
Bazele sistemelor de reglare

Cu orientarea după câmp,
Direct stator flux and torque control. DTC
Control după performanțe energetice

Principiul orientării după câmp

Scopul

- ✓ Obținerea unor performanțe îmbunătățite ale sistemelor de acționare,
- ✓ Reducerea duratei regimurilor tranzitorii

Durata regimurilor tranzitorii depinde de:

- ❑ Constanta de timp mecanică a acționării, momentul de inerție al maselor în mișcare
- ❑ Timpul de variație a cuplului, se poate reduce dacă:

$$C = k_c \cdot \phi \cdot I$$

Este expresia cuplului mașinii de curent continuu , unde este realizată constructiv ortogonalitatea dintre flux și curent.

Expresia generală fazorială a cuplului mașinilor:

$$C = p \cdot \Im m \{ \underline{\Psi}_S^* \cdot \underline{i}_S \}$$

Principiul orientării după câmp

Ținând seama de componentele ortogonale ale fazorilor de flux și curent. Rezultă:

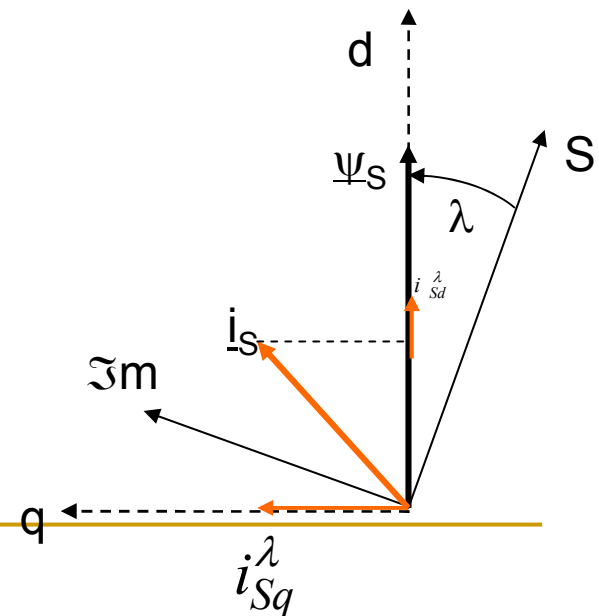
$$C = p \left(\Psi_{Sd} \cdot i_{Sq} - \Psi_{Sq} \cdot i_{Sd} \right)$$

Dacă se realizează $\Psi_{Sq} = 0$, atunci rezultă expresia cuplului mașinii de c.c.

Dacă se orientează sistemul de coordonate după flux și se menține fluxul constant, atunci variația cuplului va fi de forma:

$$C = p \cdot \Psi_{Sd}^{\lambda} \cdot i_{Sq}^{\lambda}$$

λ reprezintă unghiul sistemului de coordonate ales,
În raport cu sistemul fix de coordonate legat de stator.



Principiul orientării după câmp

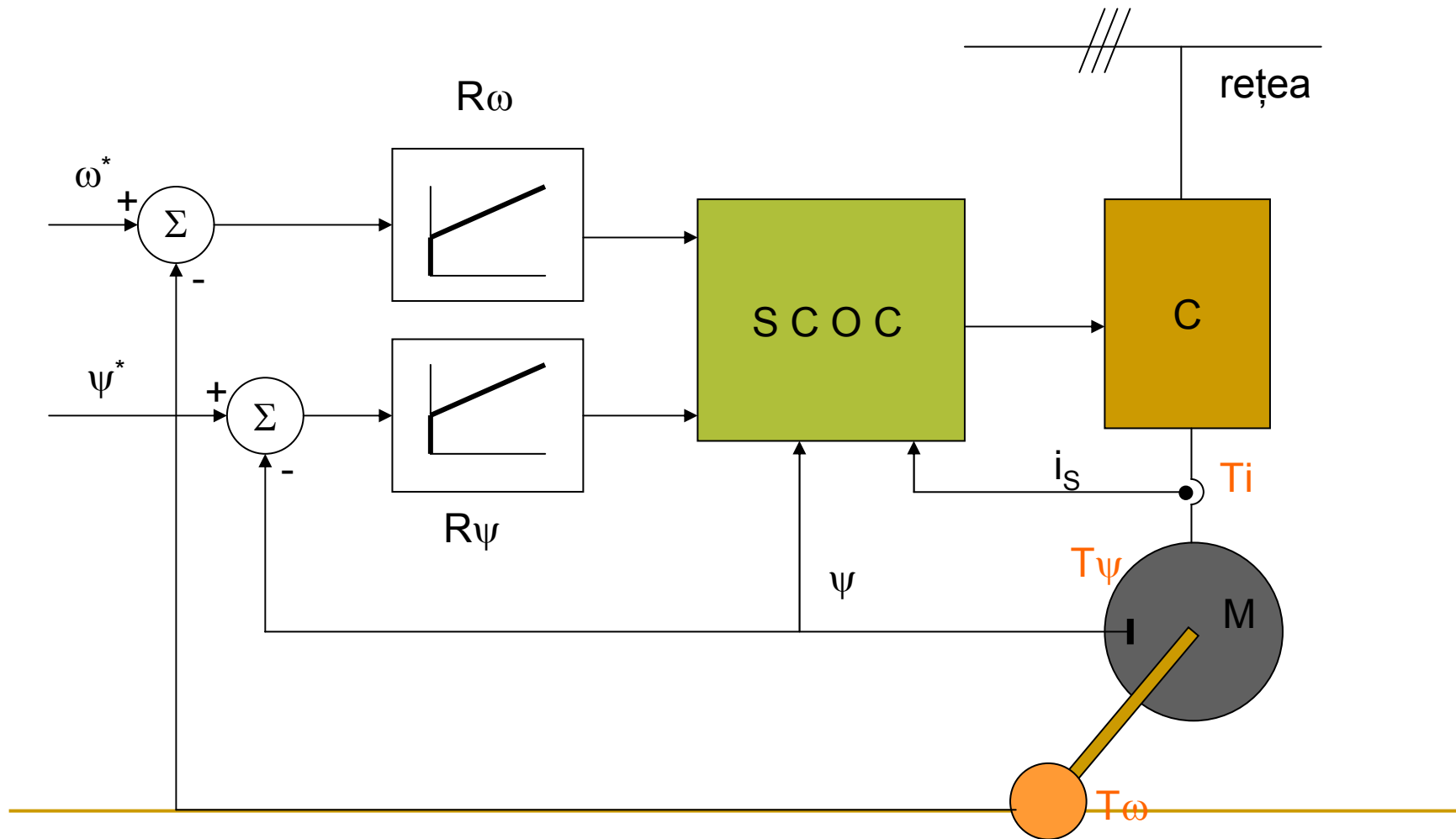
Ce se obține

Noile mărimi orientate sunt constante sau încet variabile în timp,

Avantaje:

- Mărimile cu care se lucrează sunt de tip continuu,
 - Se cunosc bine metode de reglare în c.c.
 - Regulatele sunt cunoscute
-

Schema bloc a sistemului de acționare



Sistemul de calcul pentru orientare după câmp SCOC

Construcția SCOC este determinată de:

- Tipul motorului,
 - De inducție : rotor bobinat
rotor în colivie
 - Sincron cu excitație electromagnetică
cu magnet permanent
 - Cu reluctanță variabilă fără magnet permanent
cu magnet permanent
 - Cu câmp transversal

- Tipul convertorului,
 - De tensiune sinusoidală
altă formă
 - De curenți sinusoidal
altă formă

Sistemul de calcul pentru orientare după câmp SCOC

- Mărimea de orientare.
 - Fluxul statoric
 - Fluxul rotoric
 - Fluxul din întrefier, de magnetizare
 - Fluxul de excitație
- Mărimile măsurate,
 - Curentul statoric
 - Tensiune statorică
 - Curentul rotoric
 - Viteza de rotație
 - Poziția
 - Fluxul

Deci se pot construi în foarte multe variante.

Există un număr de blocuri care se regăsesc în orice SCOC.

Transformarea mărimilor trifazate în bifazate și invers, blocul TS

Calculul componentelor fazorilor în alte sisteme, blocul TA

Calculul modulului și fazei vectorilor din componente ortogonale, blocul AF

Calculul unghiului și apoziției, blocul C_ω

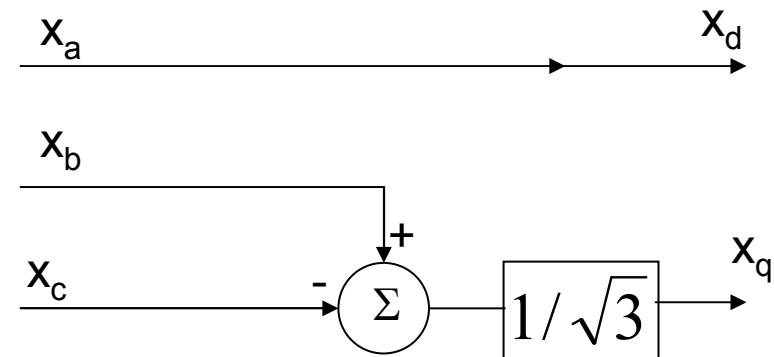
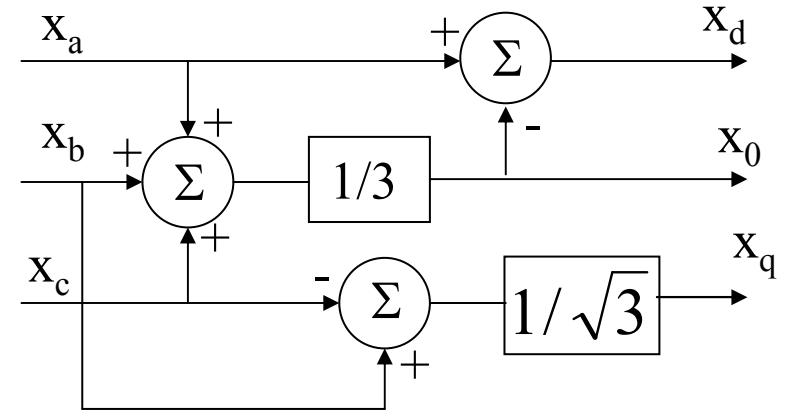
Blocul transformare de sistem TS

