar, de 1500 rot/min, se numesc **turbogeneratoare**, iar cele cu turații mici, cu poli aparenti, antrenate de turbine hidraulice, **hidrogeneratoare**. Terminologia, clasificare și simbolizarea hidrogeneratoarelor sunt date în STAS 8817-71, iar ale mașinilor rotative în general, în STAS 4861-71.

- **Motoarele sincrone** se folosesc la puteri peste 100 kW, în locul motoarelor asincrone, pentru funcționare la un factor de putere dorit sau chiar pentru compensarea factorului de putere al rețelelor (fig. 7). Ca motoare mai mici se utilizează acolo unde se impune o turație sincronă.

- **Compensatoarele sincrone** sunt motoare sincrone care funcționează în gol și debitează putere reactivă în rețelele la care sunt conectate pentru a le îmbunătăți factorul de putere.

La noi în țară se construiesc aproape toate mașinile sincrone de care avem nevoie, având și disponibilități de export.

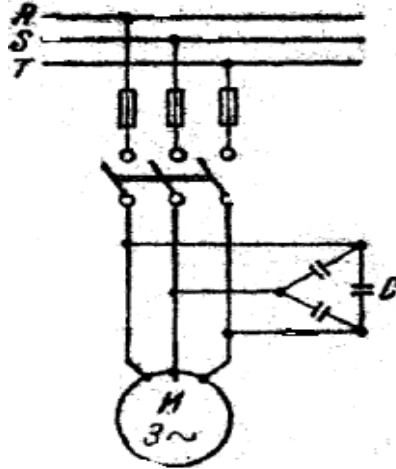


Fig. 7 Compensarea locala a factorului de al rețelei cu o baterie de condensatori

B. PRINCIPIUL ȘI ECUAȚIILE DE FUNCȚIONARE

1. Principiul de funcționare a generatorului

Dacă rotorul mașinii sincrone (fig. 2) are înfășurarea de excitație alimentată de la o sursă de c.c. și este antrenat de un motor cu viteza unghiulară Q , se formează un câmp învârtitor de forma (fig. 8) care produce printr-o înfășurare de fază fluxul , Ψ_0 , dat de relația

$\Psi = w k_w \Phi \cos \omega_2 t = \Psi \cos \omega_2 t$. Înfășurările de fază fiind decalate în spațiu cu un unghi electric de 120° ($2\pi/3$ radiani), în baza relației

$e = \omega_2 w k_w \Phi \sin \omega_2 t = \omega_2 w k_w \Phi \cos \left(\omega_2 t - \frac{\pi}{2} \right)$, t.e.m. induse în cele trei înfășurări statorice de

faza sunt:

$$\begin{aligned}
 e_{01} &= E_0 \sqrt{2} \cos (\omega t - \pi/2); & \text{rel. 1} \\
 e_{02} &= E_0 \sqrt{2} \cos (\omega t - \pi/2 - 2\pi/3); \\
 e_{03} &= E_0 \sqrt{2} \cos (\omega t - \pi/2 - 4\pi/3);
 \end{aligned}$$

