

Regulacija toka in oblike preseka plazme v fuzijskem tokamak reaktorju Iter

Samo Gerkšič

**Odsek za sisteme in vodenje, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana
samo.gerksic@ijs.si**

Plasma current and shape control for the Iter tokamak reactor

For plasma magnetic control, a cascade control scheme with a plasma current and shape controller (CSC) in the outer loop and a vertical stabilisation (VS) controller in the inner loop is commonly used. The main challenges are: the suppression of plasma shape transients after disturbances specific to tokamak reactors; the robustness to changes of the local dynamics; using the available chamber volume in the best possible way, so that the plasma is placed as close as possible to the plasma facing components; and tight control near power supply and gap constraints. Model predictive control (MPC) is an advanced process control approach for dealing with constraints, already established in a range of industries involving multivariable processes with slower dynamics. A prototype MPC controller for the ITER CSC is designed in order to assess the feasibility of its practical implementation, and is compared to a CSC based on singular perturbation decomposition (SPD).

Kratek pregled prispevka

Za magnetno vodenje plazme se tipično uporablja kaskadna regulacijska shema, ki ima v zunanji zanki regulator toka in oblike preseka plazme (RTOPP) in v notranji zanki regulator vertikalne stabilizacije (VS). Glavni izzivi so: izločanje prehodnih pojavov preseka plazme po motnjah, značilnih za tokamak reaktor; robustnost na spremembe lokalne dinamike; čimboljše uporabo volumna reaktorja, ki je na voljo, tako da se plazma nahaja blizu sten reaktorja; učinkovita regulacija v bližini območja omejitev odmikov in napajanja. Prediktivno vodenje je napredna tehnologija vodenja, namenjena izboljšanju delovanja v prisotnosti omejitev, ki je že uveljavljena v različnih industrijah, kjer so prisotni problemi vodenja multivariabilnih procesov s počasno dinamiko. Predstavljen je prototipni prediktivni regulator za RTOPP v Iter za namen ocene možnosti praktične izvedbe in simulacijsko primerjavo učinkovitosti delovanja z RTOPP na podlagi dekompozicije s singularno perturbacijo.

1 Uvod

V fuzijskem tokamak reaktorju želeni profil plazme zagotavljamo z magnetnim vodenjem plazme (MVP). Naloga MVP je zadrževanje plazme predpisanega radialnega profila in toka s predpisanimi odmiki od stene reaktorja v prisotnosti specifičnih tipov motenj, kot npr. vertikalnih pomikov (vertical displacement event, VDE) in H-L prehodov (prehod med režimoma visokega in nizkega zadrževanja), ter znatnih sprememb lokalne dinamike v različnih delovnih točkah [1, 2]. MVP je tipično izvedeno v obliki kaskadne regulacijske sheme, sestavljene iz notranje zanke vertikalne stabilizacije (VS), ki stabilizira hitro nestabilno vertikalno dinamiko tokamak reaktorja, in zunanje zanke regulacije toka in oblike preseka plazme (RTOPP). Za učinkovito izvedbo vodenja so zaželeno regulacijske metode, ki bi omogočile izboljšanje delovanja v območju blizu geometrijskih omejitev reaktorja in omejitev izvršnih členov.

Prediktivno vodenje (model predictive control, MPC) je napredna metodologija vodenja, ki je že dokaj uveljavljena v procesni industriji. V industrijsko prakso se je prebila zaradi sistematičnosti pristopa za vodenje obsežnih multivariabilnih procesov, možnosti upoštevanja omejitev na procesnih signalih in podpori za optimiranje delovanja procesov [3]. Te možnosti so obetavne tudi za izboljšanje izvedbe MVP in drugih regulacijskih sistemov v tokamak reaktorju. Glavna ovira pri tem je omejitev uporabnosti primernih MPC metod na procese s počasno dinamiko zaradi relativno dolgih dosegljivih časov vzorčenja zaradi uporabe sprotne optimizacije. Vendar pa v zadnjem obdobju tečejo intenzivne raziskave glede možne pospešitve izvedbe MPC [4, 5, 6].