Calculul componentelor ortogonale

$$x_d = x_a - x_0$$

$$x_q = \frac{1}{\sqrt{3}}(x_b - x_c)$$

$$x_0 = \frac{1}{3}(x_a + x_b + x_c)$$

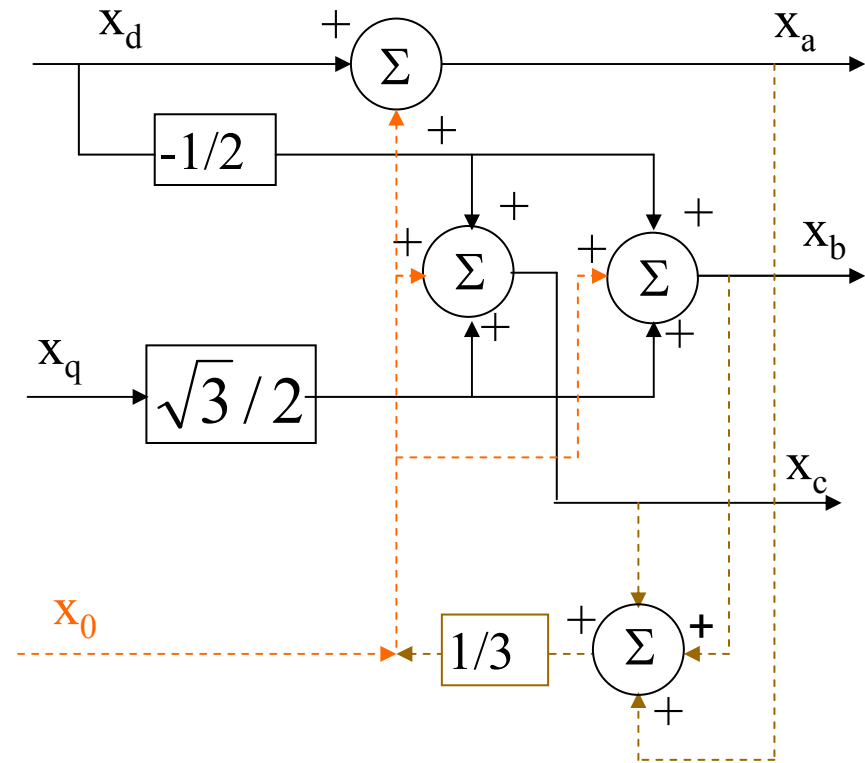


Blocul transformare de sistem TS

$$x_a = x_d + x_0$$

$$x_b = -\frac{1}{2}x_d + \frac{\sqrt{3}}{2}x_q + x_0$$

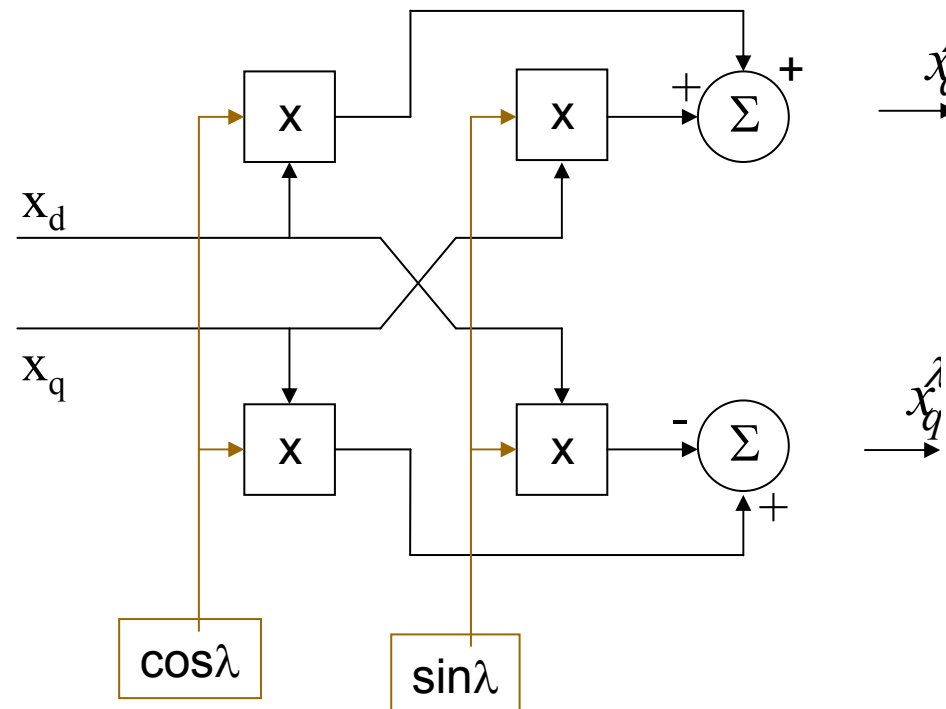
$$x_c = -\frac{1}{2}x_d - \frac{\sqrt{3}}{2}x_q + x_0$$



Blocul transformări de axe TA

Calculează componentele fazorului într-un alt sistem ortogonal decaat cu unghiul λ .

$$\begin{bmatrix} x^\lambda \\ y^\lambda \end{bmatrix} = [D(\lambda)] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$



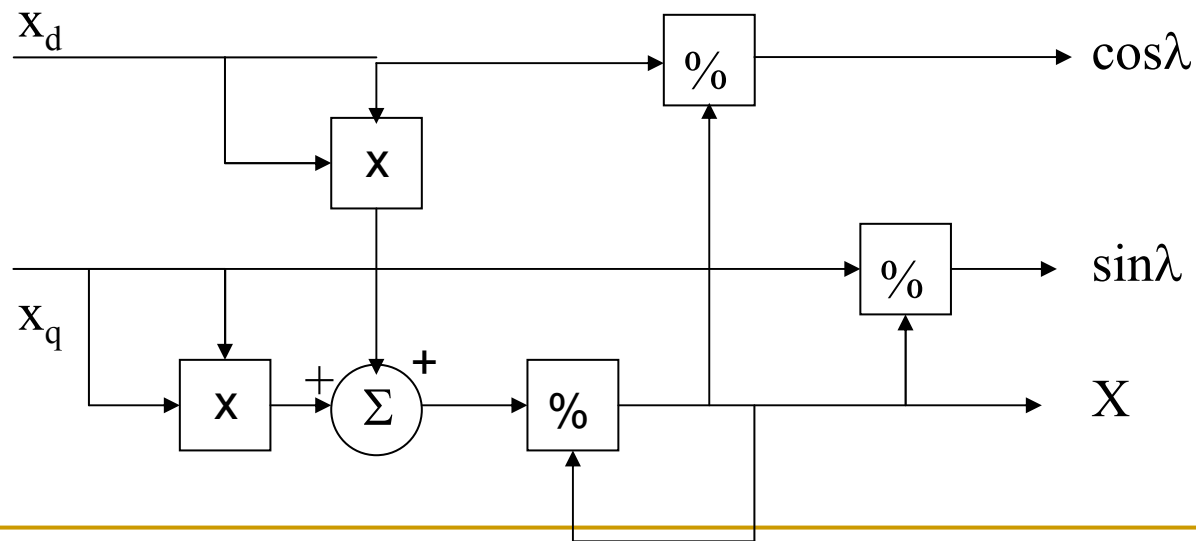
Blocul analizor fazor AF

Din două componente ortogonale se calculează modulul și unghiul fazorului

$$x = \sqrt{x_d^2 + x_q^2}$$

$$\cos \lambda = \frac{x_d}{x}$$

$$\sin \lambda = \frac{x_q}{x}$$



Calculul fluxului de orientare

Din fluxul și curentul statoric măsurat

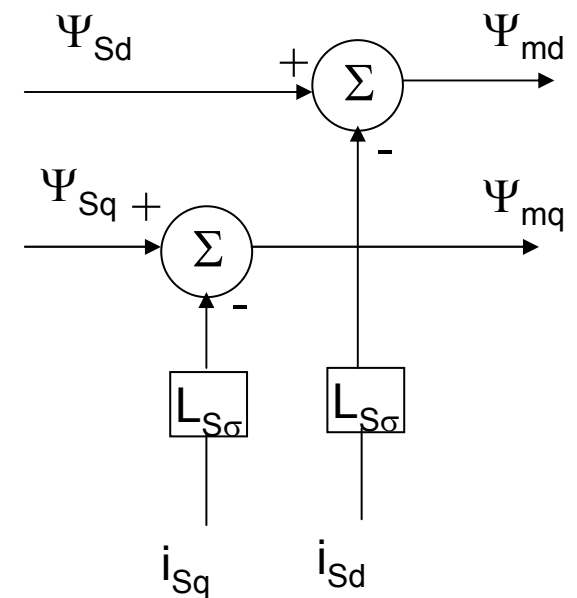
Se măsoară fluxul statoric $\sigma_S = \frac{L_{S\sigma}}{L_m}$ $\sigma_R = \frac{L_{R\sigma}}{L_m}$

