

IV. CONTROLUL VECTORIAL AL VITEZEI MOTOARELOR ASINCRONE

Dacă în cazul reglării scalare a vitezei variabilele de comandă (tensiuni, curenți, fluxuri magnetice) sunt controlate numai în amplitudine, în cazul reglării vectoriale, variabilele de comandă sunt controlate vectorial, adică atât în modul cât și în fază. Vectorii reprezentativi ai mărimilor de comandă pot fi controlați direct în modul și fază sau indirect, prin controlul componentelor acestora într-un sistem de referință convenabil ales. În reprezentarea vectorială a mărimilor controlate, se utilizează în prezent, în majoritatea cazurilor teoria fazorilor spațiali. Utilizând această teorie ca bază matematică pentru controlul vectorial al vitezei, ecuațiile care modelează mașina asincronă se pot scrie fie sub formă vectorială dacă sunt folosiți direct fazorii spațiali, fie sub formă matricială, dacă se lucrează cu componentele acestora după axele referențialului la care se face raportarea.

Controlul vectorial al motorului asincron constă în principiu în separarea componentelor activă (care produce cuplul electromagnetic) și reactivă (care produce fluxul magnetic) ale curentului statoric și în controlul independent al cuplului și câmpului magnetic prin intermediul acestor componente, la fel ca la mașina de curent continuu cu excitație separată. În esență, modelul fizic corespunzător comenzii vectoriale îl constituie motorul de curent continuu cu excitație separată, compensat.

IV. 1. ANALOGIA DINTRE MODELUL MAȘINII ASINCRONE ȘI MAȘINA DE CURENT CONTINUU

Modelul mașinii asincrone bifazate la care se poate reduce modelul oricărei mașini de curent alternativ s-a născut din rațiuni matematice, pentru a putea modela mașina printr-un sistem de ecuații simple din punct de vedere al tehnicii de calcul (de preferat ecuații cu coeficienți constanți). Pentru a realiza cuplajul magnetic dintre stator și rotor cu relații în care inductivitatea nu mai variază în funcție de poziția rotorului, s-au introdus noile variabile de curenți i_{ds} și i_{qs} (s-a procedat la utilizarea unui referențial comun $d-q$). Pornind de la acest artificiu matematic și din interpretarea fizică a modelului bifazat, s-a născut teoria unitară a mașinilor electrice și principiul metodelor de comandă reglabilă a mașinilor de curent alternativ, principiul cunoscut sub denumirea de "orientarea după câmp".

Există o mașină electrică la care acest model matematic este realizat și fizic: mașina de curent continuu. Analogia dintre modelul bifazat al mașinilor de curent alternativ și mașina de curent continuu a făcut posibilă conceperea unui procedeu de reglare standard, cu caracter profund general, în acționările electrice.

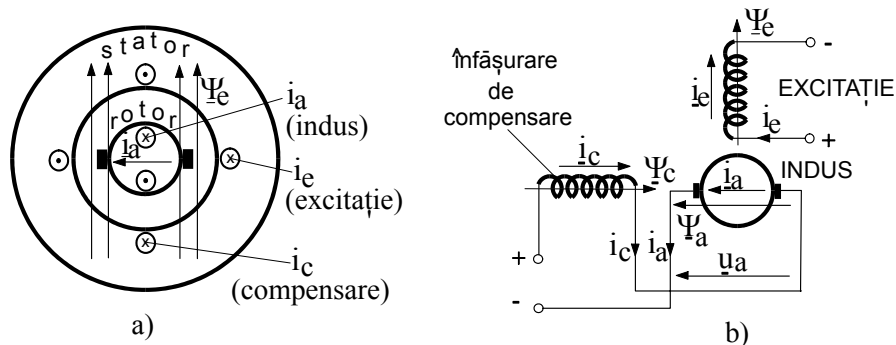


Fig. IV. 1. Mașina de curent continuu compensată: a) schema constructivă; b) schema electrică.

În figura IV.1 este prezentată o mașină de curent continuu fără poli aparenti, având două înfășurări statorice, de excitație și de compensare, cu axele magnetice perpendiculare una față de cealaltă. Înfășurarea rotorică, datorită existenței colectorului, apare și ea fixă. Curentul i_e care străbate

înfășurarea de excitație, produce un câmp magnetic căruia îi corespunde vectorul spațial $\underline{\Psi}_e$. Pentru a se produce un cuplu electromagnetic în mașină, înfășurarea indusului (rotorului) trebuie să fie parcursă de un curent i_a . Acest curent produce la rândul său un câmp de reacție $\underline{\Psi}_a$, orientat perpendicular pe fluxul de excitație, pe care îl deformează (figura IV.2).

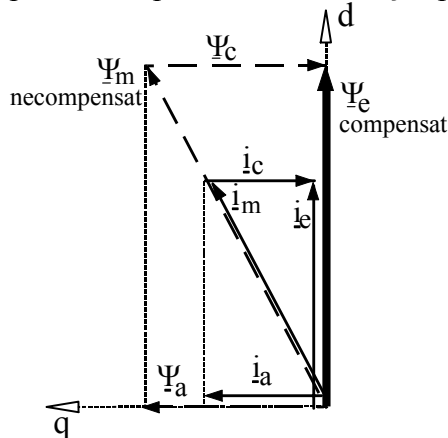


Fig. IV.2. Diagrama vectorială a mașinii de curent continuu perfect compensate.

