Sesiunea de prezentare a lucrărilor de diplomă, Iulie 2024

Controlul predictiv al motorului sicron cu reluctanță variabilă

Mihai-Daniel Popescu

Îndrumător diplomă: Prof. em. dr. ing. Corneliu Lazăr

Cuprins

1. Introducere

- Motorul sincron cu reluctanță → aplicații în diverse domenii (acționări electrice, tracțiunea vehiculelor electrice, electrocasnice etc.)
- Controlul motoarelor sincrone cu reluctanță:

-Structuri de reglare în cascadă: bucla internă pentru controlul curenților, bucla externă pentru controlul turației

-Algoritmi convenționali: PI pentru cele două bucle

-Tehnici avansate de control: Controlul predictiv pentru turație și PI pentru curenți

- În această lucrare: controlul predictiv pentru ambele bucle de reglare/controlul predictiv pentru bucla internă și PI pentru bucla externă.

2. Modelul d-q al motorului sicron cu reluctanță

- Reglarea predictivă cu orientare după câmp și metoda i_d constant → modelul d-q al motorului sicron cu reluctanță
- Modelul curenților:

$$\begin{cases} v_d = R_s \cdot i_d - p_1 \cdot \Omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \dfrac{d(i_d)}{dt} \\ v_q = R_s \cdot i_q + p_1 \cdot \Omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \dfrac{d(i_q)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

- Generatorul de cuplu:

$$C_{em} = p_1 \cdot (L_d - L_{q)} \cdot i_{dref} \cdot i_q \quad (2)$$

- Sistemul mecanic:

$$\frac{J}{f} \cdot \frac{d_\Omega}{dt} + \Omega = \frac{1}{f} \cdot (C_{em} - C_{ch}) \quad (3)$$

- Reglarea predictivă în cascadă: bucla internă cu partea fixată (1), bucla externă cu partea fixată (2) și (3).

2.1. Algorimul de decuplare

- Modelul (1) → multivariabil, neliniar, cuplat → algoritm de decuplare
- Algoritmul de decuplare → componente feedforward:

$$\begin{cases} u_{fd} = -p_1 \cdot \Omega \cdot L_q \cdot i_q \\ u_{fq} = p_1 \cdot \Omega \cdot L_d \cdot i_d \end{cases} \quad => \quad \begin{cases} v_d = u_{fd} + u_d \\ v_q = u_{fq} + u_q \end{cases} \qquad \textbf{(4)}$$

- Modelul decuplat:

$$\begin{cases} u_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \dfrac{d(i_d)}{dt} \\ u_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \dfrac{d(i_{q})}{dt} \end{cases} \quad => \quad \begin{cases} G_d(s) = \dfrac{\frac{1}{R_S}}{s \cdot \tau_d + 1} \\ G_q(s) = \dfrac{\frac{1}{R_S}}{s \cdot \tau_q + 1} \end{cases} \qquad \textbf{(5)}$$

- După decuplare → 2 sisteme monovariabile liniare descrise de funcțiile de transfer (5).

3. Proiectarea cu algoritmul GPC
3.1. Controlul buclei interne

- Modelul (5) → funcțiile de transfer discrete ale celor 2 curenți:

$$\begin{cases} G_d(z^{-1}) = \dfrac{B_d(z^{-1})}{A_d(z^{-1})} \\ G_q(z^{-1}) = \dfrac{B_q(z^{-1})}{A_q(z^{-1})} \end{cases} \tag{6}$$

- Se formează modelele CARIMA:

$$\begin{cases} A_d(z^{-1})y(k) = \mathrm{B}(z^{-1})u(k-1) + \dfrac{\mathrm{C}(z^{-1})}{\mathrm{D}(z^{-1})}e(k) \\ A_q(z^{-1})y(k) = \mathrm{B}(z^{-1})u(k-1) + \dfrac{\mathrm{C}(z^{-1})}{\mathrm{D}(z^{-1})}e(k) \end{cases} \tag{7}$$

- Cu ajutorul a două ecuații diofantice → se calculeaza polinoamele $E_i,\ F_i,\ G_i,\ H_i$
- Pe baza polinoamelor → modelul predictorului de ordin i:

$$\hat{y}(k+i|k) = G_i(z^{-1})\Delta u(k+i-1) + F_i(z^{-1})y(k) + H_i(z^{-1})\Delta u(k-1) \tag{8}$$

3.1. Controlul buclei interne

- Controlul optim GPC → minimizarea funcției de cost:

$$J = \sum_{i=1}^{hp}[\hat{y}(k+i|k) - w(k+i|k)]^2 + \lambda \sum_{i=0}^{hp-1}[\Delta u(k+i|k)]^2 \quad \textbf{(9)}$$

- Considerând hp și dând valori lui $i = \overline{1, hp}$ → forma matriceala a funcției de cost:

$$J = (Gu_d + y_0 - w)^T(Gu_d + y_0 - w) + \lambda u_d^T u_d \quad \textbf{(10)}$$

- Derivând (10) în raport cu u_d și egalând cu 0 → secvența optimală de control:

$$u_d^* = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - y) \quad \textbf{(11)}$$

- Principiul orizontului alunecător → algoritmul de control predictiv:

$$\Delta u(k|k) = \sum_{i=1}^{hp} \gamma_i w(k+i|k) - \sum_{i=1}^{hp} \gamma_i H_i(z^{-1}) \Delta u(k-1) - \sum_{i=1}^{hp} \gamma_i F_i(z^{-1}) y(k) \quad \textbf{(12)}$$