Fluxul de magnetizare

$$\underline{\Psi}_m = \underline{\Psi}_S - L_{S\sigma} \cdot \underline{i}_S$$

Fluxul rotoric

$$\underline{\Psi}_R = (1 + \sigma_R) \cdot \underline{\Psi}_S - [L_{R\sigma} + (1 + \sigma_R) \cdot L_{S\sigma}] \cdot \underline{i}_S$$



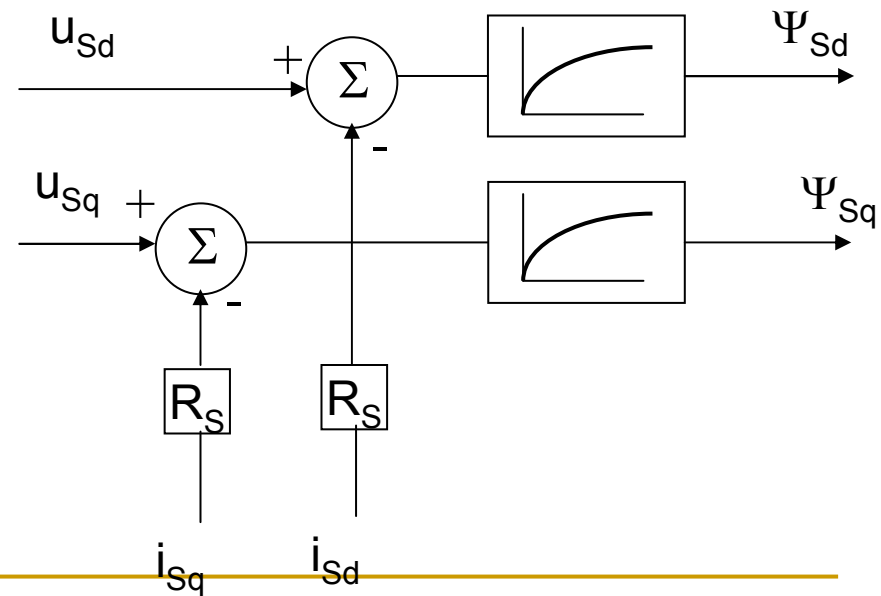
Calculul fluxului de orientare

Se poate calcula din tensiune și curent statoric

Fluxul statoric rezultă din ecuația de tensiune statorică

$$\underline{u}_S = R_S \cdot \underline{i}_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{dt}$$

$$\underline{\Psi}_S = \int [\underline{u}_S - R_S \cdot \underline{i}_S] dt$$



Calculul fluxului de orientare

Modelul de curent

Se calculează curentul de magnetizare corespunzător fluxului de orientare

$$\underline{\Psi}_S = L_m \cdot \underline{i}_{mS} ; \underline{\Psi}_R = L_m \cdot \underline{i}_{mR} ; \underline{\Psi}_m = L_m \cdot \underline{i}_m$$

Folosind expresiile fluxurilor în funcție de curenți

$$\underline{\Psi}_S = L_m (1 + \sigma_S) \underline{i}_S + L_m \cdot \underline{i}_R$$

$$\underline{\Psi}_m = L_m (\underline{i}_S + \underline{i}_R)$$

$$\underline{\Psi}_R = L_m (1 + \sigma_R) \underline{i}_R + L_m \cdot \underline{i}_S$$

Ecuția circuitului rotoric

$$0 = R_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{dt} - j \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_R$$

Se poate elimina curentul rotoric

Calculul fluxului de orientare

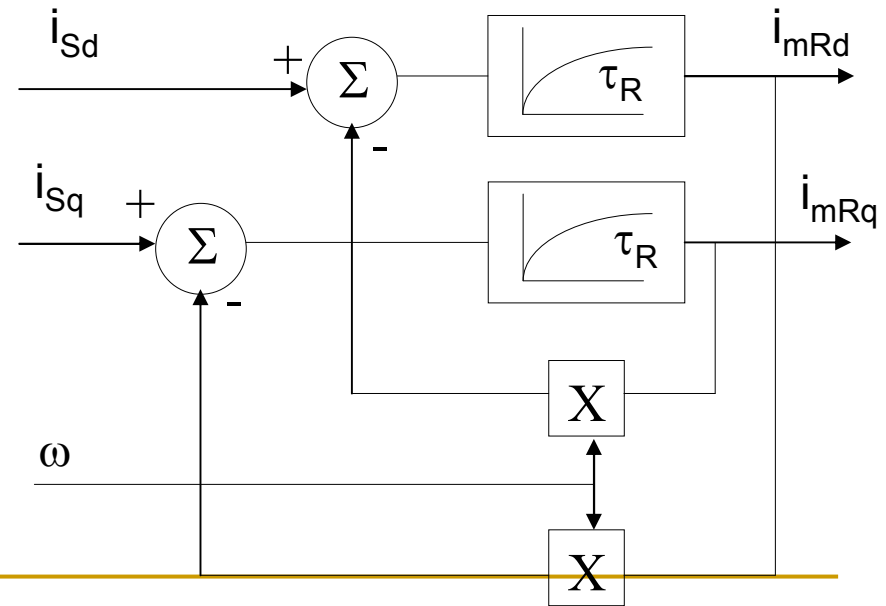
Fluxul de orientare este **fluxul rotoric**

$$\underline{i}_{mR} = \underline{i}_S + j \frac{(1 + \sigma_R)L_m}{R_R} \underline{i}_{mR} - \frac{(1 + \sigma_R)L_m}{R_R} \frac{d\underline{i}_{mR}}{dt}$$

Descompunând în două componente

$$i_{mRd} + \tau_R \frac{di_{mRd}}{dt} = i_{Sd} - \omega \cdot \tau_R \cdot i_{mRq}$$

$$i_{mRq} + \tau_R \frac{di_{mRq}}{dt} = i_{Sq} + \omega \cdot \tau_R \cdot i_{mRd}$$

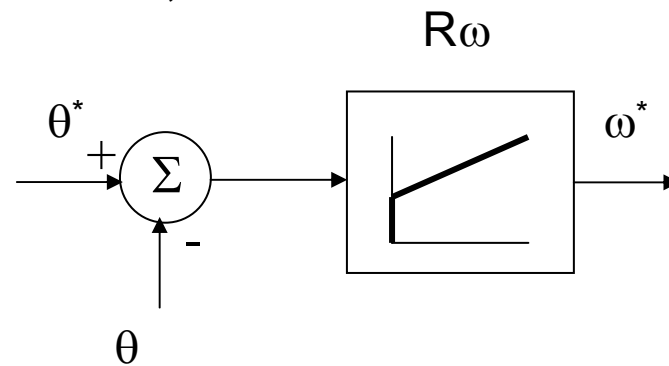


Determinarea mărimilor de reglare

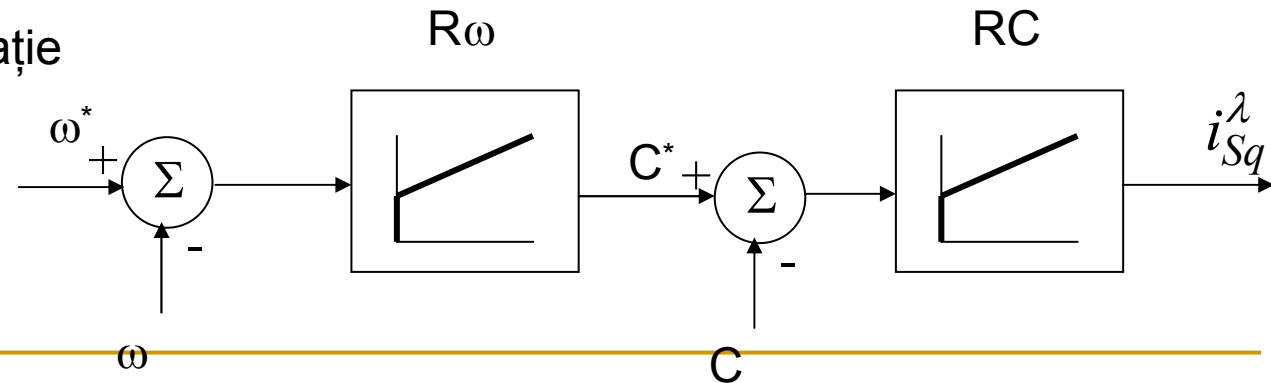
Mărimile de reglare sunt mărimile de reacție pentru reglatoarele sistemului

Aceste mărimi pot fi : modulele fluxului, curentului, turației, poziției, frecvenței, Cuplului sau componentele orientate ale curentului sau tensiunii statorice.