Câmpul rezultat este reprezentat prin vectorul $\underline{\Psi}_m$ (flux de magnetizare). Prezența fluxului de reacție, este un fenomen nedorit. Din această cauză, câmpul de reacție produs de curentul rotoric se compensează cu un câmp produs de înfășurarea de compensare, cu axa magnetică în direcția fluxului de reacție a indusului. Aceasta produce un flux de aceeași valoare cu cel produs de indus, dar de sens invers.

$$\underline{\Psi}_c = -\underline{\Psi}_a \quad (4.1)$$

Prin compensarea reacției indusului, fluxul rezultat va coincide cu fluxul de excitație $\underline{\Psi}_e$ (figura IV.2). Cuplul electromagnetic produs de mașină se poate scrie ca un produs vectorial

$$\bar{M} = k(\bar{i}_a \times \bar{\Psi}_e), \quad (4.2)$$

dintre vectorul spațial de flux $\underline{\Psi}_e$ și vectorul spațial de curent din indus \underline{i}_a , conform figurii IV.3 a), unde k este constanta constructivă a mașinii. Deoarece reacția indusului este compensată, axa magnetică a înfășurării rotorice este perpendiculară pe direcția fluxului de excitație, astfel încât cuplul produs va fi maxim, având expresia:

$$M = k \Psi_e i_a, \quad (4.3)$$

valabilă atât în regim tranzitoriu, cât și în regim staționar.

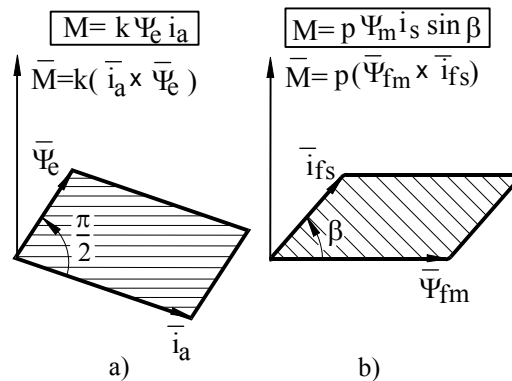


Fig. IV.3. Vectorul cuplului electromagnetic definit ca produs vectorial: a) mașina de curent continuu; b) mașina asincronă.

Cuplul electromagnetic instantaneu dezvoltat de mașina asincronă bifazată poate fi scris sub forma (1.115), în care dacă se înlocuiește curentul prin statoric prin componentele sale (1.92), iar fluxul prin componentele din planul complex:

$$\underline{\Psi}_{fm} = \Psi_{dm} + j\Psi_{qm}, \quad (4.4)$$

se obține pentru cuplul electromagnetic instantaneu expresia:

$$M = p(\Psi_{dm}i_{qs} - \Psi_{qm}i_{ds}). \quad (4.5)$$

Ținând cont de interpretarea vectorială a mărimilor, cuplul instantaneu poate fi scris:

$$\bar{M} = p(\bar{\Psi}_{fm} \times \bar{i}_{fs}), \quad (4.6)$$

având modulul:

$$M = p \Psi_m i_s \sin \beta. \quad (4.7)$$

Unghiul β este conform figurii IV. 3, unghiul dintre fazorii reprezentativi ai fluxului și curentului statoric. Deoarece nici una din mărimile din relația (4.7) nu depinde de referențialul utilizat, nu s-a mai folosit indicele f . Rezultă concluzia că expresia scalară a cuplului electromagnetic nu depinde de sistemul de referință ales. Modulul cuplului este proporțional cu aria paralelogramului format de cei doi fazorii spațiali ($\underline{\Psi}_{fm}$ și \underline{i}_{fs}).

Dacă în relația (4.5) se anulează al doilea termen, expresia cuplului dezvoltat de mașina asincronă devine asemănătoare cu expresia cuplului mașinii de curent continuu (4.3). Expresia cuplului în forma (4.5), este valabilă pentru orice poziție a referențialului comun $d - q$ în spațiu. În figura IV. 4, referențialul este solidar cu statorul.

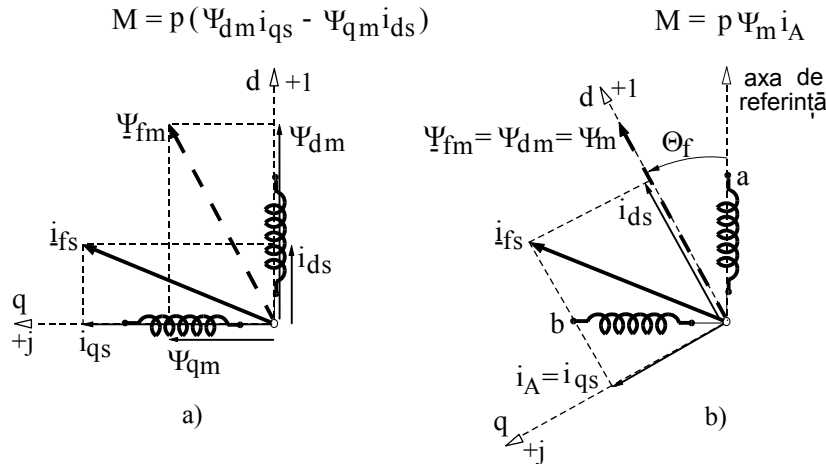


Fig. IV.4. Expresia cuplului mașinii asincrone: a) într-un referențial solidar cu statorul; b) într-un referențial solidar cu fluxul magnetic.