3.2. Controlul buclei externe

- Datorită neglijării dinamicii buclei interne → controlul GPC instabil
- Regulator PI prin metoda alocării polilor
- Pe baza performanțelor impuse → polinomul caracteristic dorit:

$$P_{cr} = s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 \quad \textbf{(13)}$$

- Din ecuațiile (2) și (3) → funcție de transfer de ordin 1:

$$G_\Omega(s) = \frac{K_f}{T_f \cdot s + 1} \quad \textbf{(14)}$$

- Forma regulatorului PI:

$$G_r(s) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{s} \quad \textbf{(15)}$$

3.2. Controlul buclei externe

- Se calculează funcția de transfer în buclă închisă:

$$G_0(s) = \frac{\frac{K_p \cdot K_f}{T_i \cdot T_f} \cdot (1 + s \cdot T_i)}{s^2 + \frac{1 + K_p \cdot T_f}{T_f} \cdot s + \frac{K_p \cdot K_f}{T_i \cdot T_f}} \quad \textbf{(16)}$$

- Polinomul caracteristic ⟶ numitorul lui : $G_0(s)$

$$P_{c0} = s^2 + \frac{1 + K_p \cdot T_f}{T_f} \cdot s + \frac{K_p \cdot K_f}{T_i \cdot T_f} \quad \textbf{(17)}$$

- Se egalează (13) cu (17) ⟶ parametrii regulatorului PI:

$$K_p = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot T_f - 1}{K_f} \quad \textbf{(18)}$$

$$T_i = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot T_f - 1}{T_f \cdot \omega_n^2} \quad \textbf{(19)}$$

4. Proiectarea cu algoritmul MPC

4.1. Restricții

- Limitări fizice pentru mărimile electrice → restricții:

-Restricții pentru curenți: $\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{smax}$ **(20)**

-Restricții pentru tensiuni: $\sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq U_{DC}/\sqrt{3}$ **(21)**

-Restricții pătratice → aproximări liniare

•curent: $i_d^{max} = \alpha I_{smax};\ \ i_q^{max} = \sqrt{1-\alpha^2} I_{smax}$ $\longrightarrow$ $-i_d^{max} \leq i_d(k) \leq i_d^{max};\ -i_q^{max} \leq i_q(k) \leq i_q^{max}$ **(22)**

•tensiune: $v_d^{max} = \beta U_{DC}/\sqrt{3};\ \ v_q^{max} = \sqrt{1-\beta^2} U_{DC}/\sqrt{3}$ $\longrightarrow$ $-v_d^{max} \leq v_d(k) \leq v_d^{max};\ -v_q^{max} \leq v_q(k) \leq v_q^{max}$ **(23)**

$u_{d/q}^{max} = v_{d/q}^{max} - u_{fd/q}^{max}$ $\longrightarrow$ $-u_d^{max} \leq u_d(k) \leq u_d^{max};\ \ -u_q^{max} \leq u_q(k) \leq u_q^{max}$ **(24)**

unde $u_{fd/q}^{max}$ reprezintă $u_{fd/q}$ cu Ω nominal și $i_{d/q}$ maxim.

4.2. Controlul buclei interne

- Discretizând (5) → modelele discrete în timp ale celor doi curenți:

$$i_{d/q}(k+1) = \frac{-R_s}{L_{d/q}} i_{d/q}(k) + \frac{1}{L_{d/q}} u_{d/q}(k). \qquad \textbf{(25)}$$

- Eroare staționară nulă → stare suplimentară: $x_u(k) = u_{d/q}(k-1)$ → model cu intrare incrementul comenzii:

$$\begin{bmatrix} i_{d/q}(k+1) \\ x_u(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_{d/q}} & \frac{1}{L_{d/q}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d/q}(k) \\ x_u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{d/q}} \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u_{d/q}(k). \qquad \textbf{(26)}$$

- Predicțiile stărilor și ieșirii:

$$\begin{cases} x_{d/q}(k+i) = A_{d/q}^{i} x_{d/q}(k) + \sum_{m=0}^{i-1} A_{d/q}^{m} b_{d/q} \Delta u_{d/q}(k-1-m) \\ i_{d/q}(k+i) = [1 \ \ 0] x_{d/q}(k+\mathrm{i}) \end{cases} \qquad \textbf{(27)}$$

4.2. Controlul buclei interne

- Controlul optim MPC → minimizarea funcției de cost:

$$J_{\mathrm{d/q}}(U_{d/q}) = \sum_{i=1}^{hp}\left(w_{jn}(i_{\mathrm{d/q}}(k+n) - i_{\mathrm{d/q}}^{ref}(k))\right)^2 + \sum_{p=0}^{hp-1}(\lambda_{jp}\Delta u_{d/q}(k+p))^2 + \rho_{\varepsilon_{d/q}}\varepsilon_{d/q} \qquad \mathbf{(28)}$$

- Având în vedere restricțiile → secvența de control optimă:

$$U_{d/q}^{*} = \arg\min_{U_{d/q}} J_{d/q}$$

$$\text{st:}\quad -i_{\mathrm{d/q}}^{max} - \varepsilon_{\mathrm{d/q}}U_{\mathrm{d/q}}^{min} \le i_d(k+i) \le i_{\mathrm{d/q}}^{max} + \varepsilon_{\mathrm{d/q}}U_{\mathrm{d/q}}^{max},\quad 1 \le i \le hp \qquad \mathbf{(29)}$$

$$-u_{d/q}^{max} \le u_{\mathrm{d/q}}(k+i) \le u_{\mathrm{d/q}}^{max},\quad 0 \le i \le hp-1$$

