

Aplicația 14

REGIMURI DE FUNCȚIONARE ALE MOTORULUI DE CURENT CONTINUU ȘI ALE MOTORULUI SINCRON

1. Caracteristicile mecanice ale motorului de curent continuu cu excitație separată

Schema echivalentă a motorului de curent continuu cu excitație separată este prezentată în figura 14.1.a. Utilizând notațiile din figură, ecuațiile de regim staționar pentru această mașină în regim de motor sunt:

$$\text{- circuitul indusului: } U_A = E + R_A I \quad (1)$$

$$\text{- circuitul de excitație: } U_e = R_e I_e \quad (2)$$

$$\text{- tensiunea electromotoare indusă : } E = k_e n \Phi \quad (3)$$

$$\text{- cuplul motor: } M = k_m \Phi \cdot I \quad (4)$$

$$\text{- fluxul de excitație: } \Phi = f(I_e) \quad (5)$$

unde: U_A – tensiunea de alimentare a indusului; U_e – tensiunea de alimentare a înfășurării de excitație; I_e – curentul de excitație, I – curentul principal (prin indus), k_e – constanta electrică; k_m – constanta de cuplu; R_A – rezistența totală a circuitului indusului, constituită din rezistența R_a (rezistența indusului) și din rezistența R (rezistența suplimentară exterioară): $R_A = R_a + R$; R_e – rezistența electrică a înfășurării de excitație; Φ – fluxul magnetic în întrefier; n – viteza de rotație a motorului.

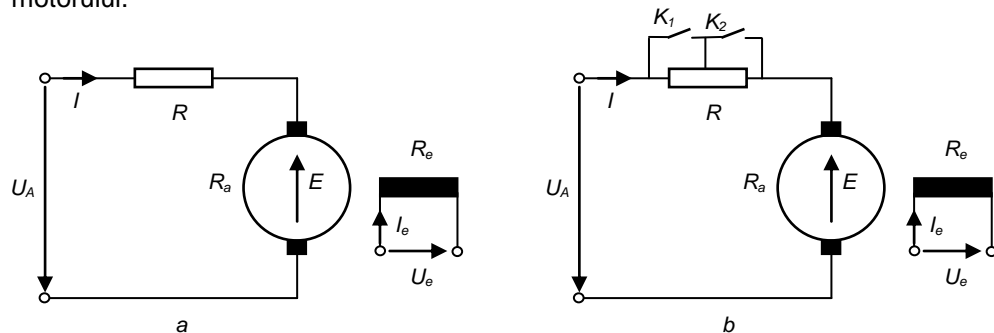


Fig 14.1 Schema electrică a motorului de curent continuu cu excitație separată

Caracteristica mecanică se obține cu ușurință din relațiile (1) ... (5):

$$n = \frac{U_A}{k_e \Phi} - \frac{R_A}{k_e \Phi} I \quad (6)$$

$$\text{și } n = \frac{U_A}{k_e \Phi} - \frac{R_A}{k_e k_m \Phi^2} M \quad (7)$$

La mersul în gol ($I = 0$), viteza devine egală cu viteza de mers în gol:

$$n_0 = \frac{U_A}{k_e \Phi} \quad (8)$$

Caracteristica mecanică $n(M)$, pentru valori constante ale U_A , R_A și Φ , este dată în figura 14.2.a.

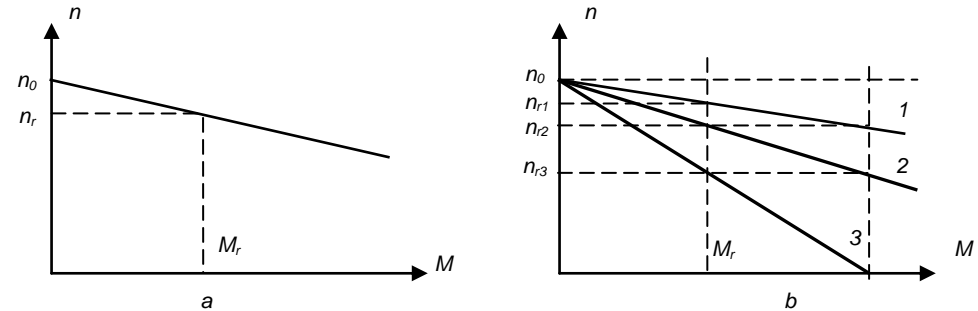


Fig 14.2 Caracteristicile mecanice ale motorului de curent continuu cu excitație separată

În regim staționar, cuplul motor echilibrează cuplul mecanic rezistent la arbore M_r , viteza de rotație stabilindu-se la valoarea de regim n_r . Modificarea vitezei de rotație, potrivit relației (7), se poate face prin trei metode:

- prin modificarea tensiunii de alimentare U_A , care conduce la modificarea vitezei de mers în gol;
- prin modificarea rezistenței R_A (modificând rezistența suplimentară exterioară R), care conduce la modificarea pantei caracteristicii mecanice;
- prin modificarea fluxului de excitație Φ , care conduce atât la modificarea vitezei de mers în gol, cât și a pantei caracteristicii mecanice.

În figura 14.2.b sunt prezentate trei caracteristici mecanice obținute prin modificarea rezistenței totale a circuitului indusului R_A . Valorile U_A și Φ sunt valorile nominale. Caracteristica 1 se obține pentru cazul în care $R = 0$ (rezistența suplimentară exterioară este nulă), deci $R_A = R_a$. Această caracteristică se numește *caracteristică mecanică naturală*. Caracteristicile 2 și 3 se numesc *caracteristici artificiale reostatice*. Ele se obțin înseriind cu indusul un reostat a cărui rezistență introdusă în circuit este mai mare la caracteristica 3 față de caracteristica 2.

Din figura 14.2.b se observă că motorul nu poate fi pornit direct pe caracteristica mecanică naturală, deoarece la $n = 0$ cuplul motor și implicit curentul absorbit la pornire ar foarte mari ($I_p = U_A / R_a$), punând în pericol circuitul de alimentare și motorul.

Prin folosirea caracteristicilor artificiale reostatice, pornirea se face pe caracteristica 3 folosind întreaga rezistență suplimentară (fig. 14.1.b), după care se trece funcționarea pe caracteristica 2 prin șuntarea unei părți din rezistența suplimentară (prin închiderea contactului K_1 , fig.14.1.b), iar în final se trece pe caracteristica mecanică naturală 1 prin șuntarea întregii rezistențe suplimentare (prin închiderea și a contactului K_2 , fig.14.1.b).