Regulator de poziție

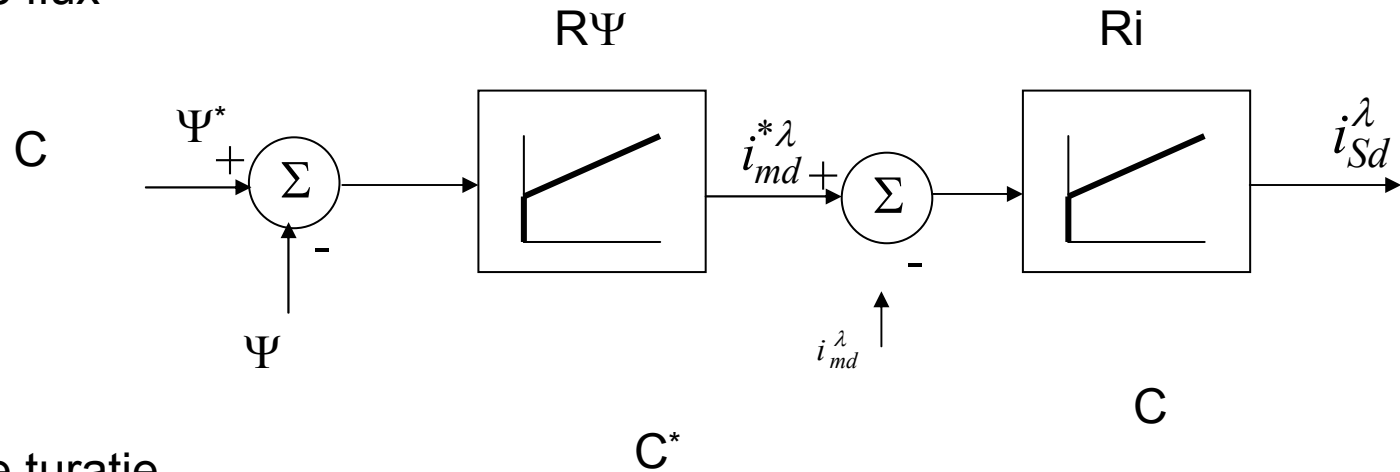


Regulator de turație

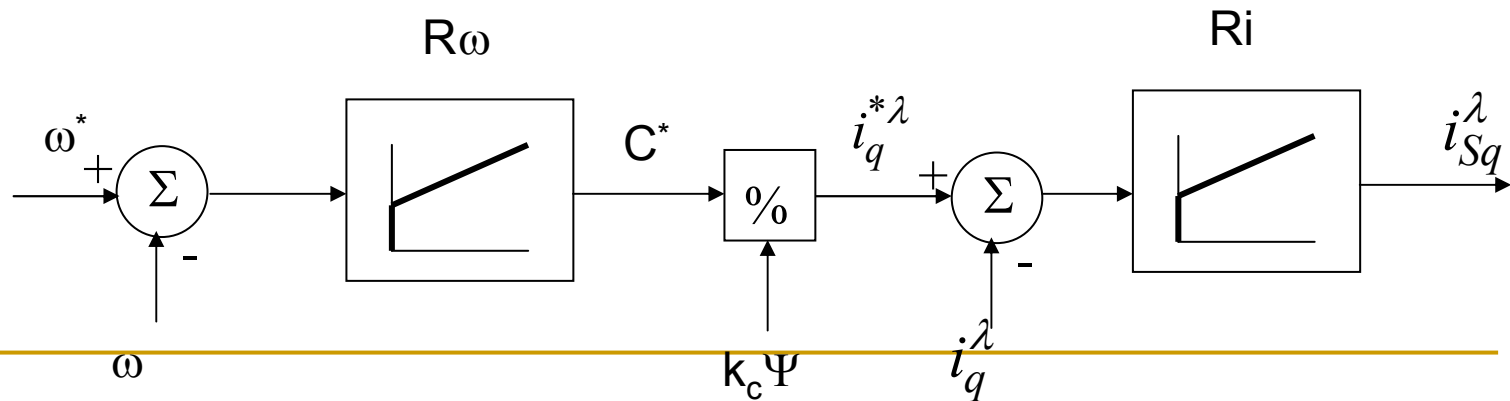


Determinarea mărimilor de reglare

Regulator de flux



Regulator de turație



Determinarea mărimilor de reglare

Dacă nu se măsoară curenții atunci mărimile de reglare se corectează pentru a ține seama de efectul de demagnetizare

Calculul mărimilor de corecție a curenților statorici se realizează din ecuația circuitului rotorului scris în sistemul de coordonate legat de câmp

$$0 = R_R \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\Psi}_R}{dt} + j \cdot (\omega_S - \omega) \cdot \underline{\Psi}_R$$

În care se înlocuiesc expresiile **curentului și fluxului rotorului** determinate în Funcție de mărimea de orientare și curentul rotorului.

Mărimea de orientare este fluxul rotorului (i_{mR})

Relațiile sunt:

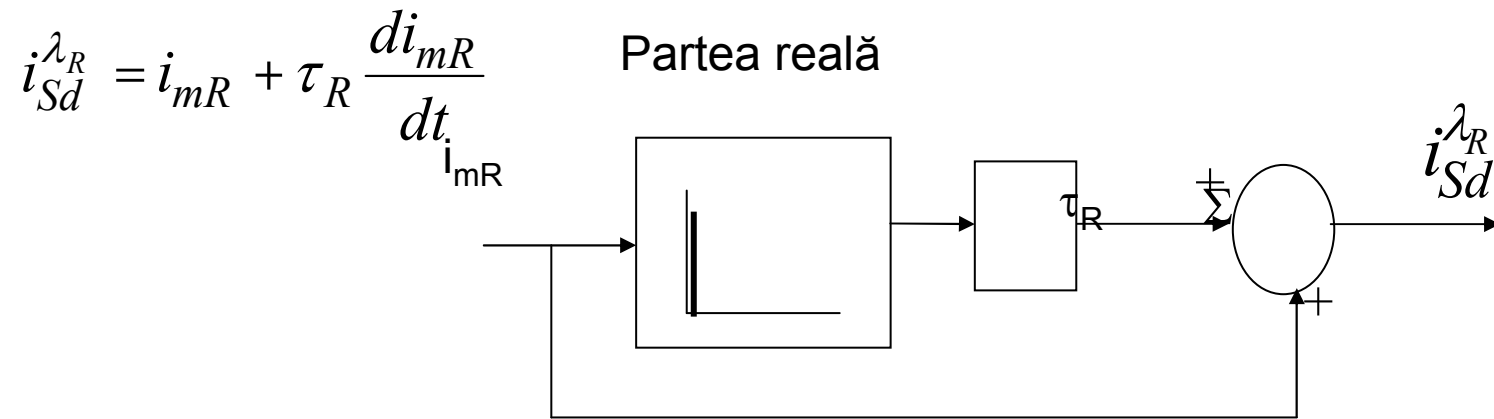
$$\underline{i}_S^{\lambda_R} = \underline{i}_{mR} + \tau_R \frac{d\underline{i}_{mR}}{dt} + j(\omega_S - \omega)\tau_R \cdot \underline{i}_{mR}$$

$$\underline{\Psi}_R = L_m(1 + \sigma_R)\underline{i}_R + L_m \cdot \underline{i}_S$$

$$\underline{\Psi}_R = L_m \cdot \underline{i}_{mR}$$

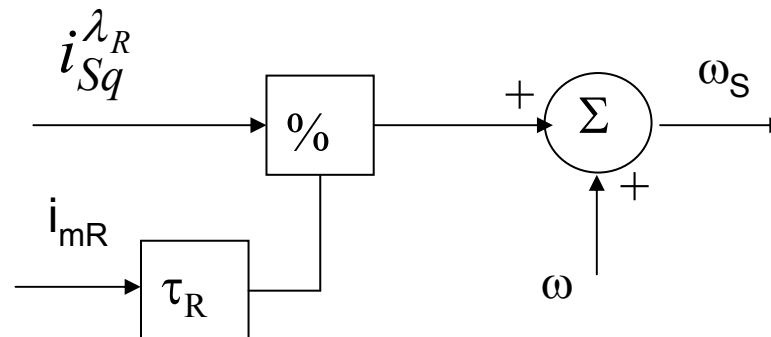
Ținând seama de $\underline{i}_{mq}^{\lambda_R} = 0$

Determinarea mărimilor de reglare



$$\omega_S = \omega + \frac{\dot{i}_{Sq}^{\lambda_R}}{\tau_R \cdot i_{mR}}$$

Partea imaginară



Calculul mărimilor de comandă

Dacă motorul este alimentat printr-un convertor de tensiune este necesar să se determine componentele tensiunii statorice

$$\underline{u}_S = R_S \cdot \underline{i}_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \omega_S \cdot \underline{\Psi}_S$$

Fluxul statoric se exprimă în funcție de mărimea de orientare și curentul statoric