- Principiului orizontului alunecător → primul termen al

$\boldsymbol{U_{d/q}^{*}} = \left[\Delta u_{d/q}^{*}(k)\ \Delta u_{d/q}^{*}(k+1) \ldots \Delta u_{d/q}^{*}(k+hp-1)\ \varepsilon_j\right]^T$ determină semnalul de control aplicat procesului:

$$u_{d/q}(k) = \Delta u_{d/q}^{*}(k) + u_{d/q}(k-1). \qquad \mathbf{(30)}$$

4.3. Controlul buclei externe

- Bucla internă de curent → element de ordin întâi cu constanta de timp τ_{iq} → discretizarea modelelor celor două componente ale buclei externe → modelul în timp discret:

$$\begin{bmatrix} \Omega(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-f}{j} & \frac{K}{j} \\ 0 & \frac{-1}{\tau_{iq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\tau_{iq}} \end{bmatrix} u_\Omega + \begin{bmatrix} \frac{-1}{j} \\ 0 \end{bmatrix} C_{ch} \qquad \textbf{(31)}$$

- Eroare de regim staționar zero → stare suplimentară: $x(k) = u_\Omega(k-1)$ → modelul vitezei:

$$\begin{bmatrix} \Omega(k+1) \\ i_q(k+1) \\ x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-f}{j} & \frac{K}{j} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\tau_{iq}} & \frac{1}{\tau_{iq}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega(k) \\ i_q(k) \\ x(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\tau_{iq}} \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u_\Omega + \begin{bmatrix} \frac{-1}{j} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} C_{ch} \qquad \textbf{(32)}$$

- Predicțiile stării și ale ieșirii:

$$\begin{cases} x_\Omega(k+i) = A_\Omega^i x_\Omega(k) + \sum_{p=0}^{i-1} \left[A_\Omega^p b_\Omega \Delta u_\Omega(k-1-p) + A_\Omega^p b_l C_{ch} \right] \\ \Omega(k+i) = [1 \;\; 0 \;\; 0] x_\Omega(k+\mathrm{i}) \end{cases} \qquad \textbf{(33)}$$

4.3. Controlul buclei externe

- Legea MPC → minimizarea următoarei funcții de cost:

$$J_\Omega(U_\Omega) = \sum_{i=1}^{hp} \left(\rho_{mn}\left(\Omega(k+i) - \Omega^{ref}(k)\right)\right)^2 + \sum_{p=0}^{hp-1} \left(\lambda_{mp} \Delta u_\Omega(k+p)\right)^2 + \rho_{\varepsilon_\Omega} \varepsilon_\Omega \qquad \textbf{(34)}$$

- Având în vedere restricția impusă comenzii u_Ω→ secvența optimă de control:

$$U_\Omega^* = \arg\min_{U_\Omega} J_\Omega$$

$$\text{st:} \quad u_\Omega^{min} \le u_\Omega(k+i) \le u_\Omega^{max}, \quad 0 \le i \le hp - 1 \qquad \textbf{(35)}$$

- Principiului orizontului alunecător → primul termen al $\boldsymbol{U_\Omega^*}$ determină semnalul de control aplicat procesului:

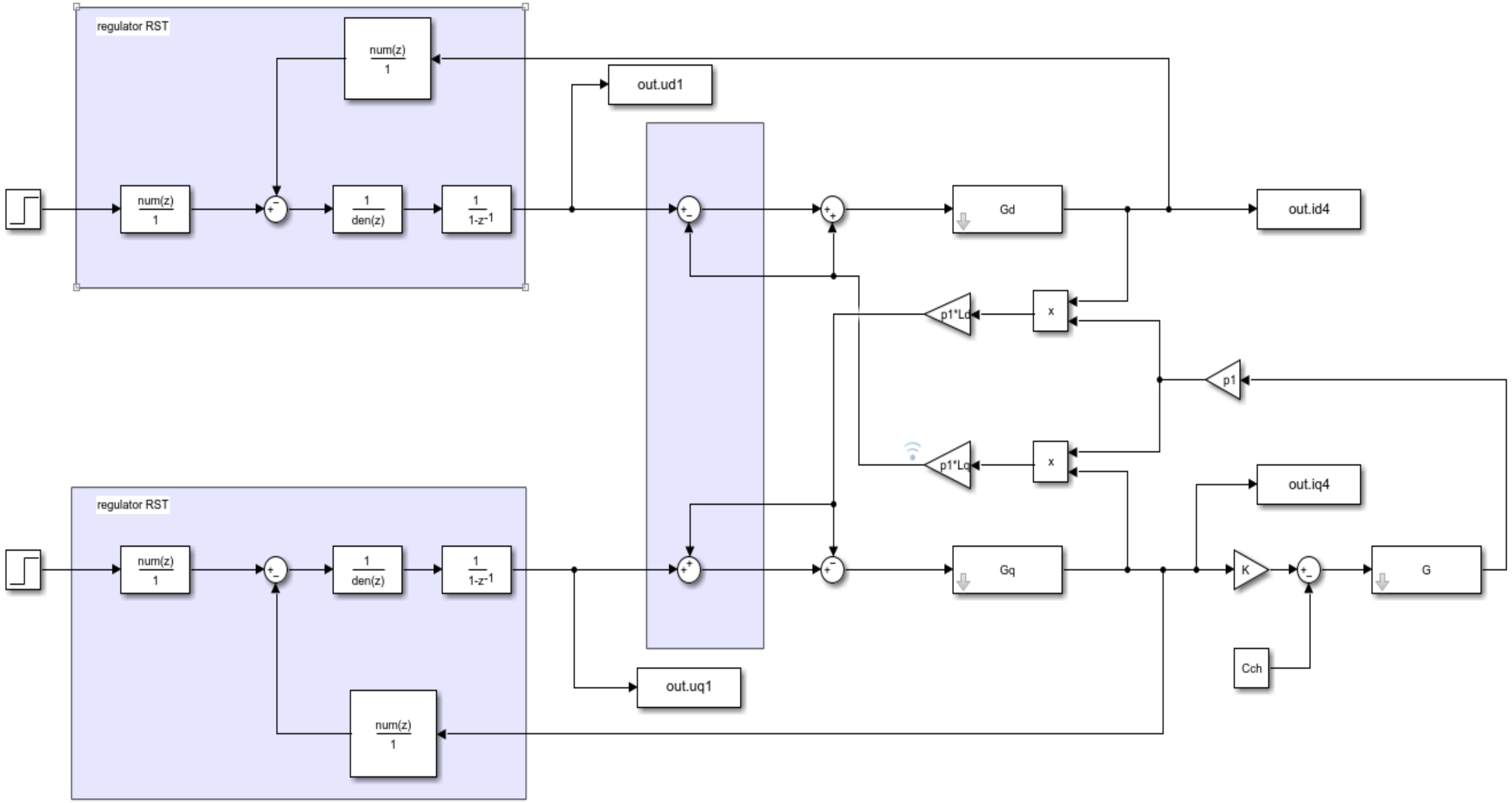
$$u_\Omega(k) = \Delta u_\Omega^*(k) + u_\Omega(k-1) \qquad \textbf{(36)}$$