Trecerea de pe caracteristica 3 pe caracteristica 2, deci momentul închiderii contactului K_1 , precum și trecerea de pe caracteristica 2 pe caracteristica 1, deci

momentul închiderii contactului K_2 , se face prin controlul uneia dintre mărimile care pot fi măsurate și care variază în acest interval: viteză, curent, timp. Deosebim astfel:

- pornirea funcție de viteză, ce folosește elemente care măsoară direct viteza (relee de viteză ce acționează la atingerea vitezelor n_{r3} , respectiv n_{r2}), sau indirect, cu elemente care acționează la variația tensiunii electromotoare, care este proporțională cu viteza, conform relației (3), deci cu relee de tensiune;
- pornirea funcție de curent, ce folosește relee de curent înseriate cu circuitul indusului, ce acționează la scăderea curentului aproape de valoarea nominală;
- pornirea funcție de timp, ce folosește relee de timp, ce acționează după un timp necesar atingerii vitezelor n_{r3} , respectiv n_{r2} .

2. Caracteristici mecanice și regimuri de funcționare ale motoarelor sincrone

Motorul sincron este în prezent utilizat din ce în ce mai mult, în special pentru acționarea mașinilor de lucru de putere mare, datorită avantajelor pe care le prezintă și anume: este alimentat în curent alternativ, are factor de putere ridicat, randament mare, siguranță de funcționare mare datorită posibilității de creștere a întrefierului, față de motorul asincron. Pornirea motorului sincron, care mai înainte punea probleme dificile, este de asemenea rezolvată în prezent, prin procese de automatizare, astfel că nu mai constituie o frână în folosirea pe scară largă a acestuia. Faptul că se rotește cu o viteză strict sincronă, independent de sarcina pe arborele său, constituie, de asemenea un avantaj, care-l face să fie preferat în cazul acționării electrice a mașinilor de lucru ce trebuie să funcționeze cu viteză strict constantă.

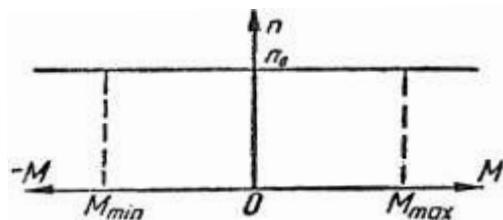


Fig.14.3 Caracteristica mecanică a cuplului

Printre dezavantajele principale ale motorului sincron se pot cita: pendulările ce pot apărea la variații bruște de sarcină pe arbore, construcția mai complicată din cauza excitatoarei și deci și preț de cost mai ridicat, în special în cazul unităților de putere redusă, scheme de pornire mai complexe și greutăți în legătură cu modificarea vitezei, atunci când asemenea operații s-ar impune, totuși, datorită modificării procesului de producție.

Motoarele sincrone sunt preferate în prezent în special pentru acționarea mașinilor de lucru care necesită puteri mari și viteză constantă de lucru. Astfel, ele sunt folosite în industria chimică pentru acționarea pompelor centrifuge și cu piston, a suflantelor, a compresoarelor cu piston și turbocompresoarelor, a malaxoarelor, calandrelor etc.; în industria celulozei și hârtiei, pentru acționarea defibratoarelor, a

mașinilor pentru fărâmițarea pasteii; în industria metalurgică, la acționarea unor laminoare, a convertizoarelor de frecvență, a suflantelor și altele. De asemenea, mai pot fi folosite și în alte ramuri industriale la acționarea unor mașini de lucru din categoria celor menționate mai sus.

Deoarece viteza motorului sincron nu variază cu sarcina de pe arborele său, rezultă că caracteristica sa mecanică se prezintă sub forma unei drepte paralele cu axa abscisei (a cuplului), conform figurei 14.3. Aceasta ar însemna că valoarea cuplului pe arborele motorului poate fi oricât de mare. În realitate însă se știe că peste o anumită valoare a cuplului de sarcină motorul iese din sincronism și se oprește. Pentru a se putea aprecia posibilitățile de încărcare și eventual de supraîncărcare ale motorului sincron, se folosește caracteristica mecanică unghiulară a motorului sincron.

2.1 Caracteristica mecanică unghiulară

Caracteristica mecanică unghiulară a motorului sincron este definită ca dependența dintre cuplul dat de motor și unghiul intern al acestuia, adică unghiul dintre tensiunea de alimentare U și tensiunea electromotoare E , datorită fluxului inductor al mașinii excitată cu curent continuu, prin rotor.

În ipoteza că se neglijează rezistența înfășurării statorice, diagrama fazorială a motorului sincron este dată în fig. 14.4, în care cu I_q și I_d s-au notat componentele longitudinale și transversale ale curentului, iar cu x_d și x_q , reactanțele inductive corespunzătoare.

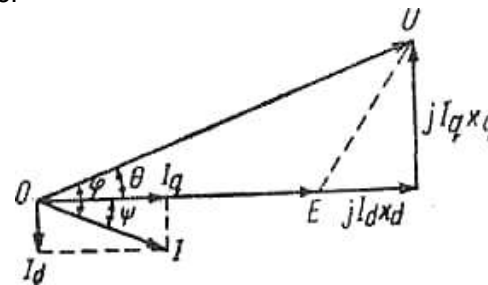


Fig.14.4. Diagrama fazorială a motorului sincron

Din diagramă rezultă:

$$\begin{aligned} U \cos \theta &= E + I_d x_d \\ U \sin \theta &= I_q x_q \end{aligned} \quad (9)$$

Puterea absorbită de motor din rețeaua electrică este dată de relația:

$$P = mUI \cos \varphi \quad (10)$$

unde U este tensiunea de alimentare pe faza motorului, iar m - numărul de faze.