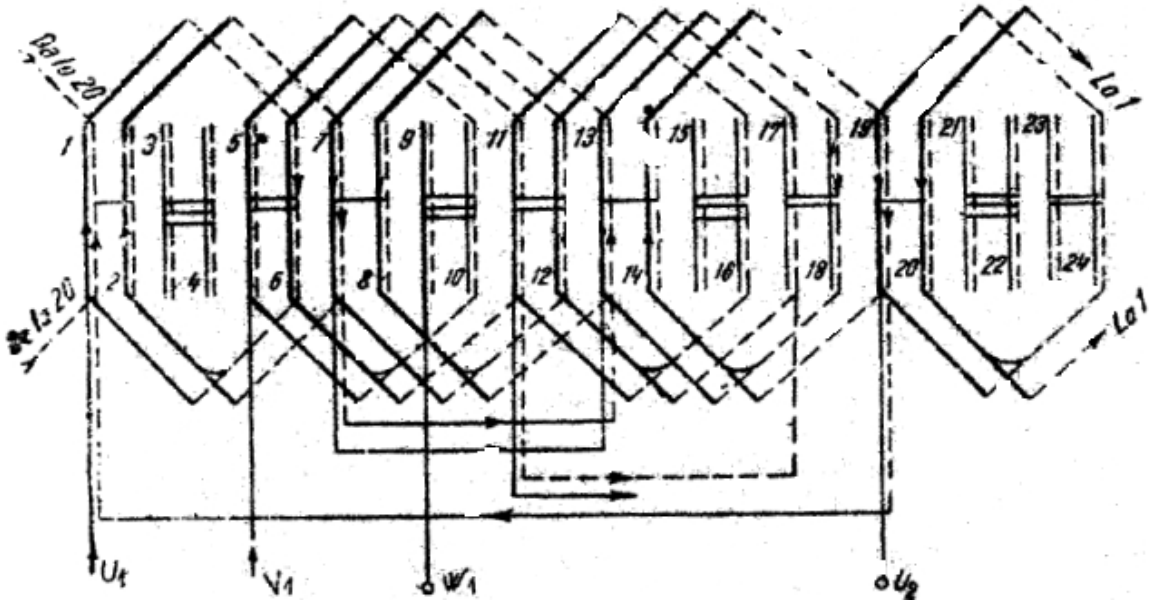


Fig. 8 Forma camp invartitor

În care $\omega = p\Omega$, iar E_o are expresia dată de relația

$$E = \frac{\omega_2 w k_w \Phi}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f_2 w k_w \Phi \approx 4,44 f_2 w k_w \Phi, \quad \text{rel. 2}$$

pentru fluxul Ψ_o de la funcționarea în gol.

Dacă înfășurarea statorică se conectează la o sarcină trifazată de impedanțe corespunzătoare, acestea, ca și înfășurările, vor fi parcurse de un sistem trifazat de curenți, curentul din faza de referință având forma:

$$i_1 = I \sqrt{2} \cos [\omega t - (\pi/2 + \beta)]. \quad \text{rel. 3}$$

Unghiul de decalaj β dintre t.e.m. e_{o1} și curentul i_1 depinde de natura sarcinii și de parametrii înfășurării. În acest caz, mașina cedează o putere electrică sarcinii, putere preluată prin intermediul câmpului electromagnetic de la motorul primar, funcționând deci în regim de generator.

2. Reacția indusului la mașina sincronă

Reacția indusului are o mare influență asupra comportării mașinii sincrone, nu ca la mașina de c.c. unde influența ei este, practic, neglijabilă.

Înfășurarea trifazată a statorului, parcursă de sistemul trifazat de curent de forma celor dați de relația 3, produce la rândul ei un câmp învârtitor de reacție care are aceeași viteză unghiulară Ω și același sens de rotație ca și câmpul învârtitor inductor, dar decalat în urmă, ca și curentul i_1 , față de fluxul care a indus t.e.m. (rel. 1):

$$b_a = B_a \cos \left[\omega t - \alpha - \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) \right]. \quad \text{rel. 4}$$

Deci, fluxul de reacție prin înfășurarea de fază a indusului va fi defazat față de fluxul inductor cu același unghi, având expresia:

$$\psi_a = \Psi_a \cos \left[\omega t - \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) \right]. \quad \text{rel. 5}$$

iar t.e.m. indusă de acest flux va fi:

$$e_a = \omega \Psi \cos [\omega t - (\pi + \beta)] = E_a \sqrt{2} \cos (\omega t - \pi - \beta). \quad \text{rel 6.}$$

Cele două fluxuri — inductor Ψ_0 și de reacție Ψ_a — se compun și dau un flux rezultat:

$$\underline{\Psi} = \underline{\Psi}_0 + \underline{\Psi}_a \quad \text{rel. 7}$$

Care induce o t.e.m.
$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a. \quad \text{rel. 8}$$