Orientând axa d reală a referențialului comun după direcția fluxului magnetic rezultat $\underline{\Psi}_{fm}$ (ca în figura IV.4. b)), componenta imaginară a fluxului Ψ_{qm} se anulează, rezultând:

$$\underline{\Psi}_{fm} = \Psi_{dm} = \Psi_m \cdot \quad (4.8)$$

Expresia cuplului electromagnetic pentru noua poziție a referențialului devine:

$$M = p \Psi_m i_A, \quad (4.9)$$

în care $i_A = i_{qs}$ este componenta activă a curentului statoric. Fiind perpendiculară pe direcția fluxului, contribuie la producerea cuplului electromagnetic.

Analogia dintre modelul mașinii asincrone și modelul mașinii de curent continuu se vede foarte clar dacă se compară relațiile (4.3) și (4.9), relații în care sunt puse în evidență contribuția curentului activ pe de o parte și contribuția fluxului magnetic pe de altă parte, la producerea cuplului electromagnetic.

Precizare. În cazul mașinilor asincrone trifazate, în expresia cuplului electromagnetic, numărul de perechi de poli ai mașinii p , se înlocuiește cu coeficientul $(3/2)p$, analogia dintre modelul bifazat al mașinii trifazate și mașina de curent continuu rămânând valabilă.

Metoda controlului “orientat după câmp” (controlului vectorial), se bazează pe analogia dintre mașina asincronă și mașina de curent continuu. Pentru aceasta, se explicitează mărimile cu ajutorul cărora se pot controla separat cele două componente care produc cuplul, realizând controlul magnetic și mecanic al mașinii. Se poate realiza în acest mod reglarea mașinii în curent continuu, cu performanțe ridicate.

IV.2. PRINCIPIUL ORIENTĂRII DUPĂ CÂMP A MAȘINII ASINCRONE

Utilizarea mașinii asincrone în sistemele de acționare reglabile conduce la o serie de probleme impuse de alimentarea mașinii de la convertoarele statice de frecvență, precum și de complexitatea reglării. Dintre acestea, cea mai importantă este reglarea și controlul cuplului electromagnetic. Caracterul convertorului de alimentare impune mărimea de reglare (tensiune sau curent de ieșire) și în funcție de algoritmul de control, evoluția fazorului spațial al tensiunii sau curentului statorului mașinii asincrone.

Procedeele de reglare bazate pe principiul orientării după câmp pe lângă faptul că permit reglarea cuplului cu performanțe ridicate (inerție mică și bine amortizat), au un caracter sistematic și general.

După cum s-a văzut anterior, mașina de curent continuu cu excitație separată și perfect compensată este prin construcție "orientată după câmp". Acesta este motivul pentru care această mașină poate fi considerată mașină de referință. Aplicarea principiului orientării după câmp unei mașini cu câmp învârtitor impune analogia acesteia cu mașina de referință. Principiul orientării după câmp se bazează pe analogia mașinii de curent alternativ (cu câmp învârtitor) cu mașina de curent continuu, realizând separarea controlului mărimilor mecanice de cele magnetice, ceea ce conduce în final la două bucle de reglare independente, cu mărimi de reglare în curent continuu.

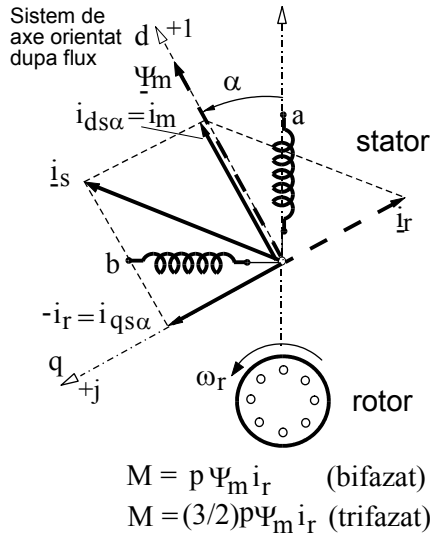


Fig. IV.5. Diagrama fazorială explicativă pentru aplicarea principiului orientării după câmp la mașina asincronă.

de curent continuu, curentul i_{ds} corespunde curentului de excitație i_e . Curentul rotoric, necesar producerii cuplului electromagnetic, apare în cazul mașinii asincrone ca urmare a fenomenului de inducție electromagnetică, fapt care presupune o variație a fluxului magnetic, ceea ce la mașina asincronă este un fenomen evident, din cauzele precizate anterior. Rotorul fiind în scurtcircuit, tensiunea electromotoare indusă în înfășurările sale va produce curentul i_r , al cărui vector spațial este perpendicular pe direcția fluxului de magnetizare Ψ_m . Dar suma vectorială a curenților dă curentul de magnetizare i_m în direcția fluxului. Rezultă în consecință: $i_r = -i_{qs}$. Interacțiunea dintre fluxul de magnetizare Ψ_m și curentul rotoric i_r produce cuplul electromagnetic al mașinii asincrone. Curentului de compensare i_c îi corespunde curentul statoric i_{qs} , care anihilează efectul curentului de sarcină care tinde să deformeze fluxul Ψ_m . Curenții statorici, sunt reprezentați prin vectorul spațial \underline{i}_s , care are două componente:

- componenta reactivă, care produce câmpul:

$$i_R = i_{ds} = i_m ; \quad (4.10)$$

- componenta activă, care produce cuplul, egală în modul cu curentul rotoric:

$$i_A = i_{qs} = -i_r . \quad (4.11)$$

Având în vedere faptul că mașina asincronă se alimentează prin stator, curentul rotoric ia naștere liber prin fenomenul de inducție, astfel încât întotdeauna va exista egalitatea (4.11). Prin aceasta va exista și perpendicularitatea dintre $\underline{\Psi}_m$ și \underline{i}_r . Se poate afirma că mașina asincronă se autocompensează.