V tem delu predstavljamo poskusno izvedbo RTOPP za tokamak reaktor Iter s prediktivnim regulatorjem z namenom ocene možnosti praktične izvedbe. Prikazana je simulacijska primerjava delovanja z RTOPP na podlagi dekompozicije s singularno perturbacijo (singular perturbation decomposition, SPD) [7], pri čemer je uporabljena VS opisana v [8]. V poglavju 2 je predstavljen regulacijski problem in simulacijsko okolje. Poglavje 3 na

kratko opisuje VS. Poglavje 4 opisuje predlagani prediktivni RTOPP. V poglavju 5 so predstavljeni simulacijski rezultati.

2 Zasnova magnetnega vodenja plazme Iter in simulacijsko okolje

Tokamak Iter je še v gradnji, zato simulacije in metode načrtovanja regulacije temeljijo na lokalnih linearnih dinamičnih modelih visokega reda, določenih z metodami teoretičnega modeliranja izvedenimi v orodjih CREATE-L in CREATE-NL [9, 10]. Modeli v tabeli 1 so določeni za nabor predvidenih delovnih točk reaktorja Iter, ki jih določajo nazivni parametri plazme: tok plazme I_p , poloidni beta β_p in interna induktanca l_i .

Tabela 1: Lokalni linearni modeli.

Oznaka modela	I_p (MA)	β_p	l_i	Število stanj
LM52	15.0	0.10	0.80	123
LM53	15.0	0.10	1.00	123
LM59	15.0	0.60	0.60	123
LM60	15.0	0.60	0.80	123
LMNE	15.0	0.10	1.21	120

Simulacijska shema v okolju Matlab-Simulink vsebuje:

- linearni model plazme in navitij,
- poenostavljeni model diagnostike (določanja temeljnih fizikalnih parametrov plazme na podlagi meritev) plazme za vertikalno hitrost v_p in vertikalno pozicijo z_p plazme (uporabljen je nizkopasovni filter prvega reda s časovno konstanto $7 \cdot 10^{-3}$ s),
- poenostavljena modela napajalnikov za supraprevodno navitje VS1 in za ohmsko navitje v notranjosti reaktorja VS3 (uporabljeni so: nizkopasovna filtra s časovno konstanto $7.5 \cdot 10^{-3}$ s; časovni zakasnitvi $2.5 \cdot 10^{-3}$ s; zasičenji ± 6 kV za VS1 in ± 1.5 kV za VS3),
- poenostavljene modele glavnih napajalnikov (uporabljeni so: nizkopasovni filtri s časovno konstanto 0.015 s; časovne zakasnitve 0.015 s; zasičenja ± 1.5 kV, razen VCS1 ± 3 kV),
- notranjo regulacijsko zanko VS,
- zunanjo regulacijsko zanko RTOPP,

- bloke, ki omogočajo simulacijo motenj tipa VDE (preko začetnega stanja linearnega modela) in BPLI (oz. H-L prehoda, preko posnetih profilov β_p and l_i) [11].

Simulacija se izvaja z uporabo Simulinkove metode ode23tb z relativno toleranco 10^{-5} .

3 Vertikalna stabilizacija (VS)

Za VS je uporabljen regulator ctLQGz, opisan v [8] – gre za časovno zvezno izvedbo linearno-kvadratno Gaussovega regulatorja (optimalnega regulatorja stanj s Kalmanovim filtrom, LQG), ki regulira poleg v_p tudi z_p . Signal vplivnih veličin tega regulatorja je $\mathbf{u}_{VS} = [u_{VS,1} \ u_{VS,2}]^T$, kjer sta:

- $u_{VS,1}$ napetost napajalnika ohmskega navitja VS3 znotraj reaktorja,
- $u_{VS,2}$ napetost napajalnika supraprevodnega navitja VS1.

ctLQGz regulira proti 0 signale reguliranih spremenljivk $\mathbf{y}_{VS} = [y_{VS,1} \ y_{VS,2} \ y_{VS,3}]^T$, kjer so:

- $y_{VS,1}$ je tok skozi navitje VS3,
- $y_{VS,2}$ je vertikalna hitrost plazme v_p ,
- $y_{VS,3}$ je vertikalna pozicija plazme z_p .