Având în vedere relația $\Psi = w k_w \Phi \cos \omega_2 t = \Psi \cos \omega_2 t$ a lui Ψ_0 și relația 5 a lui Ψ_a , se trasează în figura 9 diagramele de fazori corespunzătoare pentru o sarcină rezistiv-inductivă. Fluxul rezultat este decalat în urma fluxului inductor Ψ_0 cu un unghi θ , numit unghi intern al mașinii sincrone și care în realitate reprezintă decalajul polilor câmpului învârtitor rezultat față de polii câmpului inductor (polii armăturii rotorice). Diagramele de fazori pentru sarcina rezistivă ($\beta = 0$), sarcină pur inductivă ($\beta = \pi/2$) și sarcină pur capacitivă ($\beta = -\pi/2$), reprezentate în figura 6.6 conduc la următoarele concluzii:

- față de fluxul inductor Ψ_0 fluxul rezultat Ψ din întrefierul mașinii este micșorat în cazul sarcinilor inductive și mărit în cazul sarcinilor capacitive;
- unghiul intern $\theta=0$ numai când mașina este încărcată cu o sarcină pur reactivă.

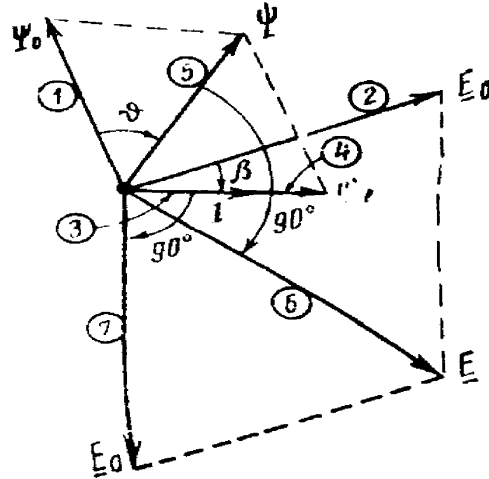
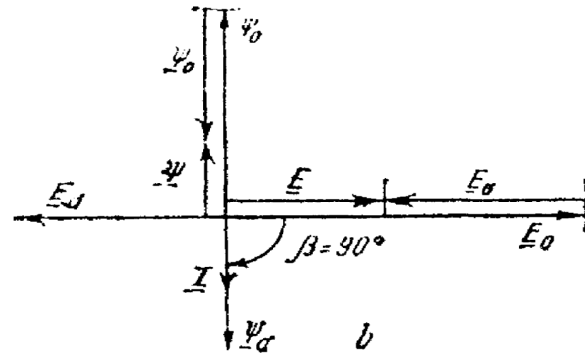
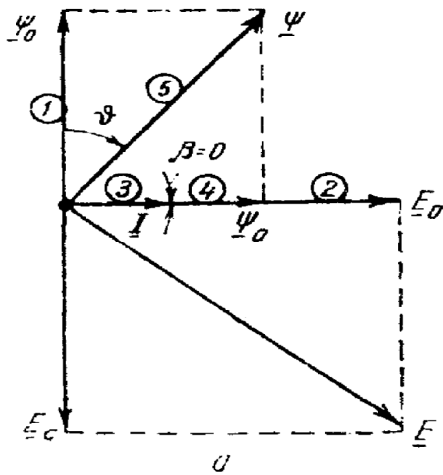


Fig. 9. Diagramele de fazori ale fluxurilor și ale t.e.m. corespunzătoare pentru o sarcină rezistiv-inductivă.



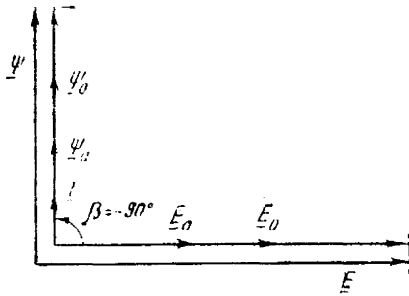


Fig. 10. Influența fluxului de reacție Ψ asupra fluxului rezultat, în funcție de caracterul sarcinii: a — sarcină rezistivă b — sarcină pur inductivă; c — sarcină pur capacitivă.