Figura IV.6. prezintă schema bloc corespunzătoare unui sistem de reglare având la bază principiul orientării după câmp a mașinii asincrone, alimentată de la un convertor static de frecvență. În această figură sunt puse în evidență cele două bucle de reglare: a componentei active (cu efecte mecanice – ω_r) și respectiv a componentei reactive (cu efecte magnetice – Ψ_m) ale curentului statoric.

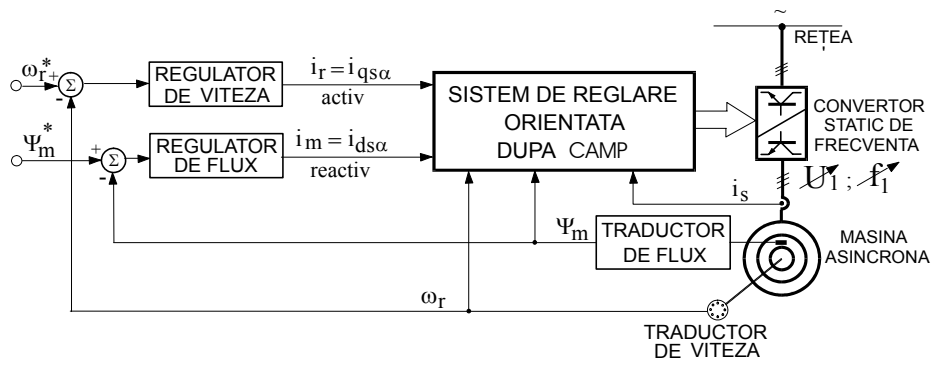


Fig. IV.6. Schema de principiu a sistemului de reglare după câmp.

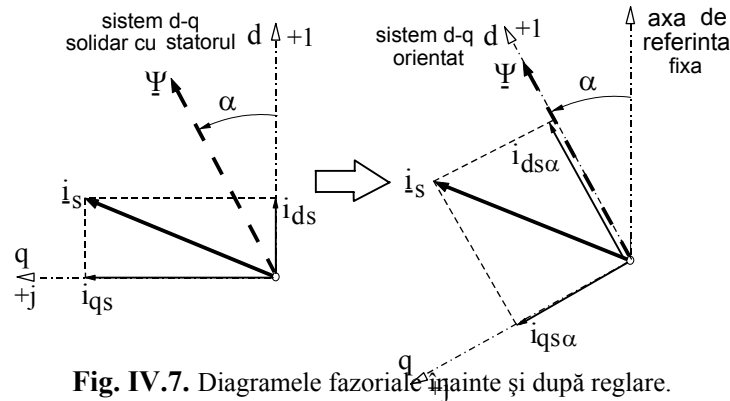


Fig. IV.7. Diagramele fazoriale înainte și după reglare.

Pentru a aplica principiul orientării după câmp, este necesar să se cunoască poziția fluxului de magnetizare (conform figurii IV.7). Componentele Ψ_d și Ψ_q ale fluxului într-un sistem de axe $d - q$ solidar cu statorul se obțin prin calcul sau prin măsurare. Modulul fazorului de flux dat de:

$$\Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}, \quad (4.12)$$

va permite calculul funcțiilor:

$$\cos \alpha = \frac{\Psi_d}{\Psi}; \quad \sin \alpha = \frac{\Psi_q}{\Psi}. \quad (4.13)$$

Blocul care calculează modulul fluxului (4.12) și poziția acestuia (4.13) este *analizorul de fazor AF*, prezentat în figura IV.8.

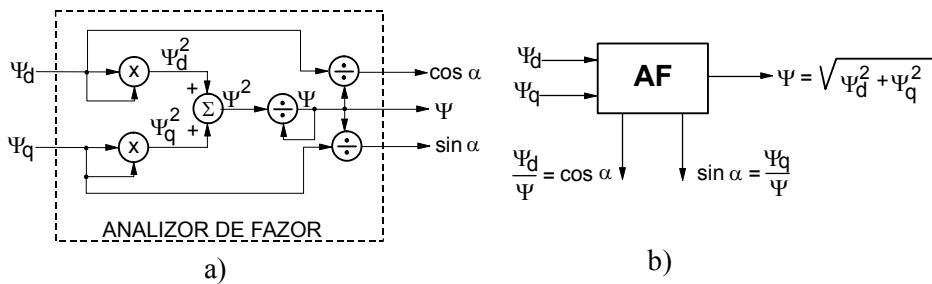


Fig. IV.8. Blocul analizor de fazor: a) diagrama structurală; b) simbolul blocului.

Cunoscând poziția α a fazorului de flux, se poate efectua transformarea de axe din figura IV.9, în urma căreia se obțin mărimi orientate după flux.