Considerînd diagrama fazorială (fig. 14.4) raportată la curentul și tensiunea pe fază, ținându-se seamă de relațiile (9) și considerînd $\varphi = \theta + \psi$, rezultă:

$$P = mUI \cos \varphi \cos \psi - mUI \sin \theta \sin \psi \quad (11)$$

sau :

$$P = mUI_q \cos \theta - mUI_d \sin \theta \quad (12)$$

Folosind relațiile (9), din care se deduc valorile curenților I_q și I_d , rezultă că:

$$P = mU \frac{U \sin \theta}{x_q} \cos \theta - mU \frac{U \cos \theta - E}{x_d} \sin \theta. \quad (13)$$

Avînd în vedere că:

$$\sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta \quad (14)$$

se obține:

$$P = \frac{mUE}{x_d} \sin \theta + \frac{mV^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (15)$$

Această relație este valabilă pentru motorul sincron cu poli aparenti, pentru care $x_q \neq x_d$. Dacă ambii termeni ai relației (15) se împart cu Ω_0 – viteza unghiulară de sincronism, se obține expresia cuplului electromagnetic al motorului:

$$M = \frac{mUE}{x_d \Omega_0} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\Omega_0} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (16)$$

Deoarece pentru motoarele sincrone cu poli înecați $x_q = x_d$, rezultă că cuplul electromagnetic al acestora va fi:

$$M = \frac{mUE}{x_d \Omega_0} \sin \theta \quad (17)$$

Se remarcă că valoarea maximă a cuplului electromagnetic se obține pentru $\theta = 90^\circ$ și are valoarea:

$$M_{\max} = \frac{mUE}{x_d \Omega_0} \quad (18)$$

și deci expresia analitică a cuplului (17) se mai poate scrie:

$$M = M_{\max} \sin \theta \quad (19)$$

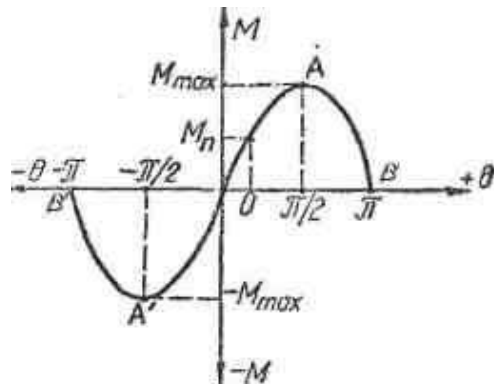


Fig.14.5 Caracteristica mecanică unghiulară a motorului sincron cu poli înecați

Caracteristica mecanică unghiulară a motorului sincron cu poli înecați va fi deci de forma indicată în fig. 14.5. După cum se observă, porțiunea de caracteristică OAB corespunde regimului de funcționare ca motor, iar porțiunea OA'B' regimului de funcționare ca generator. Se observă, de asemenea, că

porțiunea de caracteristică OA corespunde funcționării stabile a motorului, iar porțiunea AB funcționării nestabile a acestuia. Pentru $\theta > \frac{\pi}{2}$ motorul iese din sincronism și decroșează repede.

Cuplul nominal M_n al motorului se stabilește prin proiectare, astfel încât să corespundă unui unghi θ cuprins între $20-30^\circ$, astfel încât să se asigure pentru motor un coeficient de supraîncărcare:

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_n} = 2 + 2,5 \quad (20)$$

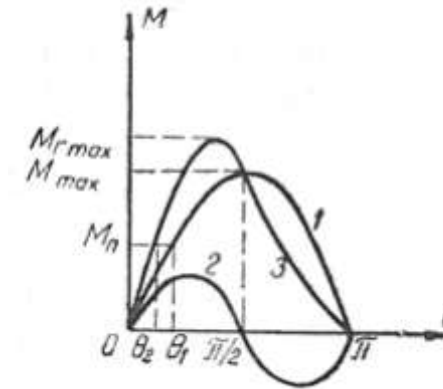


Fig.14.6 Caracteristica mecanică unghiulară a motorului sincron cu poli aparenti

Cât privește caracteristica unghiulară a motorului sincron cu poli aparenti, a cărei expresie analitică este dată de relația (16), se observă (fig.14.6) că ea apare ca rezultată a două caracteristici: o caracteristică 1 (identică cu aceea a motorului sincron cu poli înecați) și o caracteristică 2, dată de cel de-al doilea termen din membrul din dreapta al relației (16).

După cum se observă, cuplul maxim corespunzător caracteristicii unghiulare rezultante ($M_{r\max}$) este mai mare decât cuplul maxim în cazul motorului sincron cu poli înecați (M_{\max}). Acest cuplu corespunde însă unui unghi $\theta < \frac{\pi}{2}$. Se observă, de

asemenea, că caracteristica unghiulară 3 este mai rigidă decât caracteristica 1, ceea ce înseamnă că la aceeași modificare a cuplului de sarcină pe arborele motorului unghiul θ va varia mai puțin, ceea ce se traduce printr-o capacitate mai mare de supraîncărcare a motorului, în comparație cu motorul sincron cu poli înecați.

2.2 Regimuri de funcționare ale motorului sincron

Examinarea expresiei analitice (17) a caracteristicii mecanice unghiulare a motorului sincron cu poli înecați duce la concluzia că și pentru acest motor (ca și pentru cel cu poli aparenti) se pot obține caracteristici mecanice artificiale, prin:

- modificarea tensiunii de alimentare;
- modificarea tensiunii electromotoare E , deci a curentului (respectiv a

fluxului) de excitație ;

— modificarea frecvenței tensiunii de alimentare.

La modificarea tensiunii și a frecvenței tensiunii de alimentare, comportarea motorului sincron este aceeași ca și în cazul motorului asincron, cu deosebirea că în timp ce în cazul motorului asincron, cuplul critic al acestuia variază cu pătratul tensiunii de alimentare, la motorul sincron cuplul maxim variază cu tensiunea de alimentare.

Modificarea tensiunii electromotoare E (deci a curentului de excitație) poate duce în schimb la modificarea regimului de funcționare a motorului, în cele ce urmează se va examina influența variației curentului de excitație al motorului în ipoteza că cuplul motorului rămâne constant.

2.3 Regimul de funcționare a motorului sincron cu excitație variabilă și cuplu constant

Ținându-se seama de ecuația funcțională de tensiuni

$$\underline{U} = \underline{E} + jXI \quad (21)$$

și că tensiunea de alimentare U pe fază rămâne constantă, rezultă că unui anumit curent de excitație i_1 , îi va corespunde o tensiune electromotoare E_1 și deci un anumit curent de sarcină I_1 , defazat în urma tensiunii U cu un unghi φ_1 . În această situație motorul sincron funcționează în regim inductiv (figura 14.7). Pentru un curent de excitație i_2 , căruia îi corespunde tensiunea electromotoare E_2 , îi va corespunde (potrivit relației 21) un curent de sarcină I_2 , defazat față de tensiunea U cu un unghi φ_2 dar în avans față de tensiune. În această situație motorul sincron funcționează în regim capacitiv.