3. Ecuația tensiunilor

Pentru o urmărire mai simplă a fenomenelor de bază, ecuațiile se vor deduce pentru mașina sincronă cu întrefier constant (cu polii plini), chiar dacă nu vor fi prinse unele particularități funcționale specifice mașinii sincrone cu întrefier variabil (cu poli aparenti).

Ecuația tensiunilor pentru o fază a indusului se determină aplicând regula dipolului generator ca și la relațiile ($\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{01} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{E}_1$; $-\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{02} \underline{I}_2 - \underline{E}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 - \underline{E}_2$):

$$\underline{U} + R \underline{I} + jX_{\sigma} \underline{I} = \underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a, \quad \text{rel. 9}$$

unde R este rezistența înfășurării de fază, X_{σ} este reactanța corespunzătoare fluxului de scăpări al înfășurării respective, iar \underline{E} este dat de relația 8. Dacă se are în vedere că Ψ_a este în fază și proporțional cu curentul i_1 cum reiese din relațiile (3) și (5), în baza relației 6 se poate scrie:

$$\underline{E}_a = -jX_a \underline{I}, \quad \text{rel. 10}$$

unde X_a este reactanța corespunzătoare fluxului de reacție.

Cu relația (10), relația (9) se mai poate scrie:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \underline{I} + jX_{\sigma} \underline{I} + jX_a \underline{I} = \underline{U} + R \underline{I} + jX_s \underline{I}, \quad \text{rel. 11}$$

în care $X_s = X_{\sigma} + X_a$ este reactanța sincronă a mașinii.

C. REGIMURILE DE FUNCȚIONARE, BILANȚUL DE PUTERI ȘI RANDAMENTUL

1. Cuplul electromagnetic dezvoltat când mașina este cuplată la rețea

Dacă tensiunea rețelei U și t.e.m. E_0 a generatorului au aceeași pulsație se păstrează relația (11). Având în vedere că la mașina sincronă rezistența R și reactanța X_σ sunt mici față de reactanța X_s , în relația (9) se poate considera $U \approx E$ și ecuația (11) devine $\underline{E}_0 \approx \underline{U} + jX_s \underline{I}$. Cu aceste simplificări, diagrama de fazori este cea din figura 11 iar puterea electromagnetică a mașinii sincrone trifazate se aproximează cu

$$P_e \approx 3EI \cos \varphi \approx 3UI \cos \varphi \quad \text{rel. 12}$$

Având în vedere că în figura 11 segmentul $BC = E_0 \sin \theta = IX_s \cos \varphi$, expresia (12) a puterii și cea a cuplului electromagnetic devin:

$$P_e \approx \frac{3UE_0}{X_s} \sin \theta; \quad M_e = \frac{P_e}{\Omega_1} \approx \frac{3UE_0}{\Omega_1 X_s} \sin \theta. \quad \text{rel. 13}$$

Deci, atât puterea cât și cuplul electromagnetic variază sinusoidal cu unghiul intern, pentru $E_0 = \text{ct}$, adică pentru curentul de excitație $I_e = \text{ct}$ și fluxul $\Psi_0 = \text{ct}$ (fig. 12).

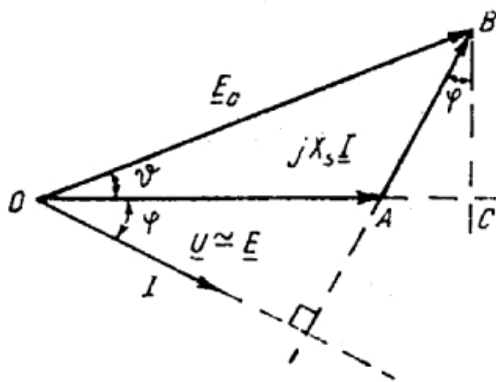


Fig. 11 Diagrama de fazori simplificată pentru o sarcină rezistiv-inductivă.