Din punct de vedere matematic, este vorba de rotirea sistemului de axe cu unghiul α , cu ajutorul operatorului de rotație $[TA(\alpha)]$, conform (1.37).

Mărimile orientate după câmp se pot exprima în funcție de cele ale modelului bifazat fix, prin relațiile:

$$\begin{cases} i_{ds\alpha} = i_{ds} \cos \alpha + i_{qs} \sin \alpha \\ i_{qs\alpha} = -i_{ds} \sin \alpha + i_{qs} \cos \alpha \end{cases} \quad (4.14)$$

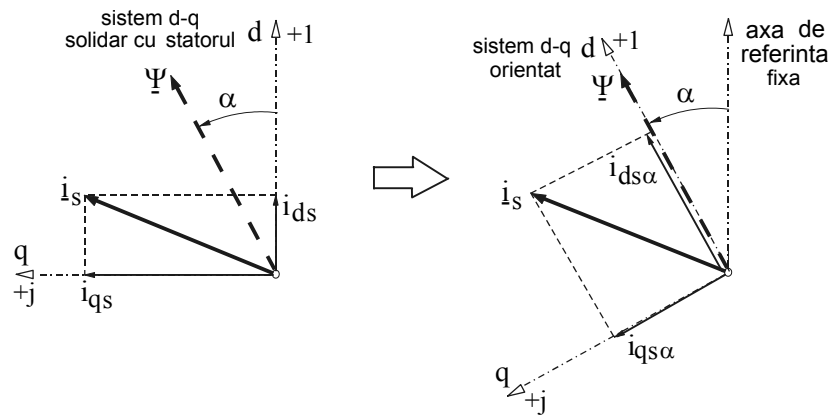


Fig. IV.9. Fazorul de curent înainte și după transformarea de axe.

Operațiile de transformare de axe (4.14) sunt efectuate de blocul TA (figura IV.10 a) – diagrama structurală, b) – simbolul blocului), care poate fi analogic sau numeric.

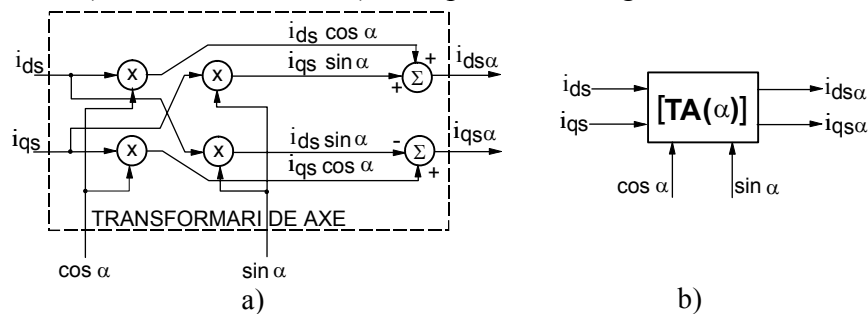


Fig. IV.10. Blocul care realizează transformarea de axe: a) diagrama structurală; b) simbolul blocului.

Cu ajutorul blocurilor AF și TA, se pot concepe și realiza scheme de comandă pentru mașinile asincrone după principiul orientării după câmp. Conform acestui principiu, mărimile de comandă sunt componentele curentului statoric. Din acest motiv, cea mai simplă schemă de comandă este aceea la care comanda se realizează în curent, conform figurii IV.11.

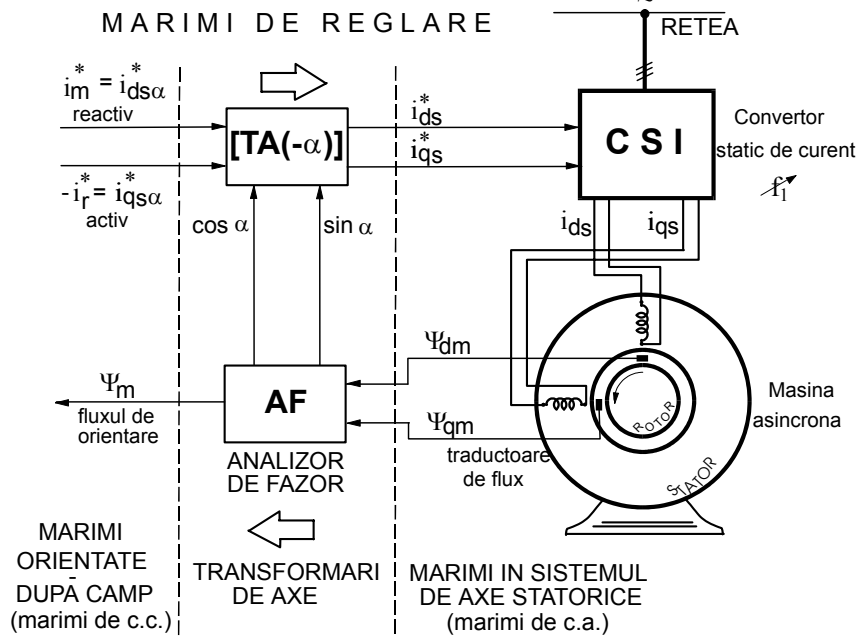


Fig. IV.11. Principiul controlului în curent a mașinii asincrone pe baza orientării după câmp, cu măsurarea directă a fluxului.