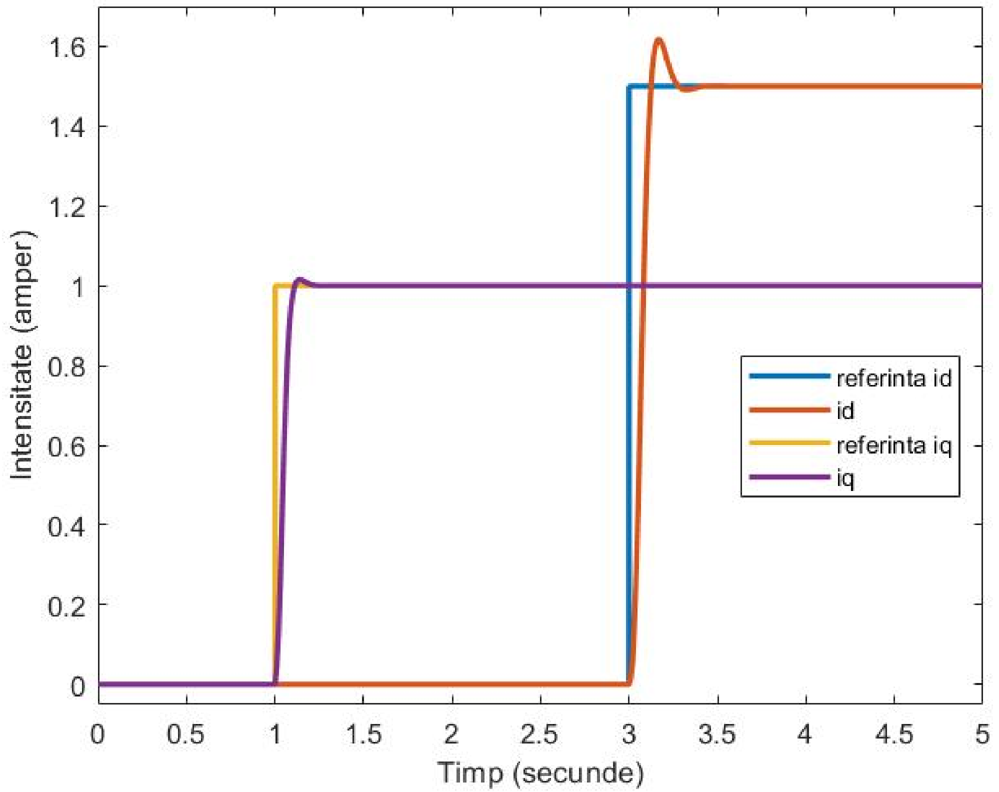
- Rejecția perturbației → elaborarea referinței pentru MPC-ul de turație cu un filtru de tip PI cu parametrii aflați prin metoda *trial and error*.

5. Rezultatele obținute prin simulare

5.1. Controlul cu algoritmul GPC

➢ Testarea buclei de curent cu decuplare și regulatoare RST:



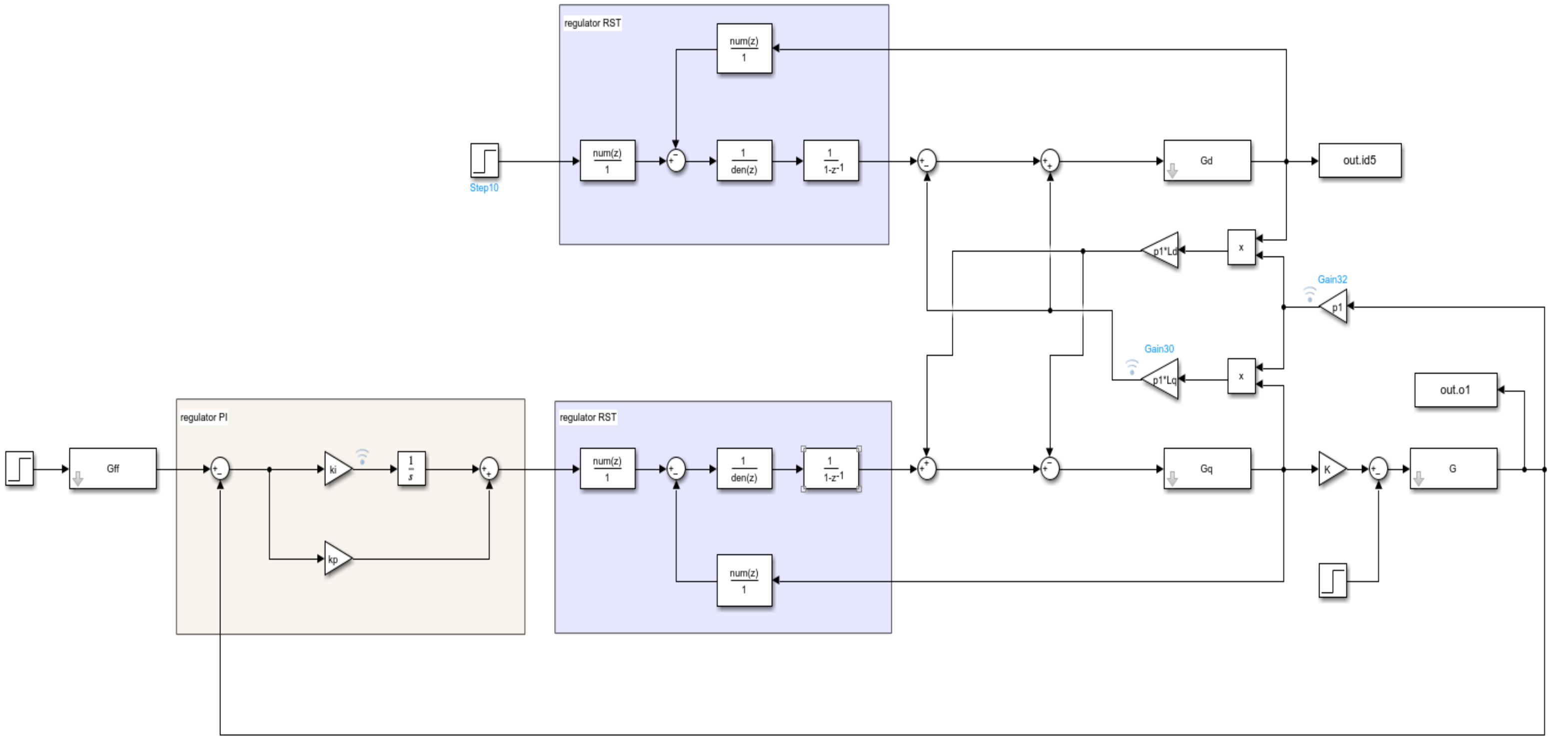


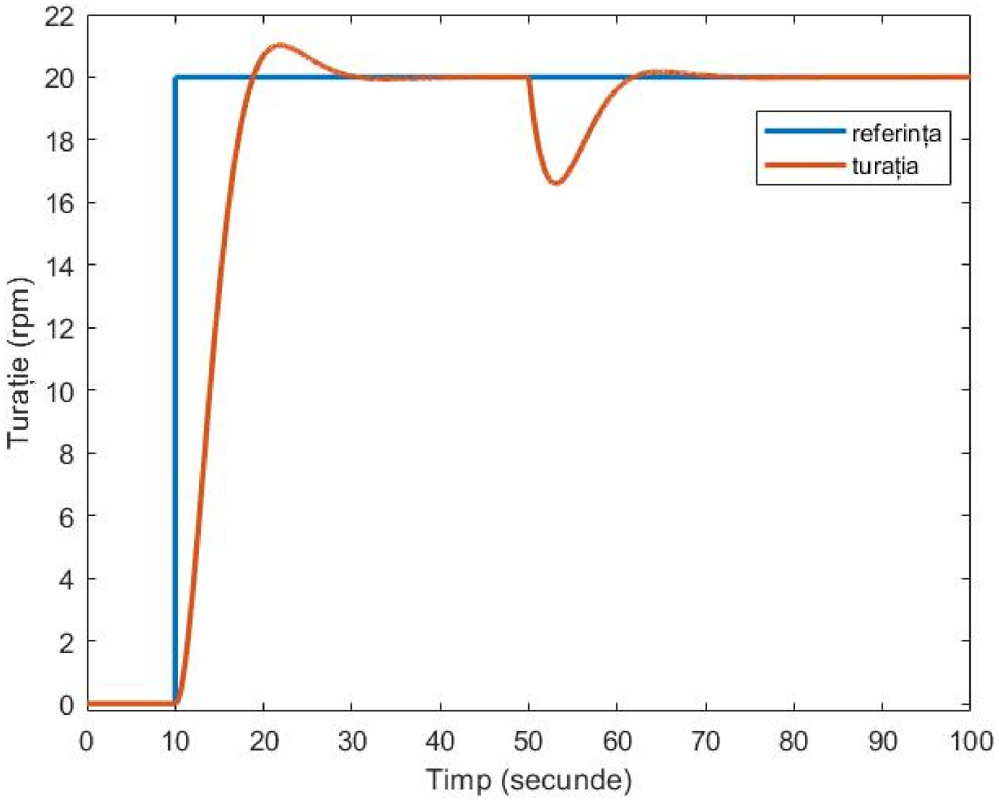
➢ Performanțele obținute pentru curenți:

- Pentru i_d:
  - suprareglarea = 0.076 (7.6%)
  - durata regimului tranzitoriu= 0.215s
- Pentru i_q:
  - suprareglarea = 0.015 (1.5%)
  - durata regimului tranzitoriu= 0.092s

5.1. Controlul cu algoritmul GPC

➢ Testarea structurii de reglare în cascadă a turației motorului cu regulator PI:





➢ Performanțele obținute pentru turație:

- supraregalarea = 0.051 (5.1%)
- durata regimului tranzitoriu= 12.321s

5.2. Controlul cu algoritmul MPC

➢ În Scriptul MATLAB au fost create două obiecte de tip MPC pentru curenți:

```
mpccon1=mpc(Gd,Ts,hp,hm,W1,MV1,OV1)
mpccon2=mpc(Gq,Ts,hp,hm,W2,MV2,OV2)
```

Cu parametrii:

- $G_{d/q}$ - funcțiile de transfer ale curenților
- T_s - perioada de eșantionare
- hp - orizontul de predicție
- hm - orizontul minim de predicție
- $W1/2$ penalizările funcțiilor de cost:

```
W1 = struct('ManipulatedVariables',[0],'ManipulatedVariablesRate',[1e-5],'OutputVariables',[0.6],'ECR',100000);
W2 = struct('ManipulatedVariables',[0],'ManipulatedVariablesRate',[3e-5],'OutputVariables',[0.5],'ECR',100000);
```

- $MV1/2$- restricțiile pentru tensiune:

```
MV1=struct('Min',[-vdmax],'Max',[vdmax],'RateMin',[-Inf],'RateMax',[Inf]);
MV2=struct('Min',[-vqmax],'Max',[vqmax],'RateMin',[-Inf],'RateMax',[Inf]);
```

- $OV1/2$- restricțiile pentru curent:

```
OV1=struct('Min',[0],'Max',[idmax]);
OV2=struct('Min',[-iqmax],'Max',[iqmax]);
```

➢ În Scriptul MATLAB a fost creat un obiect de tip MPC pentru turație:

```
mpccon3=mpc(G_f,Ts,hp,hm,Wo,MVo,OVo);
```

Cu parametrii:

- G_f - funcția de transfer a sistemului mecanic
- T_s - perioada de eșantionare
- hp - orizontul de predicție
- hm - orizontul minim de predicție
- Wo - penalizările funcțiilor de cost:

```
Wo = struct('ManipulatedVariables',[0],'ManipulatedVariablesRate',[2e-5],'OutputVariables',[0.6],'ECR',100000);
```

- MVo- restricțiile pentru curent:

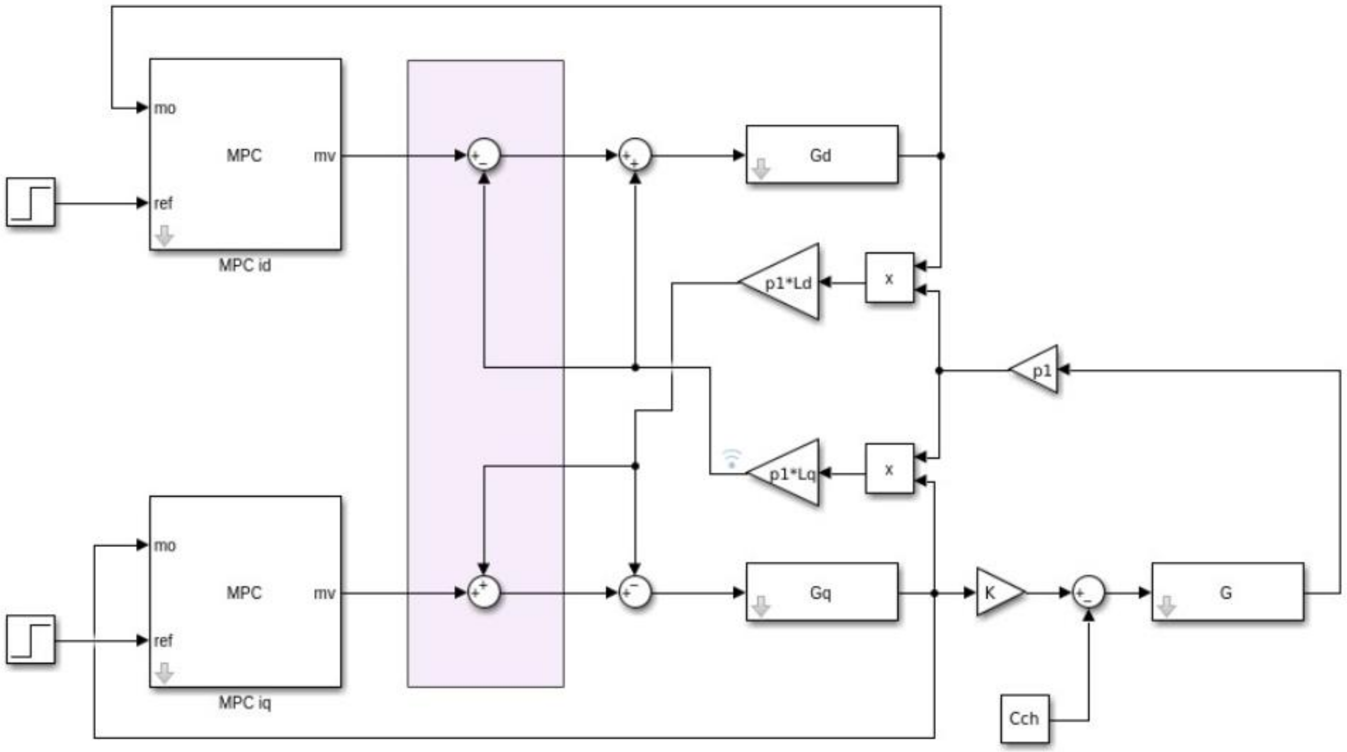
```
MVo=struct('Min',[-iqmax],'Max',[iqmax],'RateMin',[-Inf],'RateMax',[Inf]);
```