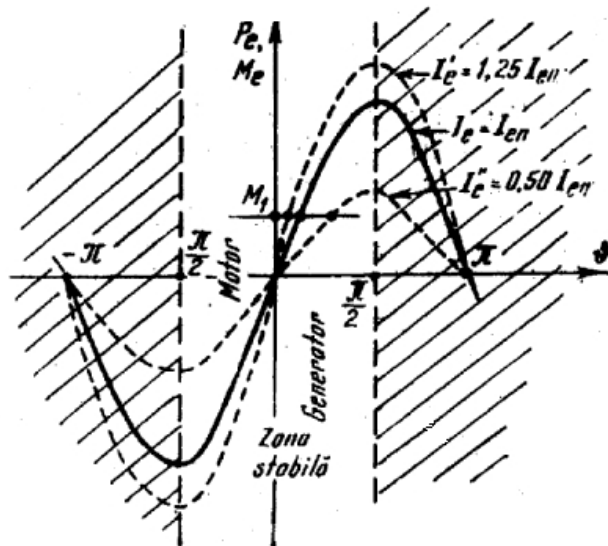


Fig. 12 Variația puterii electromagnetice și a cuplului sincron în funcție de unghiul intern θ la $I_e = ct$ și delimitarea zonei de funcționare stabilă.

2. Definiția regimurilor de generator și de motor

Considerând că rotorul mașinii are $\Omega \neq \Omega_1$, E_0 are pulsația $\omega = p \Omega \neq \Omega_1$ unghiul intern θ , definit la reacția indusului variază continuu, iar cuplul electromagnetic dat de relația (13) este un cuplu alternativ, deci cu valoare medie nulă. De aici rezultă că mașina sincronă nu dezvoltă cuplu electromagnetic decât atunci când $\Omega = \Omega_1$, adică rotorul are turația de sincronism impusă de pulsația ω_1 a rețelei la care este cuplată mașina. Dacă mașina sincronă funcționează pe rețea proprie ca generator, acesta impune și frecvența rețelei alimentate. Din această cauză, cuplul electromagnetic al mașinii sincrone se mai numește *cuplu sincron*.

Dacă mașina cuplată la rețea funcționează în regim de generator, adică dă energie activă în rețea, trebuie să fie antrenată de un motor primar care să conducă la creșterea unghiului intern θ definit la reacția indusului și $P_e \neq 0$ din relația 13. În regim de generator câmpul rezultat este decalat în urma câmpului inductor (fig. 10a și fig. 13a). Dacă $\theta = 0$, mașina nu dă și nu primește energie activă (fig. 10b și 13b). Dacă la arborele mașinii apare un cuplu rezistent care tinde să scadă turația motorului, axa polului rotoric rămâne în urmă față de axa polului câmpului rezultat (fig. 13c) deci $\theta > 0$, apare un cuplu sincron, mașina primește energie activă de la rețea și dezvoltă un cuplu mecanic la arbore.

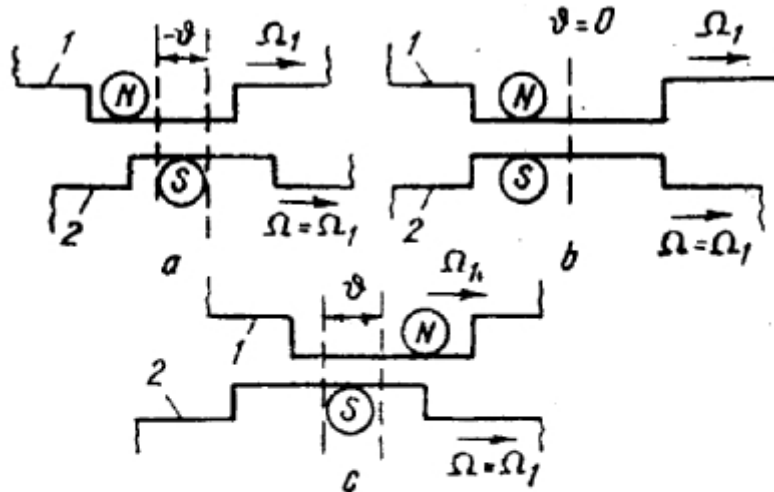


Fig 13 Decalajul polilor câmpurilor invârtitoare (unghiul intern θ) la mașina sincronă:
a — regim generator; b — compensator sincron sau la funcționarea în gol; c — regim motor;
1 — câmpul invârtitor rezultat Ψ ; 2 — câmpul inductor Ψ_0 (produs de rotor).