Satorul mașinii este alimentat de la un convertor static de frecvență cu caracter de sursă de curent CSI. Blocul AF primește informații în urma măsurării fluxului din întrefier după direcțiile or-

togonale $d - q$ și furnizează informații cu privire la poziția fazorului de flux Ψ_m . Blocul TA are rolul de a transforma sistemul $d - q$ orientat după flux, în sistemul $d - q$ solidar cu statorului, calculând mărimile de comandă i_{ds}^* și i_{qs}^* din mărimile impuse, orientate după flux:

- curentul de magnetizare (reactiv):

$$i_{ds}^* = i_m^* = i_R^* ; \quad (4.15)$$

- curentul rotoric (activ):

$$i_{qs}^* = -i_r^* = i_A^* ; \quad (4.16)$$

Transformarea este în sens invers față de cea descrisă de relația (4.14). Acesta este motivul pentru care argumentul este negativ.

Dacă convertorul static de frecvență are caracterul unei surse de tensiune CSU ca în figura IV.12, mărimile de comandă pentru tensiune u_{ds}^* și u_{qs}^* se calculează din mărimile de comandă ale curentilor i_{ds}^* și i_{qs}^* . Acestea din urmă rezultă din blocul TA care efectuează o transformare de axe pentru mărimile de control impuse (componetale activă și respectiv reactivă ale curentului statoric), conform relațiilor (4.15) și (4.16).

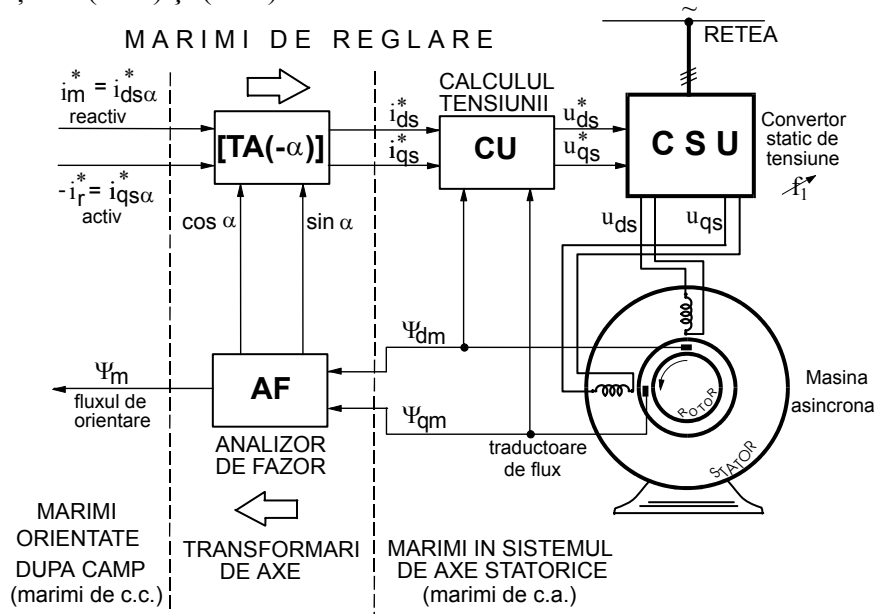


Fig. IV.12. Principiul controlului în tensiune a mașinii asincrone pe baza orientării după câmp, cu măsurarea directă a fluxului.

Tensiunea statorică se calculează cu relația (1.77), unde:

$$\underline{\Psi}_s = \underline{\Psi}_m + \underline{\Psi}_{\sigma s} = \underline{\Psi}_m + L_{\sigma s} \underline{i}_s , \quad (4.17)$$

din care, prin descompunerea pe cele două axe ale referențialului $d - q$, se vor obține relațiile:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} (\Psi_{dm} + L_{\sigma s} i_{ds}) \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} (\Psi_{qm} + L_{\sigma s} i_{qs}) \end{cases} . \quad (4.18)$$

Aceste relații sunt implementate de blocul de calcul al tensiunii CU, conform figurii IV.13 (diagrama structurală – a) și simbolul blocului b)).

Studiind ecuațiile de funcționare ale mașinii asincrone și diagrama fazorială, se poate constata că din cei trei fazori spațiali $\underline{\Psi}_m$, \underline{u}_s și \underline{i}_s , dacă se cunosc doi, al treilea se poate în principiu determina. Este posibil să se realizeze o schemă de control cu orientare după câmp fără a se măsura direct fluxul din întrefier. Este în schimb necesar a se măsura curentul și tensiunea statorică.

Componentele fluxului de magnetizare Ψ_m , din relația (4.17) se pot scrie:

$$\begin{cases} \Psi_{dm} = \Psi_{ds} - \Psi_{\sigma ds} = \Psi_{ds} - L_{\sigma s} i_{ds} \\ \Psi_{qm} = \Psi_{qs} - \Psi_{\sigma qs} = \Psi_{qs} - L_{\sigma s} i_{qs} \end{cases} , \quad (4.19)$$