În diagrama fazorială (fig. 14.4), în timp ce vârful fazorilor E se deplasează pe o dreaptă paralelă cu fazorul tensiunii U , vârful fazorilor curentului I se va deplasa pe o perpendiculară pe fazorul tensiunii U . Prin aceasta se poate demonstra că condiția $M = \text{const}$ este îndeplinită. Pentru o anumită valoare a curentului de excitație i_3 , curentul de sarcină I_3 are valoarea minimă, iar unghiul $\varphi=0$, deci $\cos\varphi = 1$, obținându-se regimul *neutral*.

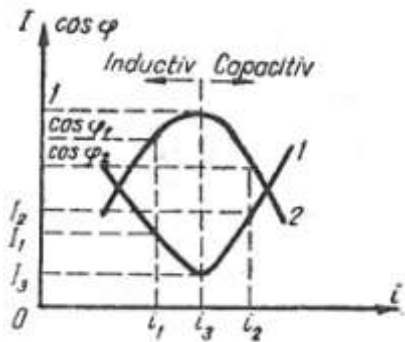


Fig. 14.7 Curba în V a motorului sincron

Reprezentându-se într-un sistem de axe de coordonate modul de variație a curentului de sarcină I în funcție de curentul de excitație i , se obține cunoscuta

curbă în V a motorului sincron (curba 1, în fig. 14.5). Dacă în ordonată se ia la o scară corespunzătoare și $\cos\varphi$ și se iau valorile acestuia corespunzătoare la diferiți curenți de excitație, se obține și curba de variație $\cos\varphi = f(i)$ (curba 2, în fig. 14.5).

După cum s-a mai arătat (fig. 14.7), pentru valori ale curentului de excitație $i < i_3$, motorul funcționează în regim inductiv, cu factor de putere inductiv, crescător cu curentul de excitație i , iar pentru valori ale curentului de excitație $i > i_3$, motorul funcționează în regim capacitiv, cu factor de putere capacitiv, descrescător cu creșterea curentului de excitație.

Regimul de funcționare descris constituie unul din avantajele de bază ale motorului sincron, care îl recomandă a fi folosit în special în instalațiile electrice de putere ridicată, pentru îmbunătățirea factorului de putere.

3 Pornirea motorului sincron

Motorul sincron dezvoltă un cuplu sincron mediu numai la funcționarea cu viteza unghiulară sincronă $\Omega_1=2\pi f/p$, unde f este frecvența de alimentare, iar p – numărul de perechi de poli. La o altă viteză, precum și la pornire, motorul sincron conectat la o rețea de curent alternativ și excitat în curent continuu dezvoltă un cuplu electromagnetic sincron, alternativ, a cărui valoare medie în decursul unei perioade a curenților induși în rotor este nulă. La pornire frecvența curenților induși este egală cu frecvența rețelei; cuplul electromagnetic sincron variază periodic cu aceeași frecvență. Pentru pornirea motorului în decursul unei semiperioade, trebuie ca momentul de inerție respectiv frecvența să fie atât de mici, încât energia primită de rotor să fie suficientă pentru accelerarea acestuia până la viteza sincronă; acest fapt este posibil la frecvența industrială numai în cazul micromotoarelor sincrone. La pornirea directă a micromotorului sincron prin intrarea rotorului în sincronism în intervalul unei semiperioade, trebuie să se asigure mișcarea rotorului în sensul corespunzător sensului de acționare al cuplului electromagnetic sincron mediu.

Pornirea motoarelor sincrone se poate realiza prin mai multe metode: pornirea cu ajutorul unui motor auxiliar de lansare, pornirea în asincron, pornirea prin alimentarea de la o sursă de frecvență variabilă.

3.1 Pornirea cu ajutorul unui motor auxiliar de lansare

Motorul sincron, care trebuie pornit în gol, este antrenat cu ajutorul unui motor auxiliar, de lansare și este conectat la rețeaua de alimentare la fel ca în cazul generatorului sincron.

Prin urmare, în cazul în care urmează să se realizeze o sincronizare fină a motorului sincron cu rețeaua, motorul auxiliar de pornire trebuie să asigure atingerea vitezei unghiulare sincrone. În acest scop, se poate utiliza un motor electric de curent continuu, un motor termic sau o turbină hidraulică.

Motorul sincron poate fi pornit și cu ajutorul unui motor asincron, având același număr de perechi de poli cu acesta. Motorul sincron este antrenat la o viteză apropiată de viteza sincronă și mașina este conectată la rețea prin procedeul de autosincronizare. Aplicarea procedeeului de sincronizare fină (vezi §2.4), este posibil în cazul în care motorul asincron are un număr de perechi de poli mai redus decât motorul sincron. După pornirea cu ajutorul motorului asincron, motorul sincron

este adus la o turație mai mare decât turația sa sincronă. Se deconectează apoi motorul asincron de la rețea; datorită pierderilor care se produc viteza motorului sincron scade. La atingerea vitezei sincrone, se realizează sincronizarea fină cu rețeaua de alimentare.

Motorul auxiliar de pornire trebuie să aibă o putere nominală relativ mică, egală cu 5 ... 15% din puterea nominală a motorului sincron (pentru acoperirea pierderilor în gol și asigurarea accelerării rotorului într-un interval de timp dat). Ca motor auxiliar se poate folosi, în anumite cazuri, mașina excitatoare de curent continuu cuplată pe același ax cu motorul sincron; în această situație mai este necesară o sursă de curent continuu de putere corespunzătoare.

3.2 Pornirea în asincron

Motorul sincron este pornit în acest caz, la fel ca un motor asincron cu rotorul în scurtcircuit. Pentru pornirea în asincron motorul sincron se echipează cu o înfășurare în colivie de pornire, așezată în piesele polare ale polilor inductor; aceasta îndeplinește ulterior, la funcționarea în regim de motor sincron, rolul de înfășurare de amortizare. Motoarele sincrone mari au polii inductor realizați cu piese polare masive care îndeplinesc rolul înfășurării în colivie.

Pornirea se realizează prin conectarea directă la rețea a motorului, sau indirect cu ajutorul unor bobine de reactanță, a unui autotransformator cu două sau mai multe trepte de pornire, sau prin metoda de pornire stea-triunghi, în funcție de curenții admisibili la pornire și de cuplul de sarcină al motorului.