În acest caz, mașina funcționează în regim de motor. Se reamintește că motorul sincron dezvoltă un cuplu numai dacă are turația $n = n_1$. La pornire ($n = 0$) sau la altă turație ($n \neq n_1$) nu dezvoltă cuplu. Când mașina este cuplată la rețea, dar nu schimbă putere activă cu ea, deci $\theta = 0$, dar poate, da sau primi energie reactivă se spune că funcționează în regim de compensator (fig. 10, b și c și fig. 13, b).

3. Bilanțul de puteri active și randamentul.

Schimbul de energie a mașinii sincrone cu rețeaua la care este conectată depinde, cum s-a arătat, de regimul său de funcționare. Puterea utilă poate fi activă la motor, activ-reativă la generator sau complet reactivă la compensator. Randamentul unei mașini fiind definit de puterile active — primită P_1 cedată P_2 — se va urmări relația dintre aceste puteri și pierderile de putere activă din mașină. Ca orice mașină rotativă, mașina sincronă are pierderi mecanice $P_{f\vartheta}$ — de frecare și ventilație, pierderi în circuitul magnetic al indusului P_{Fe1}

— datorită variației în timp a fluxului magnetic, pierderile în înfășurarea trifazată a indusului $P_w = 3RI^2$ și pierderi în înfășurare de excitație $P_{ex} = R_e I_e^2$ (pierderi în circuitul

magnetic inductor nu sunt, fluxul fiind constant în timp, ca și curentul de excitație care-l produce).

Deci, randamentul trebuie precizat pentru un anumit factor de putere. Reprezentarea schematică a bilanțului de puteri active (fig. 14) conduce și la relațiile randamentului η_G — pentru generator și η_M — pentru motor:

$$\eta_G = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\sqrt{3} UI \cos \varphi + P_w + P_{Fe} + P_{fv} (+ P_{ex})}$$

$$\eta_M = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi - P_w - P_{Fe} - P_{fv} (- P_{ex})}{\sqrt{3} UI \cos \varphi}$$

rel. 14

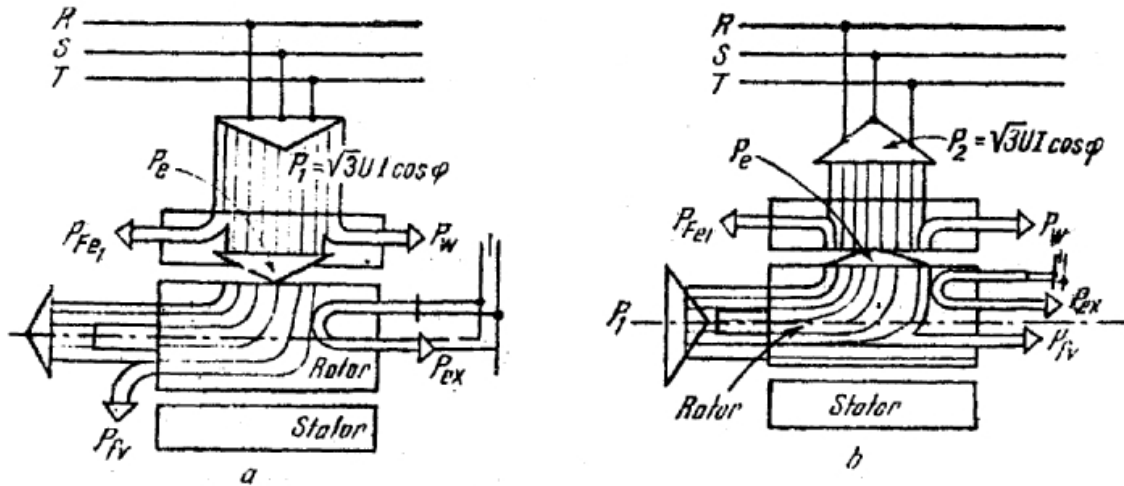


Fig. 14 Reprezentarea schematică a bilanțului de puteri active la mașinile sincrone cu excitație independentă:

a -- regim de motor; b — regim de generator.