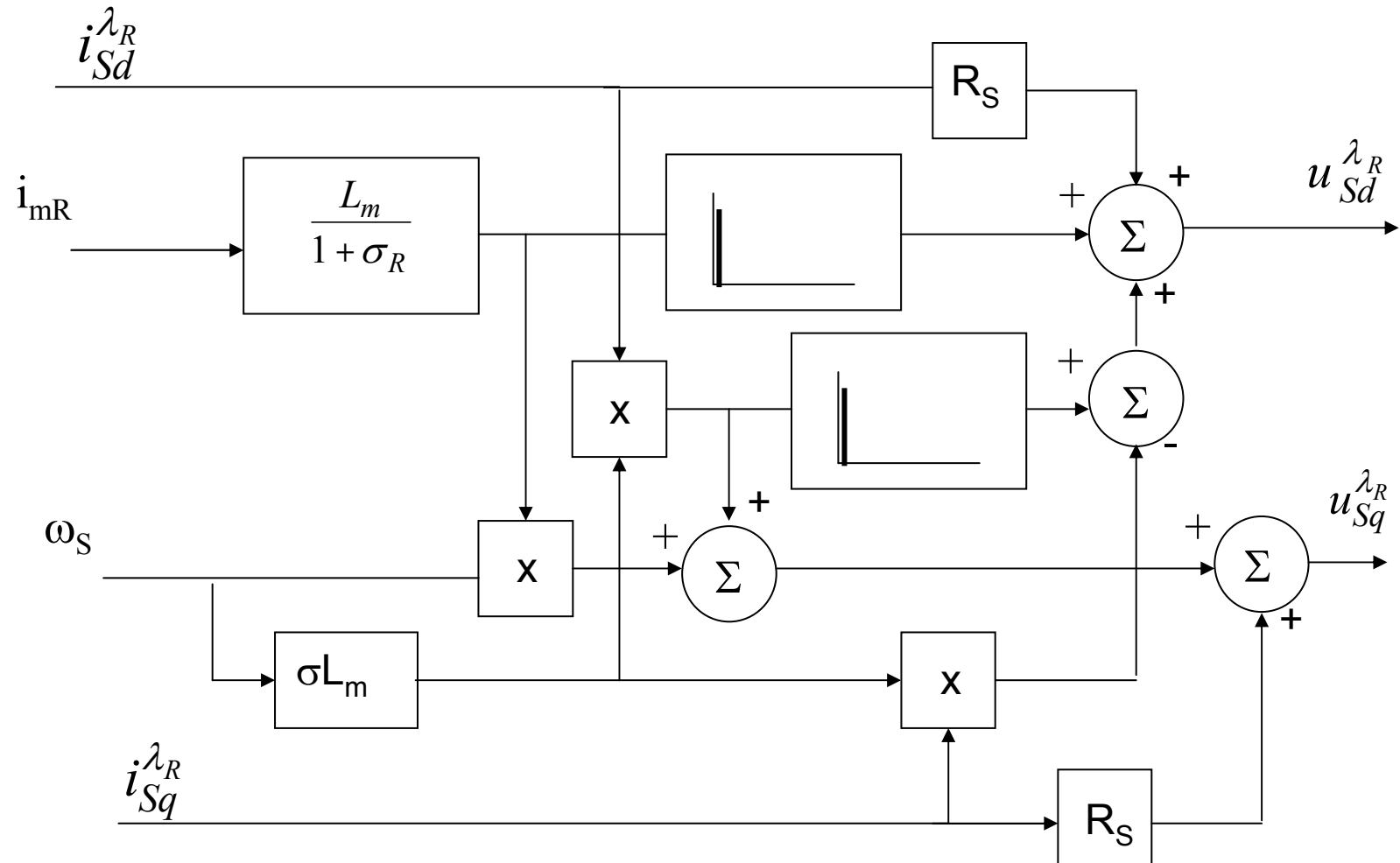
Orientarea după fluxul rotoric

$$\underline{\Psi}_S = \frac{\underline{\Psi}_R}{(1 + \sigma_R)} + L_m \cdot \sigma_S \cdot \underline{i}_S$$

Rezultă:

$$\underline{u}_S = R_S \cdot \underline{i}_S + \frac{di_{mR}}{dt} \frac{L_m}{1 + \sigma_R} + \frac{d\underline{i}_S}{dt} L_m \cdot \sigma + j \cdot \omega_S \cdot L_m \left(\frac{i_{mR}}{1 + \sigma_R} + \sigma \cdot \underline{i}_S \right)$$

Calculul tensiunii de comandă



Estimarea fluxului

Dacă nu există traductoare de flux și de viteză

Este necesară cunoașterea unei mărimi suplimentare, de reacție

De obicei aceasta este $\frac{di_s}{dt}$

Procedee folosite:

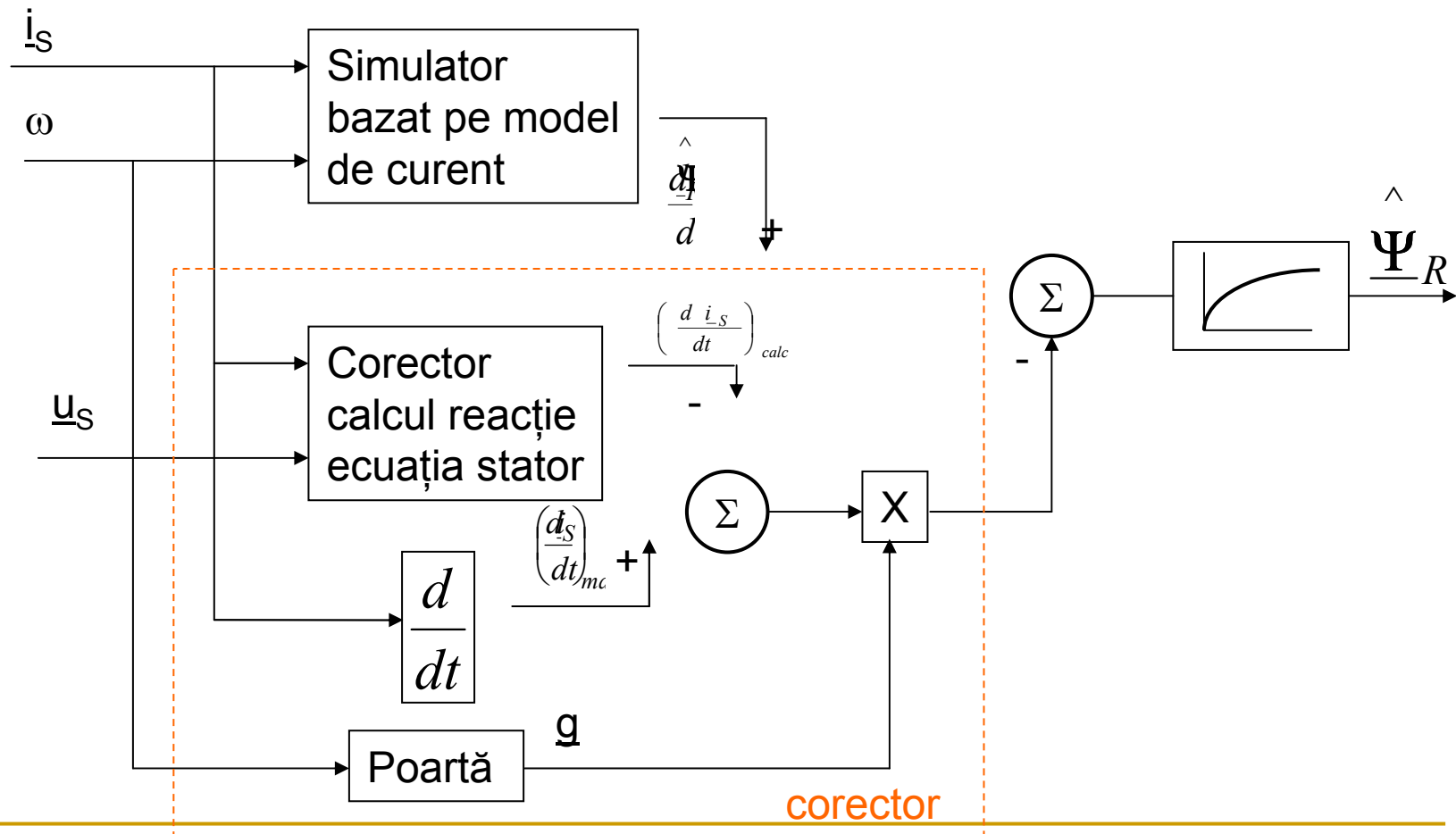
- Metoda robust adaptivă Y. Hori, H. Kubota
- Utilizarea filtrelor T. Lipo, D.J. Atkinson, G. Henneberger

Structura estimatorului adaptiv – 2 elemente

- Un simulator, elaborat pe baza modelului mașinii
 - Un corector al mărimii estimate
-

Estimator adaptiv

Formal se poate scrie $\frac{d\hat{\Psi}_R}{dt} = \text{simulator} + \text{corector}$



Estimator adaptiv

Din ecuația rotorică rezultă expresia simulatorului:

$$\frac{d\underline{\Psi}_R}{dt} = \left(j\omega - \frac{R_R}{L_R} \right) \cdot \underline{\Psi}_R + \frac{L_m}{L_R} R_R \cdot \underline{i}_S = a_{22} \underline{\Psi}_R + a_{21} \underline{i}_S$$

În ecuația statorică înlocuind pe Ψ_S și exprimând elementul de reacție rezultă:

$$\frac{d\underline{i}_S}{dt} = \frac{\underline{u}_S}{\sigma L_S} + \frac{k_R}{\sigma L_S} \left(j\omega - \frac{R_R}{L_R} \right) \cdot \underline{\Psi}_R + \frac{R_S + k_R R_R}{\sigma L_S} \cdot \underline{i}_S = b \cdot \underline{u}_S + a_{12} \cdot \underline{\Psi}_R + a_{11} \cdot \underline{i}_S$$

Coeficientul de poartă se consideră un număr complex $\underline{g} = g_a + j \cdot g_b$

Coeficientul de poartă definește stabilitatea observatorului de flux precum și
Insensibilitatea la variația parametrilor motorului

Rezultă modelul matematic al observatorului de flux

$$\frac{d\underline{\Psi}_R}{dt} = (a_{22} + \underline{g} \cdot a_{12}) \underline{\Psi}_R + (a_{21} + \underline{g} \cdot a_{11}) \cdot \underline{i}_S + \underline{g} \cdot b \cdot \underline{u}_S + \underline{g} \cdot \frac{d\underline{i}_S}{dt}$$

Estimator adaptiv

În cazul când parametrii motorului sunt constanți se definește eroarea de estimare

$$\varepsilon = \hat{\underline{\Psi}}_R - \underline{\Psi}_R$$

Derivata erorii de estimare

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = (a_{22} + \underline{g} \cdot a_{12}) \cdot \varepsilon = -h \cdot \varepsilon$$

Egalând cu zero se găsesc cei doi poli complex conjugați ai estimatorului de flux, care pentru care pentru stabilitatea sistemului trebuie să se găsească în semiplanul complex negativ , deci de forma:

$$a_{22} + \underline{g} \cdot a_{12} = -\alpha + j \cdot \beta$$

Care determină valorile coeficienților porții.