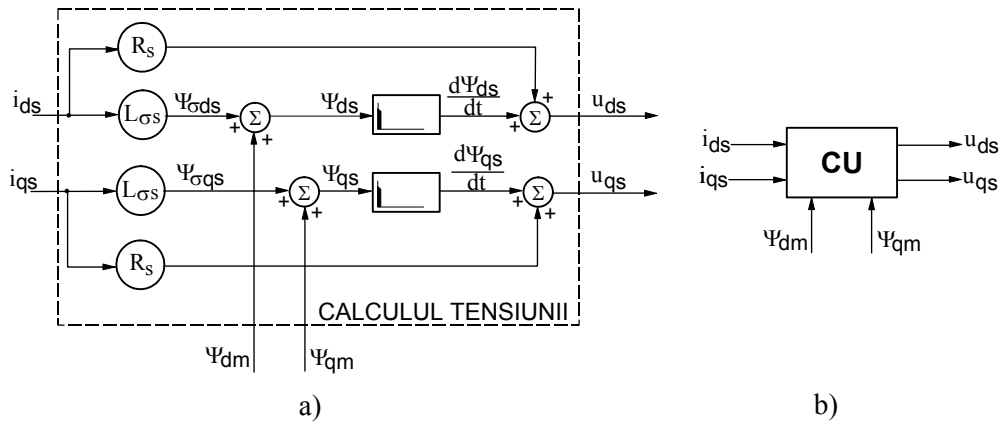


Fig. IV.13. Blocul calculatorului de tensiune: a) diagrama structurală; b) simbolul blocului.

în care fluxul statoric se calculează din relația (4.17), prin integrare:

$$\Psi_{ds} = \int_0^t (u_{ds} - R_s i_{ds}) dt ; \quad \Psi_{qs} = \int_0^t (u_{qs} - R_s i_{qs}) dt . \quad (4.20)$$

Operațiile descrise de (4.19) și (4.20) sunt efectuate de blocul de calcul al fluxului $C\Psi_m$ din figura IV.14.

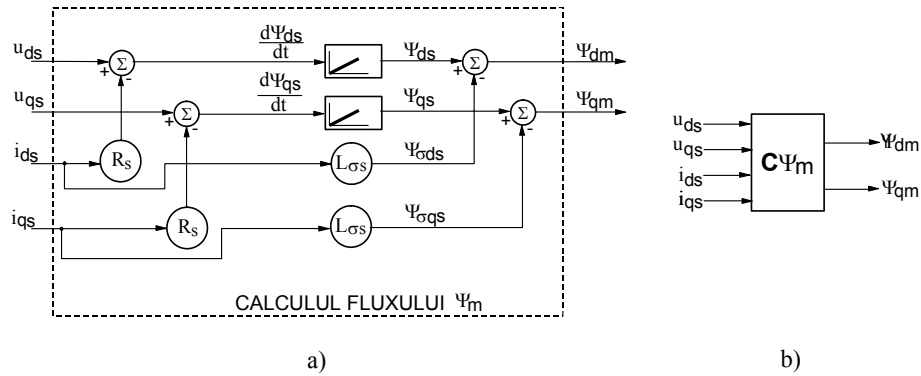


Fig. IV.14. Blocul de calcul al fluxului din întrefier: a) diagrama structurală; b) simbolul blocului.

Schema de reglare cu calculul fluxului (măsurare indirectă) este prezentată în figura IV.15., în care fluxul de orientare este calculat cu blocul $C\Psi_m$, care primește informații despre tensiunile și curenții statorice măsurate.

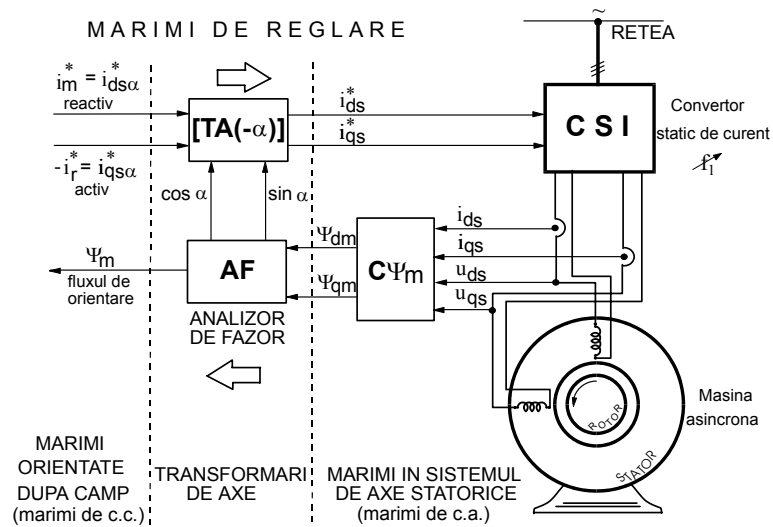


Fig. IV.15. Principiul comenzii în curent a mașinii asincrone pe baza orientării după câmp, cu măsurarea indirectă a fluxului.

După cum s-a precizat anterior, mărimile de reglare sunt componentele activă și reactivă ale curentului, prin intermediul cărora pot fi controlate independent cele două mărimi care produc cuplul electromagnetic: fluxul din întrefier prin intermediul curentului i_m și curentul rotoric i_r . Schema cea mai direct corelată cu principiul orientării după câmp este cea cu comanda în curent a mașinii asincrone. Din această cauză, schema din figura IV.11 este mai simplă decât cea din figura IV.12, cu comanda în tensiune, deoarece tensiunea este o mărime care participă indirect la producerea cuplului electromagnetic.

Pe lângă aceasta, măsurarea directă a fluxului conduce la scheme mai simple (figura IV.11), față de cele la care fluxul se determină indirect din curent și tensiune, prin intermediul traductoarelor (figura IV.15).