D. CUPLAREA ȘI FUNCȚIONAREA GENERATORULUI SINCRON ÎN PARALEL CU REȚEAUA

Cuplarea generatoarelor sincrone la rețea se realizează automat, evitându-se șocurile periculoase, de curent care ar putea să apară la o cuplare necorespunzătoare. În momentul cuplării trebuie ca t.e.m. E_0 și frecvența acesteia, produse de generator, să fie egale cu tensiunea, respectiv frecvența rețelei, iar succesiunea în timp a fazelor generatorului să fie aceeași cu a rețelei, adică câmpurile învârtitoare ale rotorului și a statorului să aibă același sens de rotație.

Operațiile prin care sunt realizate aceste condiții constituie sincronizarea mașinii. Se aduce mai întâi generatorul la o turație apropiată de cea sincronă, apoi se excită până când tensiunea crește la valoarea tensiunii rețelei. Când sincronizarea nu se face automat, verificarea succesiunii fazelor se face cu un sincronoscop cu ac indicator sau cu un sincronoscop cu „foc învârtitor”.

După conectarea la rețea, generatorul nu debitează nici un fel de putere, iar motorul de antrenare acoperă numai pierderile la funcționarea în gol, adică $P_{f\vartheta} + P_{FeI}$. Totodată, unghiul intern $\theta = 0$.

Pentru încărcarea cu sarcină activă, se mărește admisia la motorul de antrenare (combustibil, apă, abur). turația are tendința să crească, dar rămâne constantă și crește unghiul intern θ (fig. 13) și, în baza relației (13), se încarcă generatorul cu sarcină activă.

Pentru încărcarea cu sarcină reactivă, așa cum s-a arătat la curbele în V , se acționează asupra curentului de excitație I_e al generatorului putând primi energie reactivă prin scăderea lui I_e față de I_{e0} , sau să dea energie reactivă în rețea prin creșterea lui I_e față de I_{e0} .

F. PORNIREA MOTOARELOR SINCRONE

Pentru a dezvolta un cuplu activ, mașina sincronă trebuie adusă la turația de sincronism prin antrenarea cu un motor auxiliar sau prin pornirea în asincron.

• **La antrenarea cu un motor auxiliar,**

- motorul sincron devine generator și pornirea este echivalentă cu conectarea generatorului sincron la rețea. Acest mod de pornire formează metoda sincronizării fine și se aplică numai la pornirea în gol a motoarelor.

• **La pornirea în asincron ,**

- utilizată în mod curent, înfășurarea de excitație este deconectată de la sursă și este închisă pe o rezistență R_s , pentru limitarea supracurenților și supratensiunilor, iar înfășurarea de amortizare formează colivia întâlnită la motorul asincron. Când s-a ajuns la turația de gol în asincron, apropiată de cea sincronă, se conectează înfășurarea de excitație la sursa de c.c. În funcție de poziția relativă a polilor inductori față de cei ai indusului în momentul conectării, poate apărea în sensul cuplului asincron și cuplul sincron care aduce rotorul la sincronism dacă $\theta < \pi/2$. Dacă în momentul conectării $\theta > \frac{\pi}{2}$, cele două cupluri sunt opuse și mașina nu intră în sincronism.

În acest caz se face o nouă încercare, deconectând și conectând înfășurarea de excitație. Când mașina nu a intrat în sincronism, se constată că absoarbe un curent mare a cărui valoare variază cu frecvența dată de alunecare ($f_2 = sf_1$).