Valorile α și β se obțin prin minimizarea influenței variației parametrilor motorului de inducție asupra observatorului de flux.

Estimator adaptiv

Dacă se consideră parametrii motorului variabili de forma

$$a_{ij}^{\#} = a_{ij} + \Delta a_{ij}$$

Derivata erorii de estimare devine

$$\dot{\varepsilon} = -h \cdot \varepsilon + c_1 \cdot \Psi_R + c_2 \cdot i_S$$

Derivata erorii de estimare trebuie să fie minimă la variația parametrilor mașinii. Rezultă valorile coeficienților porții, care depind de viteza de rotație. Ajustarea lor trebuie făcută în timp real.

Estimarea vitezei și rezistenței rotorice

Ecuția circuitului rotoric

$$0 = R_R i_{Rd} + \frac{d\Psi_{Rd}}{dt} + \omega \Psi_{Rq}$$

$$0 = R_R i_{Rq} + \frac{d\Psi_{Rq}}{dt} - \omega \Psi_{Rd}$$

Se exprimă rezistența rotorică

$$R_R = \frac{\Psi_{Rd} \cdot \dot{\Psi}_{Rd} + \Psi_{Rq} \cdot \dot{\Psi}_{Rq}}{-\left(\Psi_{Rd} \cdot i_{Rd} + \Psi_{Rq} \cdot i_{Rq}\right)}$$

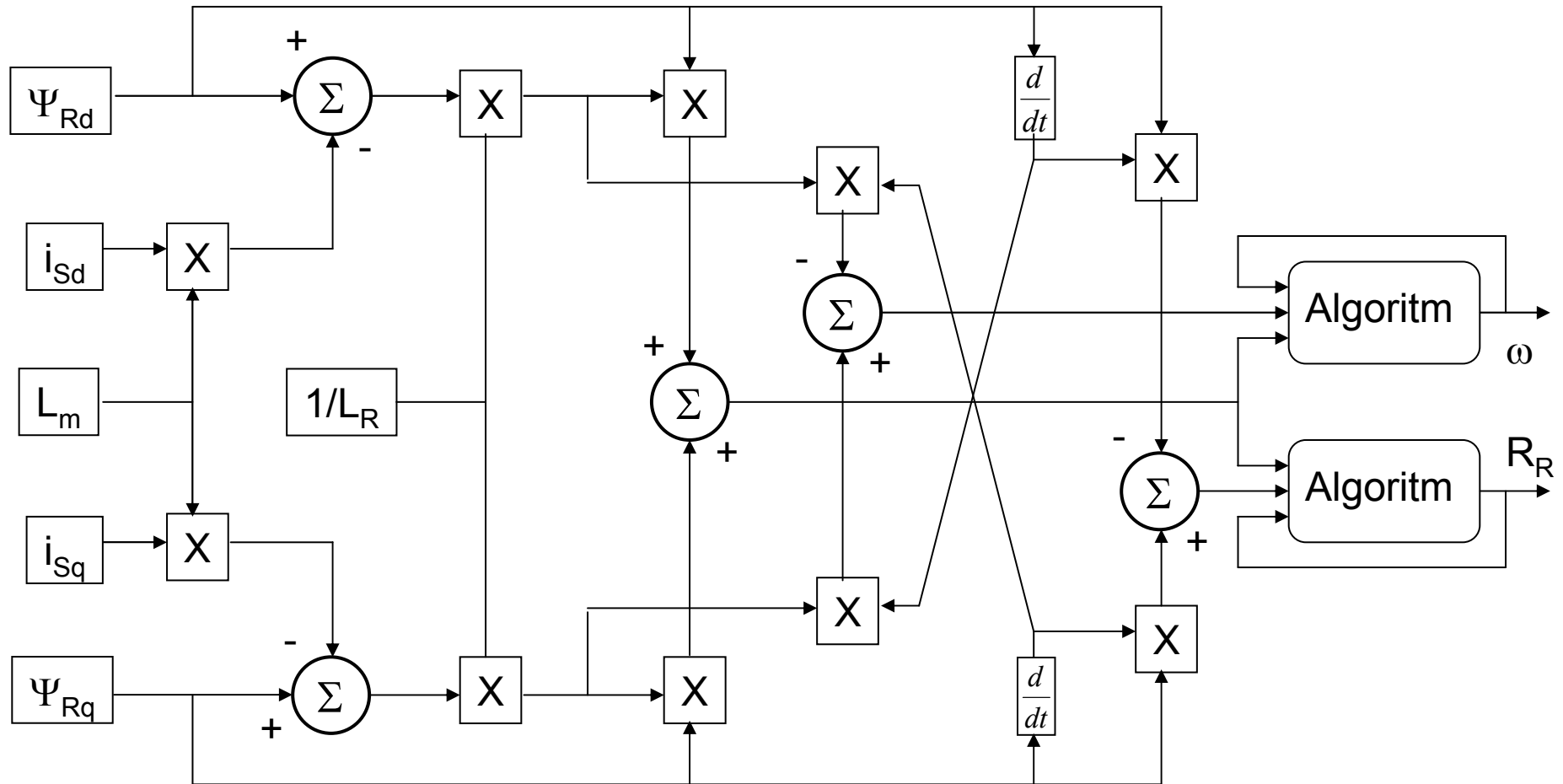
Viteza de rotație

$$\omega = \frac{i_{Rq} \cdot \dot{\Psi}_{Rd} - i_{Rd} \cdot \dot{\Psi}_{Rq}}{-\left(\Psi_{Rd} \cdot i_{Rd} + \Psi_{Rq} \cdot i_{Rq}\right)}$$

Înlocuind expresia curentului

$$\underline{i}_R = \frac{\Psi_R}{L_R} - \frac{L_m}{L_R} \underline{i}_S$$

Structura estimatorului de viteză și rezistența rotorică



Estimarea vitezei și rezistenței rotorice

Algoritmul de împărțire este statistic pentru evitarea împărțirii cu zero, care apare dacă fluxul în modul este constant deci

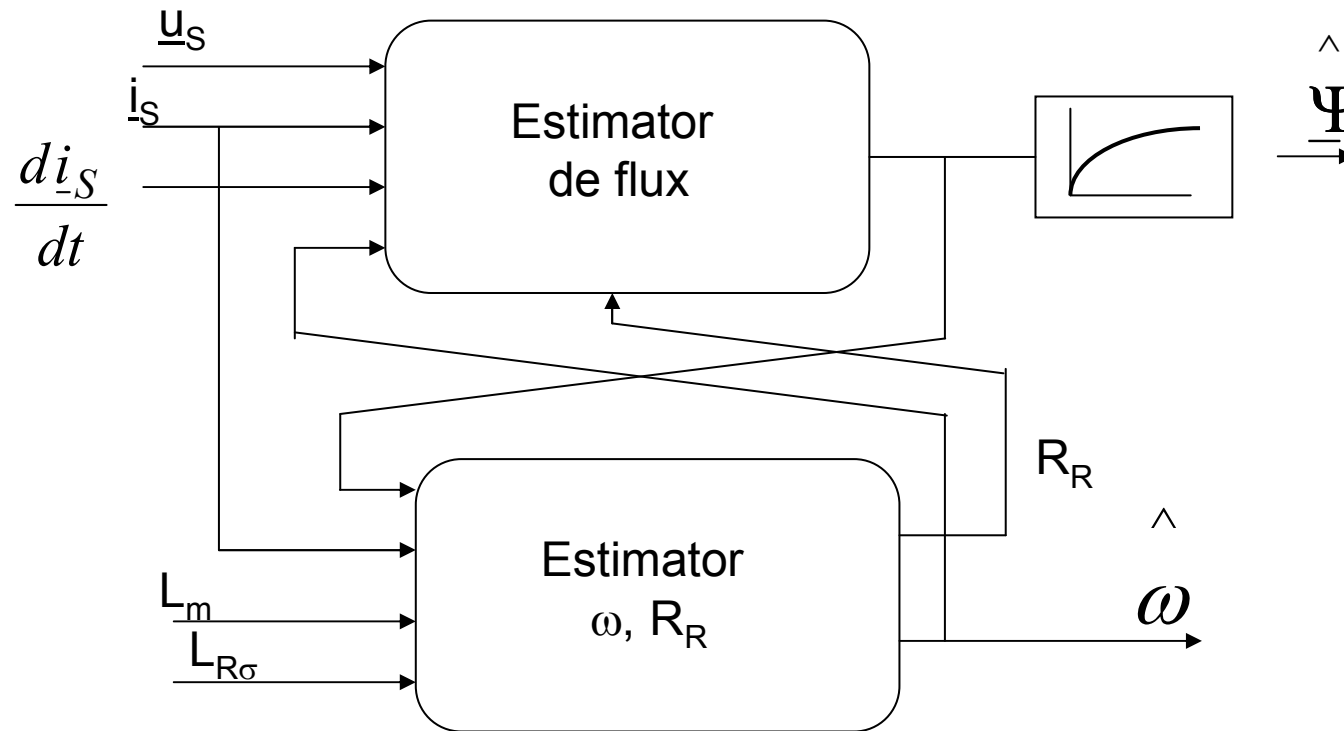
$$i_{Rd} \cdot \Psi_{Rd} + i_{Rq} \cdot \Psi_{Rq} = 0$$

Nu se pot estima simultan turația și rezistența rotorică dacă fluxul este menținut constant.