IV.3. SISTEME DE REGLARE CU ORIENTARE DUPĂ CÂMP

Principalii factori care determină structura unui sistem de reglare automată a vitezei conceput pe principiul orientării după câmp sunt:

- convertorul static de frecvență (CSF), care alimentează mașina asincronă;
- traductoarele, care impun natura mărimilor de reacție în bucla de reglaj;
- fluxul după care se realizează orientarea după câmp: rotoric, statoric sau din întrefier.

În funcție de mărimile măsurate, se pot concepe trei variante structurale pentru schemele de reglare automată a vitezei pe principiul orientării după câmp.

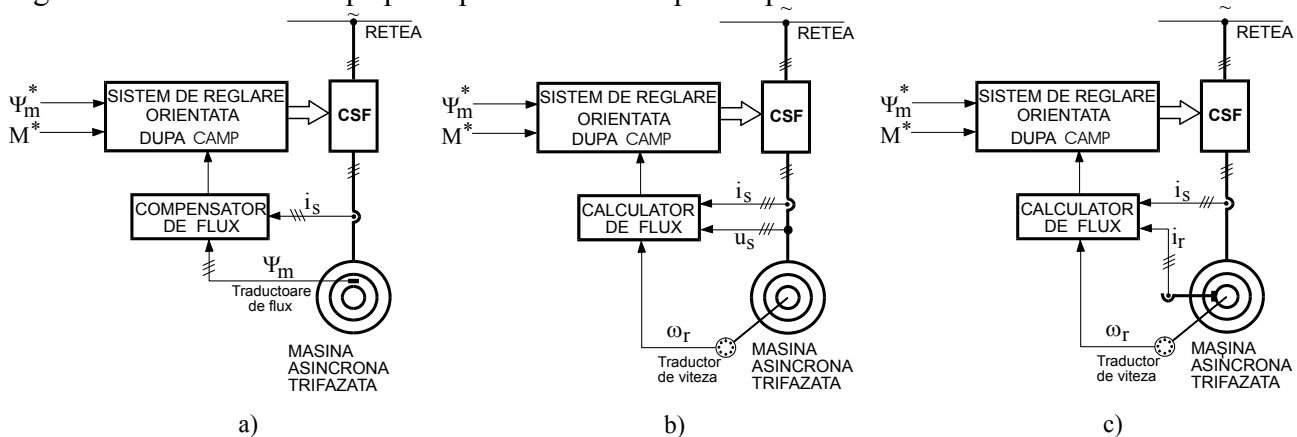


Fig. IV.16. Posibilități de determinare a fluxului la schemele de reglare a vitezei bazate pe principiul orientării după câmp: a) măsurarea directă a fluxului din întrefier; b) calculul fluxului de orientare din curentul și tensiunea statorică sau din curentul statoric și viteza unghiulară a rotorului; c) calculul fluxului de orientare pe baza modelului de curent al mașinii.

Prima metodă utilizează măsurarea directă a câmpului (figura IV.16. a)). În acest caz, mărimea măsurată este chiar o mărime de reglaj, din care cauză schemele de reglare sunt mai puțin sensibile la erorile datorate variațiilor parametrilor mașinii. Pentru a avea acces la flux (câmp), se folosesc captatori de flux plasați convenabil în întrefierul mașinii. Aceștia pot fi:

- cu efect Hall – plasați sub dinții statorului; care vor indica valorile locale ale fluxului. Pentru a obține fluxul global, valorile indicate de traductori vor trebui prelucrate ulterior. Fluxul măsurat va fi perturbat de creștăturile rotorice și va conține numeroase armonici;
- înfășurări suplimentare în stator – care prezintă dezavantajul că la viteze scăzute, rezistența înfășurării devine predominantă, ceea ce necesită un grad oarecare de compensare. Din această cauză nu se pot utiliza la viteze foarte scăzute, fiind interzise la acționări de precizie.

Traductoarele de flux fac să se piardă principalele avantaje ale mașinii asincrone: simplitate, robustețe, preț de cost scăzut.

A doua metodă (figura IV.16 b)), se bazează pe determinarea indirectă a câmpului, care este calculat din curentii și tensiunile statorice și viteze rotorului. Schemele concepute în această varian-

tă sunt influențate de variația rezistenței rotorice și de saturația fierului, dar elimină problemele în primul rând constructive legate de măsurarea directă a fluxului.

A treia metodă (figura IV.16 c)), se poate aplica numai mașinilor cu rotorul bobinat, la care câmpul este calculat din curenții statorici și rotorici. Metoda conferă avantajele precedente și nu este influențată de rezistența rotorică (numai de saturația fierului).

Metodele de reglare bazate pe principiul orientării după câmp pot fi aplicate indiferent de tipul convertorului static de frecvență. Influența naturii convertorului se reflectă în structura schemei de reglare numai în ceea ce privește calculul mărimilor de comandă. Cele mai simple sunt cele care utilizează convertoare statice cu circuit intermediar de curent continuu cu caracter de sursă de curent (CSI), sau invertoarele PWM cu curent sinusoidal reglat. Utilizarea convertoarelor cu caracter de sursă de tensiune (CSU) realizate cu invertoare cu șase pulsuri sau PWM, va necesita scheme de reglare mai complicate.