În perioada pornirii în asincron înfășurarea de excitație este deconectată de la sursa de alimentare de curent continuu; la bornele acesteia se conectează un reostat cu o valoare a rezistenței R de aproximativ 5—10 ori mai mare decât valoarea rezistenței înfășurării de excitație. Înfășurarea de excitație nu este scurtcircuitată la pornire, deoarece ar apărea un cuplu de legătură monoaxială datorită curentului monofazat indus în înfășurarea de excitație, care ar provoca o înșeuare a caracteristicii mecanice de pornire în asincron.

Înfășurarea de excitație nu se lasă deschisă, deoarece la pornire s-ar induce tensiuni mari, care ar putea străpunge izolația acesteia.

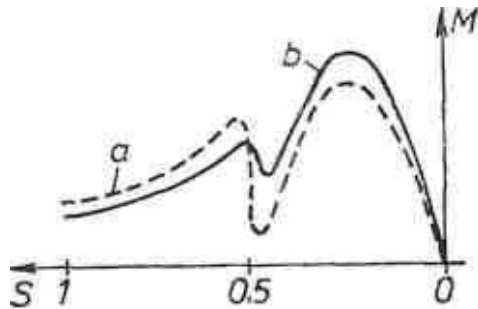


Fig. 14.8 Cuplul electromagnetic la funcționarea în asincron: a) înfășurarea de excitație conectată în scurtcircuit; b) înfășurarea de excitație conectată pe o rezistență.

În figura 14.8 s-a reprezentat grafic curba cuplului electromagnetic pentru cazul în care bornele înfășurării de excitație sunt scurtcircuitate (curba a), respectiv

conectate pe o rezistență (curba b); în cazul din urmă, înșeuarea caracteristicii mecanice este mai redusă iar pericolul agățării rotorului la o turație egală aproximativ cu jumătate din turația de sincronism este practic înlăturat. O influență asemănătoare o poate avea nesimetria înfășurării de amortizare, datorită absenței barelor în axa transversală și, eventual, a segmentelor de inel de scurtcircuitare de la pol la pol. Pentru eliminarea în parte a acestor efecte, barele înfășurării de amortizare sunt scurtcircuitate frontal de inele complete.

După pornirea în asincron, motorul are o viteză de regim mai mică decât viteza sincronă, alunecarea fiind sub 2 ... 3%, în funcție de caracteristica mecanică la funcționarea în asincron și de cuplul de sarcină.

Pentru sincronizarea motorului, se deconectează rezistența de pornire de la bornele înfășurării de excitație și se conectează sursa de excitație.

Se produce un cuplu sincron prin interacțiunea dintre câmpul magnetic inductor produs de rotor și câmpul magnetic al statorului, care este un câmp învârtitor față de rotor, cu viteza unghiulară de alunecare a rotorului în raport cu viteza sincronă; la mașina cu polii aparenti se mai dezvoltă și cuplul sincron reactiv, care, în anumite condiții, poate produce sincronizarea mașinii chiar înainte de excitarea rotorului.

La funcționarea în asincron, în regim permanent, cuplul rezistent este echilibrat de cuplul electromagnetic asincron, iar cuplul sincron este nul; la funcționarea în sincronism cuplul rezistent este echilibrat de cuplul sincron, iar cuplul asincron este nul.

Procesul de autosincronizare, adică de trecere de la funcționare în asincron la funcționarea în sincronism, este însoțit în general de pendulații ale rotorului. După pornire, când motorul a atins o turație apropiată de turația sincronă, se deconectează înfășurarea de excitație de la rezistența R și se conectează la sursa de curent continuu; odată cu creșterea curentului de excitație, în anumite condiții, are loc procesul de autosincronizare, rotorul mașinii fiind accelerat în decursul unui proces tranzitoriu la turația de sincronism.

3.3 Pornirea motorului asincron prin metoda frecvenței variabile

Pornirea mașinii sincrone prin conectarea înfășurării indusului nemijlocit la rețea este imposibilă, dacă în tălpile polilor nu este montată o înfășurare de pornire, iar înfășurarea de excitație nu este scurtcircuitată la o rezistență sau la excitator.

Pentru a sincroniza mașina sincronă cu rețeaua se utilizează metoda frecvenței variabile. Această metodă se folosește pentru pornirea motoarelor mari sincrone și pentru antrenarea rotoarelor generatoarelor în timpul încercărilor. Pentru a realiza această metodă este necesar să existe o sursă de frecvență și tensiune variabilă. Ca sursă poate fi utilizat un alternator antrenat de un motor de curent continuu sau de un convertor electronic de frecvență.

Pentru a păstra invariabilă componenta curentului indusului la pornire:

$$I = \frac{U}{x_1} = \frac{U}{2\pi \cdot f \cdot L_1} = \text{const} \quad (22)$$

concomitent componenta curentului indusului în regim nominal este egală cu:

$$I = \frac{U_n}{x_1} = \frac{U_n}{2\pi \cdot f_n \cdot L_1} \quad (23)$$

Egalând expresiile (22), (23), obținem:

$$\frac{U}{f} = \frac{U_n}{f_n} \text{ sau } U = \frac{f \cdot U_n}{f_n} \quad (24)$$

Din relația obținută reiese că variația frecvenței tensiunii de alimentare impune variația valorii efective a tensiunii.

Ca sursă de tensiune și frecvență variabilă poate fi folosită schema din figura 14.9. Pentru a realiza conectarea mașinii sincrone la rețeaua de frecvență și tensiune constantă, generatorul sincron GS și mașina sincronă MS sunt excitate în curent continuu, curenții de excitație fiind menținuți constanți în perioada pornirii. Contactorul C_1 este conectat, iar C_2 deconectat. Motorul de curent continuu Mcc fiind pornit, pune în mișcare rotorul generatorului sincron, acesta alimentează mașina sincronă MS cu tensiune și frecvență variabilă. Tensiunea și frecvența generatorului sincron GS se vor majora proporțional cu turațiile motorului continuu.