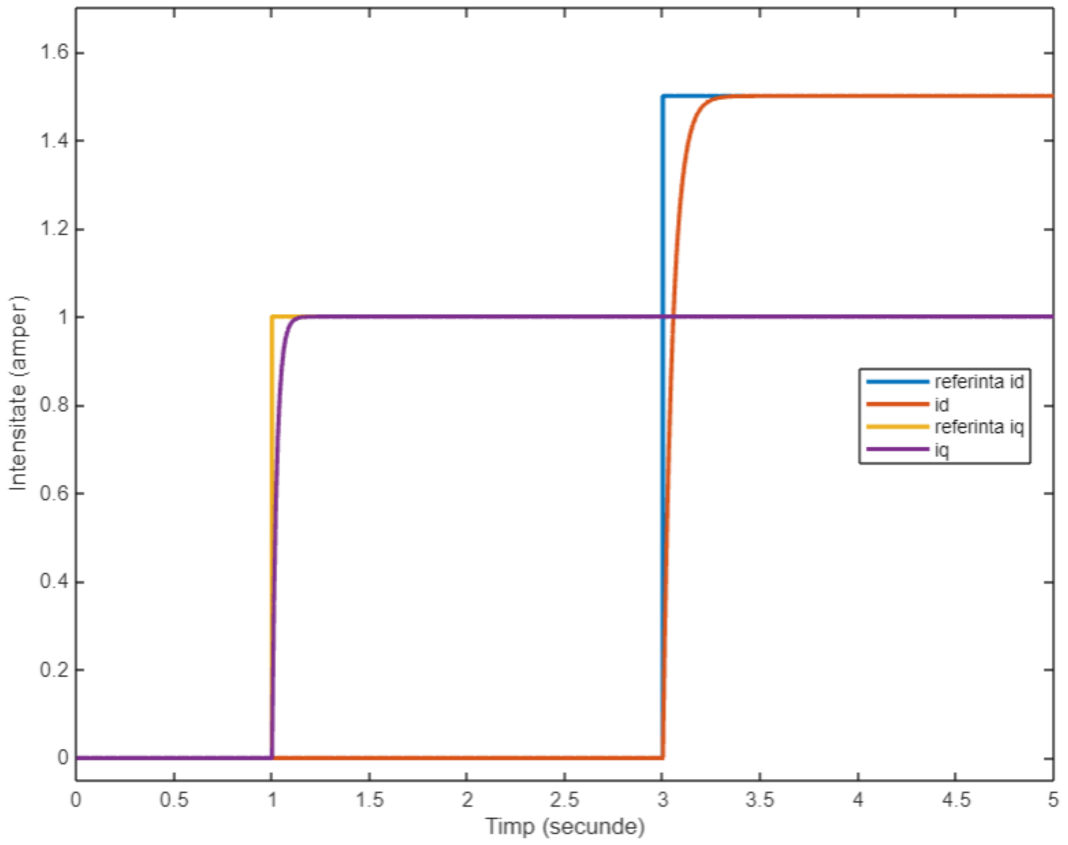
- OVo- restricțiile pentru turație:

```
OVo=struct('Min',[-Inf],'Max',[Inf]);
```

5.2. Controlul cu algoritmul MPC

➢ Testarea buclei de curent cu decuplare și regulatoare MPC din toolbox-ul MPC MATLAB:



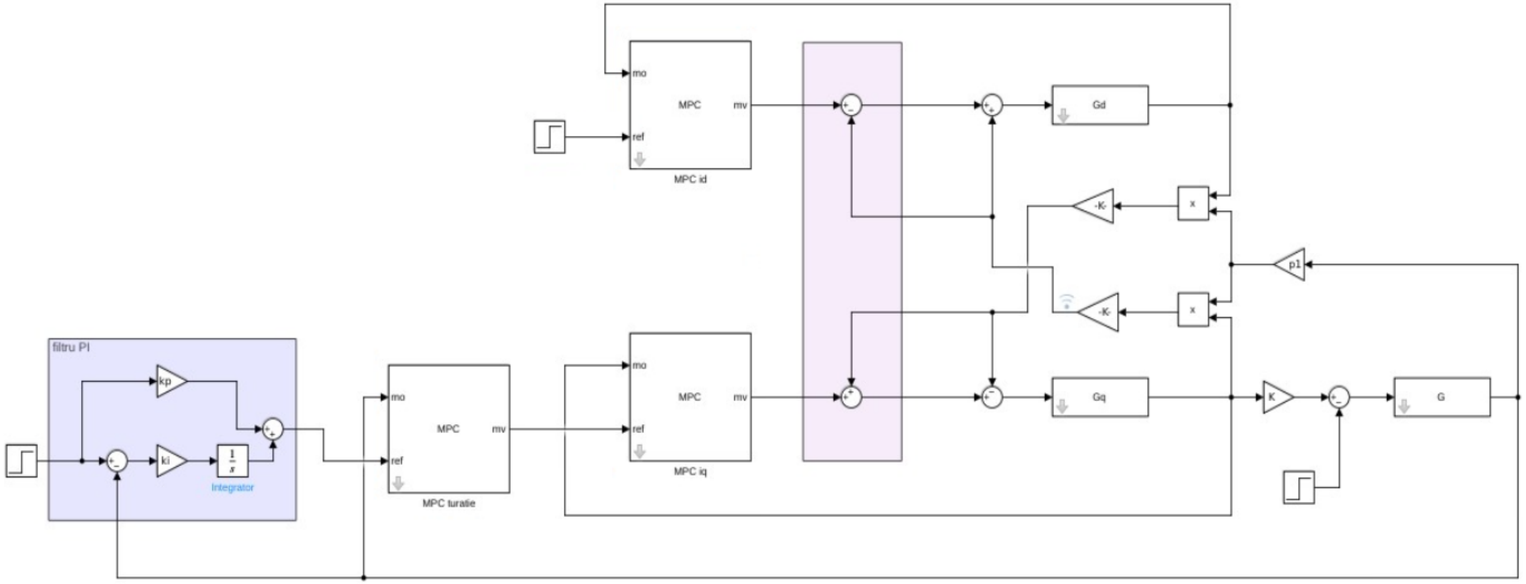


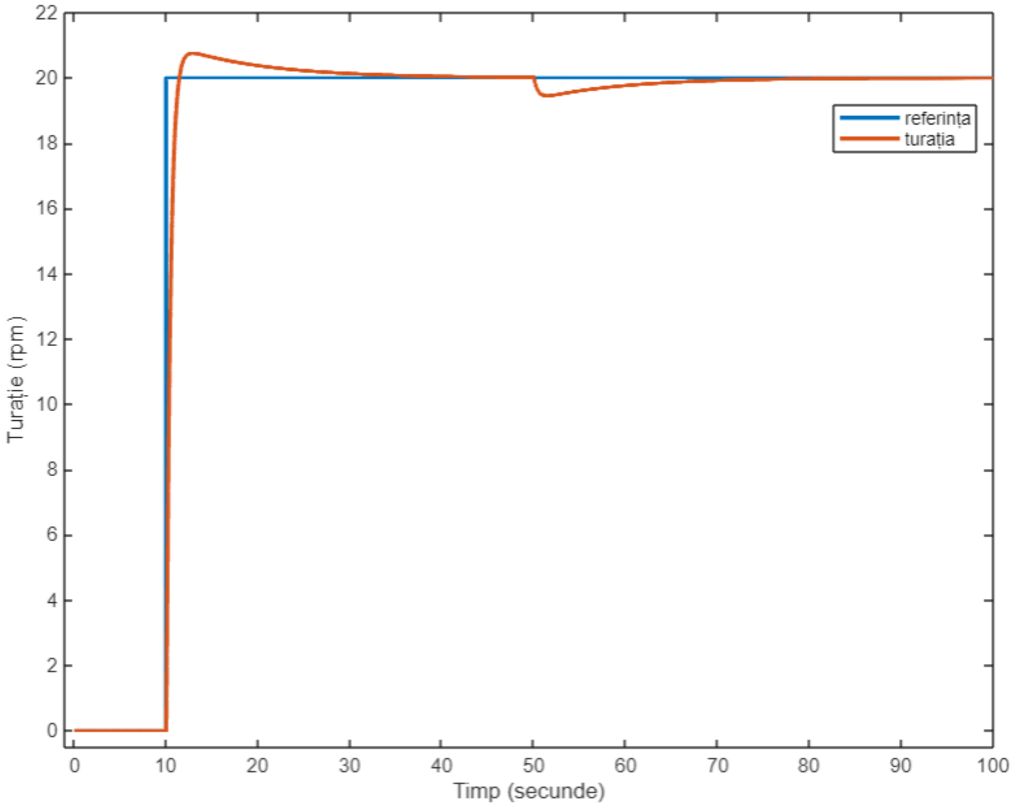
➢ Performanțele obținute pentru curenți:

- Pentru i_d:
  - suprareglarea = 0 (0%)
  - durata regimului tranzitoriu= 0.146s
- Pentru i_q:
  - suprareglarea = 0 (0%)
  - durata regimului tranzitoriu= 0.071s

5.2. Controlul cu algoritmul MPC

- Testarea structurii de reglare în cascadă a turației motorului cu regulator MPC din toolbox-ul MPC MATLAB:





- Performanțele obținute pentru turație:

  - suprareglarea = 0.0375 (3.75%)
  - durata regimului tranzitoriu= 1.88s

6. Concluzii

- Bazându-ne pe modelul d-q al motorului sincron cu reluctanță variabilă, s-a dezvoltat o structură de reglare în cascadă pentru controlul turației.
- Aceasta include o buclă internă cu un algoritm de decuplare, regulatoare GPC și MPC pentru controlul curenților i_d și i_q , iar pentru partea fixată a buclei externe a fost aplicat un control cu un regulator PI și un control cu regulator MPC pentru a asigura reglarea turației.
- În urma simulărilor, algoritmul MPC s-a dovedit a fi mai eficient decât algoritmul GPC, atât pentru curenți, cât si pentru turație, având o suprareglare și o durată a regimului tranzitoriu mai mică.

Vă mulțumesc pentru atenție!