Fluxul nu se menține strict constant

Estimatorul de viteză și rezistență rotorică utilizează componentele fluxului rotoric. Acestea se determină cu ajutorul observatorului de flux, care utilizează viteza și rezistența rotorică estimată

Structura blocului de estimare a fluxului și vitezei



Direct stator flux and torque control. DTC

Expresia cuplului

$$C = p \cdot \Re \{ j \cdot \underline{\Psi}_S \cdot \underline{i}_S^* \} = p \frac{M}{L_S \cdot L_R \cdot \sigma} \Psi_S \cdot \Psi_R \sin(\alpha_\Psi)$$

Unde

$$\sigma = 1 - \frac{M}{L_S \cdot L_R}$$

Neglijând căderea de tensiune

$$\underline{u}_S \cong \frac{d\underline{\Psi}_S}{dt}$$

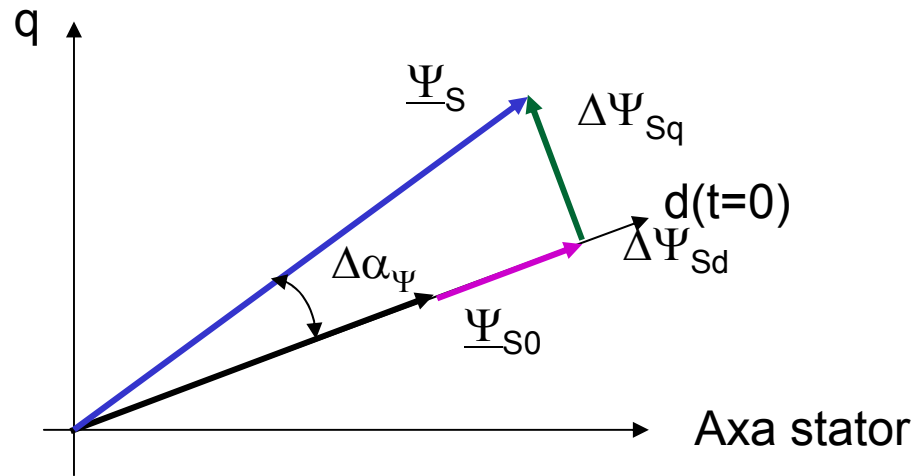
rezultă

$$\Delta \underline{\Psi}_S = \underline{u}_S \cdot \Delta t$$

$$\Delta \Psi_d = u_d \cdot \Delta t$$

$$\Delta \Psi_q = u_q \cdot \Delta t$$

Direct stator flux and torque control. DTC



deoarece

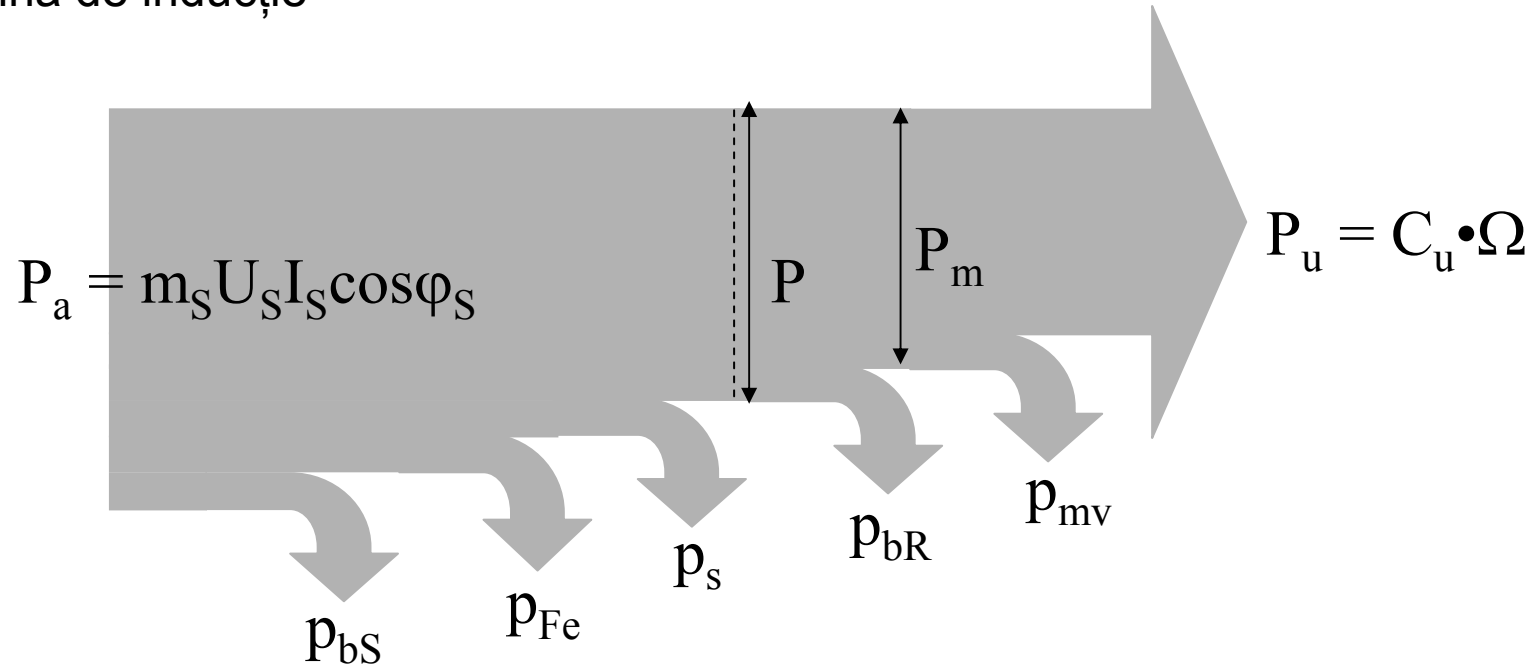
Ψ_{R0} și Ψ_{S0} sunt în fază

Rezultă:

$$\Delta C = p \frac{M}{L_S \cdot L_R \cdot \sigma} \Psi_{R0} \cdot \Delta \Psi_{Sq}$$

Control după performanțe energetice

Mașina de inducție



Neglijând pierderile în stator $P_a = P$

Factorul de putere
$$\cos \varphi = \frac{P_a}{m_s U_s I_s} \approx \frac{C \cdot \Omega_s}{m_s U_s I_s}$$

Factorul de putere

Cuplul $C = \frac{3pM^2}{L_R} I_{0i}^* \cdot I_{Ri}^*$

Ecuția statorului $\underline{u}_S \cong j \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_S$

Expresia fluxului

$$\underline{\Psi}_S = L_S (\underline{i}_S + \underline{i}_R^*) - \sigma \cdot L_S \cdot \underline{i}_S$$