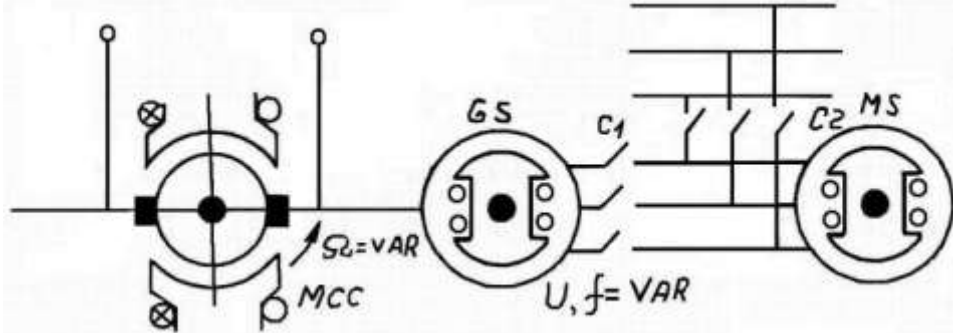


Fig 14.9 Sincronizarea mașinii sincrone cu rețeaua

Pentru valoarea frecvenței $f = 2\text{Hz}$ mașina sincronă MS intră în sincronism și rotorul își mărește viteza, proporțional cu frecvența generatorului GS. După ce viteza unghiulară a generatorului a devenit nominală și în sistemul GS—MS s-a instaurat frecvența nominală f_n , contactorul C_2 este conectat și ambele mașini prin metoda sincronizării fine sunt conectate în paralel cu rețeaua.

3.4 Procedul sincronizării fine

La o rețea electrică sunt conectate în general mai multe mașini sincrone. Astfel, într-o centrală electrică funcționează două sau mai multe generatoare sincrone conectate în paralel direct la borne sau după transformatoarele ridicătoare.

Conectarea în paralel a mașinii sincrone cu rețeaua trifazată se poate realiza prin procedul sincronizării fine. Procedul sincronizării fine este aplicat la conectarea fără șocuri de curent la rețea a generatoarelor sincrone, a compensatoarelor sincrone și a motoarelor sincrone cu pornire cu motor auxiliar.

Prin acest procedeu, atât la conectare, cât și după efectuarea acestei operații, curenții de circulație între mașina sincronă și rețea trebuie să fie neglijabili. La sincronizarea fină tensiunile mașinii sincrone și rețelei trebuie să fie egale, să aibă aceeași frecvență și să fie în fază; în plus, la sistemele trifazate, sistemul de tensiuni al mașinii sincrone trebuie să aibă aceeași succesiune a fazelor ca și rețeaua.

Mașina sincronă este adusă mai întâi la turația nominală și este excitată la tensiunea nominală.

Egalitatea valorilor efective ale tensiunilor se obține prin reglajul curentului de excitație al mașinii sincrone și se verifică cu ajutorul unui voltmetru, conectat succesiv la bornele rețelei, respectiv la bornele mașinii sincrone.

Egalitatea frecvențelor se obține prin reglajul fin al turației motorului de acționare al mașinii sincrone.

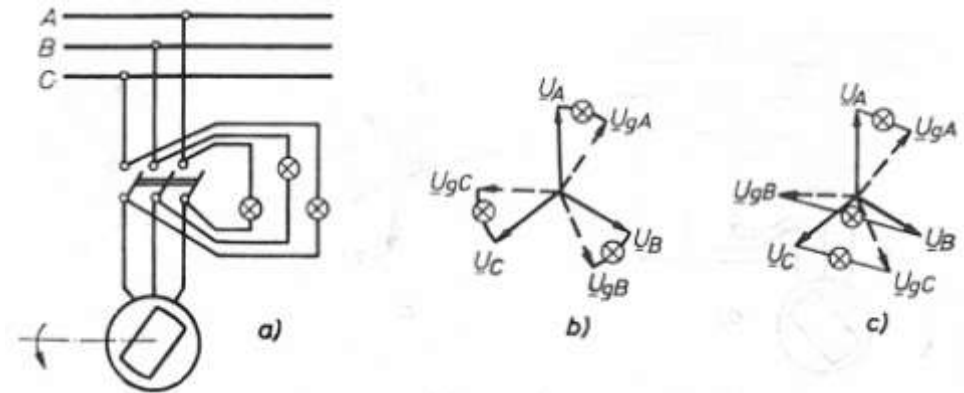


Fig. 14.10 Sincronizarea fină a mașinii sincrone:

a) sincronoscopul cu lămpi (schema cu lămpi stinse); b) diagrama de fazori la aceeași succesiunea fazelor; c) diagrama de fazori la succesiunea diferită a fazelor.

Pentru verificarea egalității frecvențelor, a succesiunii fazelor și pentru determinarea momentului în care tensiunile sunt în fază se utilizează aparate denumite sincronoscoape, construite în mai multe variante; dintre acestea, cel mai simplu este sincronoscopul cu lămpi. În figura 14.10.a) este dată schema de legături a unui sincronoscop în montajul cu lămpi stinse, iar în figura 14.10.b) și c) sunt reprezentate diagramele de fazori a rețelei și a generatorului, precum și tensiunile aplicate lămpilor în cazul în care succesiunea fazelor este aceeași (fig. 14.10.b), sau este diferită (fig. 14.10.c). În cazul în care succesiunea fazelor este aceeași, în apropiere de sincronism lămpile sincronoscopului se aprind și se sting simultan cu o frecvență foarte mică; când lămpile sunt stinse tensiunile generatorului sunt în fază cu tensiunile rețelei și se poate conecta generatorul în paralel cu rețeaua trifazată.

În cazul în care succesiunea fazelor este diferită, în apropierea de sincronism lămpile se aprind și se sting succesiv; pentru a obține succesiunea

corectă a fazelor se inversează între ele două faze ale mașinii sincrone, menținându-se neschimbate legăturile sincronoscopului.

Trebuie menționat că sincronoscopul poate fi realizat și cu trei voltmetre, iar momentul sincronizării este atunci când tensiunea indicată de cele trei voltmetre este nulă.

Verificarea succesiunii fazelor se poate efectua și cu ajutorul unor aparate dedicate sau cu ajutorul unui motor asincron cuplat succesiv la rețea, respectiv la bornele corespondente ale mașinii sincrone; mașina sincronă are aceeași succesiune a fazelor în cazul în care sensul de învârtire al motorului rămâne neschimbat la schimbarea alimentării de la rețea la mașina sincronă.

Conectarea la rețea a mașinii sincrone când ordinea de succesiune a fazelor este corectă, dar celelalte condiții nu sunt îndeplinite (de exemplu frecvențele nu sunt egale, sau tensiunile nu sunt în fază), este urmată de curenți de șoc, iar procesul de sincronizare poate fi însoțit de pendulații ale rotorului.

4. Desfășurarea lucrării

4.1 Se concepe și se realizează de către studenți o schemă electrică de comandă simplă folosind butoane de comandă, contactoare electromagnetice și un releu de timp. Schema de comandă va servi la alimentarea unor receptoare (motor asincron, lămpi electrice, etc.). Cerințele schemei electrice se vor preciza la începutul activității de laborator.

4.2 Se studiază schema instalației din laborator (planșele 1 și 2) și se identifică elementele instalației.

4.3 Se pune sub tensiune instalația de laborator prin închiderea întrerupătorului I_1 și apăsarea butonului de comandă BP_1 . Este alimentat contactorul de linie C_1 , iar contactele principale C_1 , din circuitul 3, pun sub tensiune schema electrică de forță, iar în schema electrică de semnalizare are loc aprinderea lămpii de culoare verde LS_1 . Tensiunea de linie a rețelei este indicată de voltmetrul V_1 .

Tensiunea și curentul în înfășurarea de excitație a motorului de curent continuu sunt indicate de aparatele de măsură V_4 , respectiv A_2 .

4.4 Se poziționează maneta comutatorului Q pe poziția 0 și se realizează pornirea motorului de curent continuu prin apăsarea butonului de comandă BP_2 . Pornirea este funcție de timp, având în schema de forță rezistențele R_4 și R_5 înseriate cu indusul, iar în schema de comandă contactoarele C_9 și C_{10} comandate prin releele de timp d_3 , respectiv d_4 .

Prin apăsarea butonului BP_2 este acționat contactorul C_8 , care prin contactele principale C_2 , în circuitul 7, conectează indusul mașinii de curent continuu la tensiunea continuă de la ieșirea punții redresoare PM . Indusul este înseriat cu rezistențele de pornire R_4 și R_5 . Tensiunea și curentul electric în indusul mașinii sunt indicate de aparatele de măsură V_5 , respectiv A_3 .

Observație! Înfășurarea de excitație a motorului de curent continuu a fost alimentată din primul moment al alimentării schemei electrice de forță. Este interzisă alimentarea indusului motorului de curent continuu fără alimentarea înfășurării de excitație!

Contactul auxiliar C_8 , din circuitul 12, activează releul de timp d_3 , care după câteva secunde își închide contactul normal-deschis temporizat la închidere d_3 , din circuitul 13, alimentând bobina contactorului C_9 . Prin închiderea contactului C_9 , în circuitul 6, este șuntată rezistența R_4 .

Contactul auxiliar C_9 , din circuitul 14, activează releul de timp d_4 , care după câteva secunde își închide contactul normal-deschis temporizat la închidere d_4 , din circuitul 15, alimentând bobina contactorului C_{10} . Prin închiderea contactului C_{10} , în circuitul 6, este șuntată rezistența R_5 , iar motorul funcționează pe caracteristica mecanică naturală. Finalizarea ciclului de pornire a motorului de curent continuu este semnalizată prin aprinderea lămpii de culoare portocalie LS_2 .

4.5 Se realizează modificarea vitezei motorului de curent continuu până la valoarea de 1500 rot/min prin modificarea valorii curentului de excitație, cu ajutorul potențiometrului de putere P_2 .

4.6 Se conectează înfășurarea de excitație a mașinii sincrone prin apăsarea butonului BP_3 . Prin apăsarea butonului BP_3 este alimentată bobina contactorului C_6 , care prin contactele principale C_6 , în circuitul 5, conectează înfășurarea de excitație a mașinii sincrone la tensiunea continuă de la ieșirea punții redresoare PM . Semnalizarea conectării înfășurarea de excitație a mașinii sincrone se realizează prin aprinderea lămpii de culoare albă LS_3 .

Tensiunea și curentul electric în înfășurarea de excitație a mașinii sincrone sunt indicate de aparatele de măsură V_6 , respectiv A_4 .

Mașina sincronă lucrează în regim de generator sincron trifazat antrenat de motorul de curent continuu. Tensiunea de linie a generatorului sincron este indicată de voltmetrul V_2 .

4.7 Se ajustează valoarea curentului de excitație al mașinii sincrone cu ajutorul potențiometrului de putere P_1 până la obținerea egalității tensiunilor de linie (a mașinii sincrone cu a rețelei).

4.8 Se trece la sincronizarea fină în vederea cuplării mașinii sincrone la rețea. Pentru sincronizarea fină se folosește un sincronizator asemănător celui din fig. 14.10, având un singur voltmetru V_3 conectat între o fază a rețelei și faza corespunzătoare a mașinii sincrone. Celelalte două voltmetre ale sincronizatorului nu sunt necesare (succesiunea fazelor fiind rezolvată), fiind înlocuite prin rezistoarele R_2 și R_3 , având valori egale cu rezistența internă a voltmetrului V_3 .

Prin ajustarea vitezei motorului de curent continuu (cu ajutorul potențiometrului de putere P_2) se obțin bătăi din ce în ce mai rare ale acului voltmetrului V_3 . În momentul în care tensiunea indicată de voltmetrul V_3 este egală cu zero se apasă butonul de comandă BP_4 , în circuitul 19. Este alimentat contactorul C_2 , iar contactele principale C_2 , din circuitul trifazat 4, conectează mașina sincronă la rețea, care în acest moment funcționează în regim de mers la gol ideal. Semnalizarea cuplării la rețea a mașinii sincrone se realizează prin aprinderea lămpii de culoare roșie LS_4 .

Observație! În ajutorul sincronizării fine, pe panoul instalației este montat un frecvențmetru analogic care indică frecvența tensiunilor generatorului sincron. Prin ajustarea vitezei motorului de curent continuu se va realiza frecvența de 50 Hz.

Tot în ajutorul sincronizării fine, pe panoul instalației este montat un indicator numeric care indică vitezei motorului de curent continuu. În acest scop, pe arborele mașinilor electrice este instalat un traductor de turație. Prin ajustarea vitezei motorului de curent continuu (cu ajutorul potențiometrului de putere P_2) se va realiza o viteză de rotație de 1500 rot/min, care este viteza de sincronism a mașinii sincrone.

4.9 Pentru trecerea mașinii sincrone în regim de motor trebuie întreruptă alimentarea mașinii de curent continuu, care până acum a funcționat ca motor auxiliar de lansare. Pentru acesta se apasă butonul de comandă BO_2 , conducând la declanșarea contactorului C_8 , deci la întreruperea alimentării cu energie electrică a indusului mașinii de curent continuu. Mașina sincronă trece în regim de motor, iar mașina de curent continuu în regim de generator, fiind antrenată de mașina sincronă.