Modulul fluxului

$$\Psi = \sqrt{(L_S \cdot i_{0i}^*)^2 + (\sigma \cdot L_S \cdot i_{Ri}^*)^2}$$

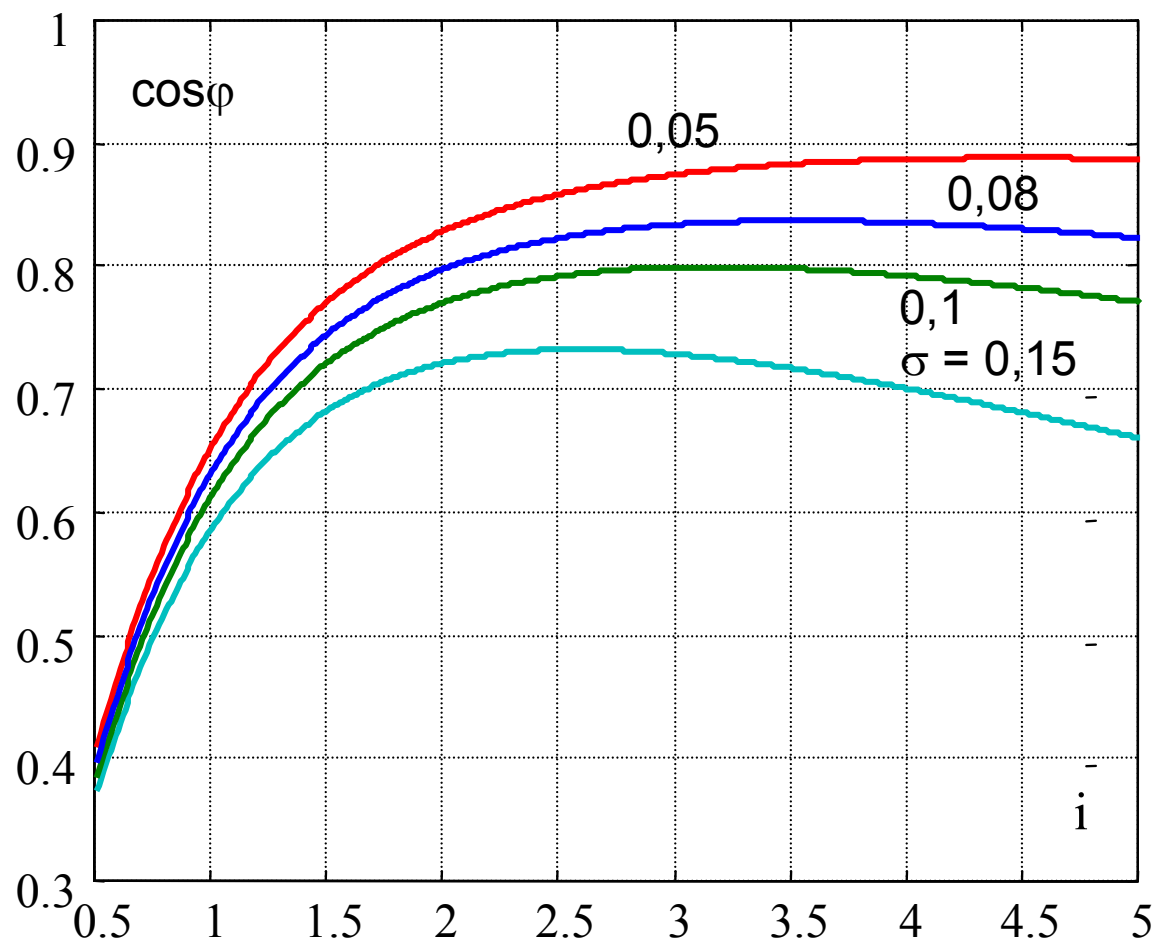
notând

$$i = \frac{I_{Ri}^*}{I_{0i}^*}$$

Factorul de putere

$$\cos \varphi = \frac{i \cdot (1 - \sigma)}{\sqrt{(1 + i^2)(1 + i^2 \sigma^2)}}$$

Variația factorului de putere



Pierderile pe unitate de cuplu

Pierderile pe unitate de cuplu $k_{pC} = \frac{\Sigma p}{C}$

Suma pierderilor pe fază $\Sigma p = R_S I_S^2 + R_m I_{0i}^2 + R_R \left(\frac{M}{L_R} \right)^2 I_{Ri}^2$

Notând

$$R_0 = R_S + R_m$$

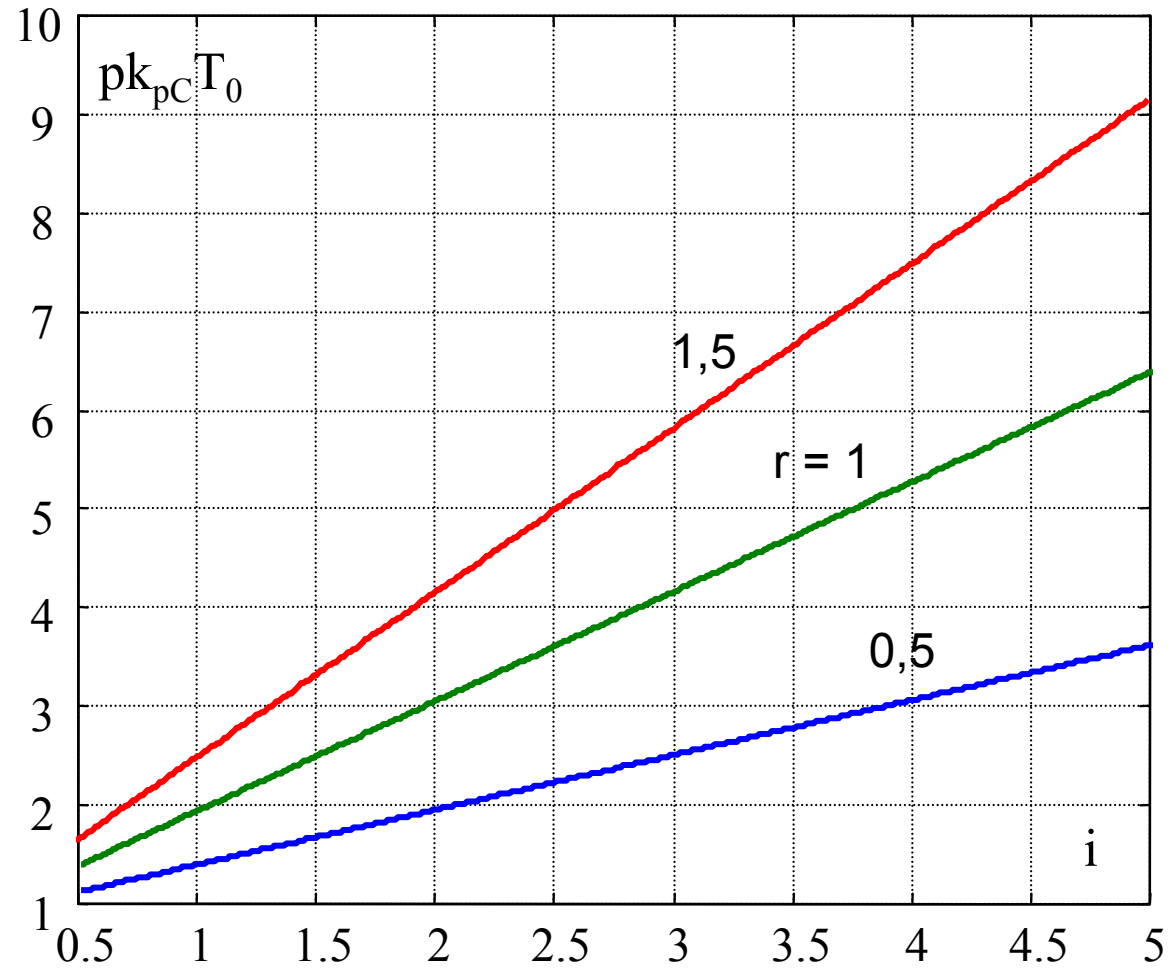
$$R_{sc} = R_S + R_R \left(\frac{M}{L_R} \right)^2$$

$$r = \frac{R_{sc}}{R_0}$$

rezultă

$$k_{pC} = \frac{R_0}{L_S} \frac{1 + r \cdot i^2}{p \cdot (1 - \sigma) \cdot i}$$

Variația pierderilor pe unitate de cuplu



Factorul de putere

Mașina sincronă reactivă

Factorul de putere

$$\cos \varphi = \frac{k(\lambda - 1)}{\sqrt{k^2 + 1} \sqrt{\lambda^2 \cdot k^2 + 1}}$$

Unde

$$k = \frac{i_d}{i_q} \qquad \lambda = \frac{L_d}{L_q}$$

Factorul de putere maxim rezultă pentru

$$k = \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$$

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}$$

Pierderile pe unitate de cuplu

Pierderile pe unitate de cuplu

$$k_{pC} = \frac{R_S}{p \cdot L_q} \frac{k^2 + 1}{k(\lambda - 1)}$$

Valoarea maximă rezultă pentru

$$K = 1$$

$$k_{pC \max} = \frac{R_S}{p \cdot L_q} \frac{2}{\lambda - 1}$$

Valori numerice

Mașina sincronă reactivă

$$k = \frac{i_d}{i_q}$$

$$\lambda = \frac{L_d}{L_q}$$

$\cos\varphi$	0,554	0,624	0,6	0,8
k	1	1	0,5	0,33
λ	4	9	4	9

$\cos\varphi$	0,624	0,661	0,8	0,882
k	1	1	0,33	0,25
λ	9	16	9	16

Bibliografie

- Boldea, I., Nasar, S.A.**, “*Vector control of AC drives*”, CRC Press, New York, 1992.
- Boldea, I., Nasar, S.A.**, “*Torque Vector Control (TVC) – A class of fast robust torque speed position digital controller for electric drives*”, EMPS, vol.15, 1988, pp.135-148.
- Buja, G., Casadei, D., Serra, G.**, “*Direct stator flux and torque control of an induction motor: Theoretical analysis and experimental results*”, Proc. of IECON’98, pp. T50-T64.
- Hu, X., Zhang, L.**, “*A predictive Direct Torque Control scheme for a three-level VSI-fed Induction Motor Drive*”, Proc. of EMDC’99, pp.334-339.
- Kelemen, A., Imecs, Maria**, “*Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de curent alternativ*”, Editura Academiei Române, 1989.
- Kelemen, A., Imecs, Maria**, “*Vector control of AC drives*”, Ecriture Publisher, Budapest, 1992.
- Levi, E.**, “*Mathematical models of field oriented induction machines incorporating the iron core loss*”, Proc. of ICEM’94, vol.II, pp.683-687.
- Maes, J., Melkebeek, J.**, “*Direct torque control of induction motors using back-EMF calculation and prediction*”, Proc. of SPEEDAM’98, pp.C2-13-18.
-

Bibliografie

Novotny, D.W., Lipo, T.A., *“Vector control and dynamics of A.C. drives”*, Oxford University Press, 1996.

Nilsen, M., Pasquariello, M., Vandenput, A., *“The application of Direct Torque Control using DC-link voltage for flux-observation”*, Proc. of SPEEDAM'98, pp.C2-19-23.

Vas, P., *“Sensorless Vector and Direct Torque Control”*, Oxford University Press, 1998.