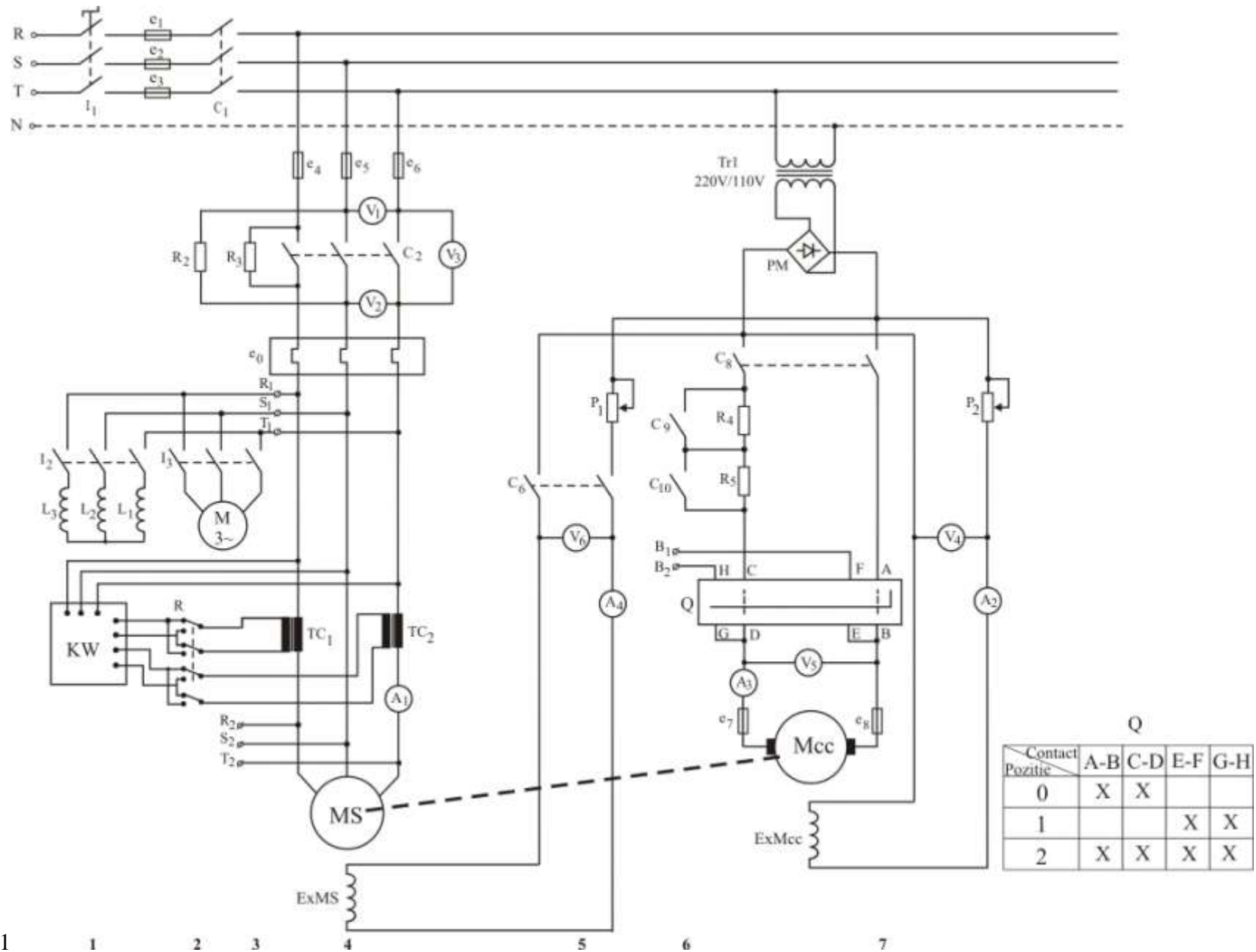
4.10 Se studiază regimul de compensator sincron al mașinii sincrone. Se modifică curentul de excitație al motorului sincron (cu ajutorul potențiometrului de putere P_1) în scopul obținerii curentului minim absorbit din rețea (regimul neutral). Se consemnează această valoare. Se conectează la bornele R_2 , S_2 și T_2 ale mașinii sincrone receptoare inductive (motor asincron, bobine cu miez feromagnetic). Se consemnează valoarea curentului absorbit din rețea prin citirea indicației ampermetrului A_1 . Se crește curentul de excitație al mașinii sincrone și se urmărește evoluția curentului absorbit din rețea. Se scade curentul de excitație al mașinii sincrone față de curentul stabilit la regimul neutral și se urmărește evoluția curentului absorbit din rețea. Se interpretează rezultatele obținute.

4.11 Se studiază regimul de motor sincron. Pentru aceasta se realizează încărcarea generatorului de curent continuu prin conecarea unui reostat la bornele B_1 și B_2 ale indusului. Acest lucru este realizat prin trecerea comutatorului Q de pe poziția 0, pe poziția 1. Se realizează diferite încărcări ale mașinilor, fără a se depăși valorile maxime ale ampermetrelor A_1 și A_3 . Se analizează funcționarea motorului sincron la diferite valori ale curentului de excitație pentru stabilirea curbelor în V (vezi fig.14.7).

Notă! Standul experimental permite studierea funcționării mașinii sincrone și în regimul de generator sincron. Pentru aceasta, se conectează un receptor trifazat la bornele R_1 , S_1 și T_1 . Este pornită mașina de curent continuu este pornită în regim de motor, este conectată înfășurarea de excitație a mașinii sincrone, dar nu mai este realizată sincronizarea cu rețeaua.

Deoarece circulația de putere este opusă la regimul de generator față de regimul de motor, pentru indicația directă a kilowattmetrului este necesară schimbarea sensului curenților prin bobinele de curent ale kilowattmetrului. Așadar, la funcționarea în regim de generator se apasă butonul B în circuitul 14. Este alimentată bobina releului R , iar contactele sale din circuitul 2 va determina schimbarea sensului curenților prin cele două bobine de curent. Cele două transformatoare de curent TC_1 și TC_2 servesc pentru adaptarea valorilor curenților de linie la valorile curenților prin bobinele de curent a kilowattmetrului.

4.12 Se prezintă concluzii legate de experimentele realizate.



Planșa 1

Planșa 2