ctLQGz določimo tako, da najprej uglasimo izhodiščni ctLQG regulator [12, 8], ki regulira le $[y_{VS,1} \ y_{VS,2}]^T$, na podlagi linearnega modela tretjega reda $\{\mathbf{A}_r, \mathbf{B}_r, \mathbf{C}_r, \mathbf{0}\}$, dobljenega iz nazivnega modela s postopkom redukcije. LQ regulator uglasimo z izbiro diagonalnih elementov stroškovnih matrik $\mathbf{Q}_{C,y}$ in $\mathbf{R}_{C,u}$, kovariančni matriki Kalmanovega filtra (KF) pa z izbiro $\mathbf{Q}_{K,y} = \mathbf{B}_r \mathbf{B}_r^T$ in uglastivijo diagonalnih elementov $\mathbf{R}_{K,y}$ [8]. Potem dodamo regulacijsko zanko za z_p preko razširitve osnovnega modela z integratorjem

$$\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_r & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{C}_{r,2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_r \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_r & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

kjer je $\mathbf{C}_r^T = [\mathbf{C}_{r,1}^T \ \mathbf{C}_{r,2}^T]$.

4 Regulator toka in oblike preseka plazme (RTOPP)

Izhod RTOPP je vektor enajstih napetosti glavnih napajalnikov \mathbf{V}_{PF} .

Regulirani vhodi RTOPP so:

- vektor reguliranih odmikov \mathbf{g} , ki dejansko vsebuje 4 odmike roba plazme od sten reaktorja in dva položaja udarnih točk na steni v divertorju, vzdolž z geometrijo reaktorja definiranih vektorjev,

- tok plazme I_p ,

- tokove v 11 supraprevodnih navitjih \mathbf{I}_{PF} ,

- kot vhoda sta lahko uporabljena tudi z_p in I_{VS3} (tok napajalnika VS3), ki jih regulira VS.

4.1 Prediktivni regulator (MPC)

Predlagani prediktivni regulator je zasnovan na podlagi nazivnega modela LM52, v zapisu v prostoru stanj. Dodani so poenostavljeni modeli dinamike napajalnikov in diagnostike. Nato je izračunan zaprtozančni model s stabilizacijsko povratno zvezo VS, od katerega uporabimo podsistem z vhodov $\mathbf{u}_{RTOPP} = \mathbf{V}_{PF}$ na izhode $\mathbf{y}_{RTOPP} = [\mathbf{I}_{PF} \ I_{VS3} \ z_p \ I_p \ \mathbf{g}]^T$. Z uporabo Schurove redukcije red modela znižamo s 199 na 44 (kolikor je mogoče brez izgube relevantno hitre dinamike). Osnovni model za prediktivni RTOPP $\{\mathbf{A}_{RTOPP}, \mathbf{B}_{RTOPP}, \mathbf{C}_{RTOPP}, \mathbf{0}\}$ končno dobimo s časovno diskretizacijo s časom vzorčenja $T_s = 0.1$ s, z zadrževalnikom ničtega reda.

RTOPP za potrebe te študije je zasnovan tako, da zagotavlja regulacijo I_p in \mathbf{g} proti 0 s čimmanjšim pogreškom v ustaljenem stanju. Integrirno delovanje regulatorja je izvedeno po konceptu ocenjevanja persistentnih motenj (katerih ocena srednje vrednosti v ustaljenem stanju ni enaka nič) [13]. Hitrostna oblika (brez sledenja referenci) se uporablja za preprečitev odmika reguliranih veličin od 0 v ustaljenem stanju zaradi ne-ničnih ustaljenih vrednosti reguliranih signalov.

Za ocenjevanje persistentnih motenj osnovni model razširimo z integratorji na izhodih, pri katerih je zahtevana regulacija brez pogreška v ustaljenem stanju. Osnovni model zapišemo z

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

kjer sta \mathbf{w} in \mathbf{v} signala belega šuma na stanju in izhodih. Dodatna integrirna stanja \mathbf{d} , na katera deluje beli šum \mathbf{w}_d , dodamo stanju modela,

tako da razširjeno stanje postane $\mathbf{x}_a = [\mathbf{x}^T \mathbf{d}^T]^T$ in $\mathbf{w}_a = [\mathbf{w}^T \mathbf{w}_d^T]^T$. Razširjeni sistem je

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \mathbf{d}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{d}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u}(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{w}_d(k) \end{bmatrix} \\ \mathbf{y}(k) &= [\mathbf{C} \quad \mathbf{I}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{d}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

oz. krajše

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_a(k+1) &= \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a(k) + \mathbf{B}_a \mathbf{u}_a(k) + \mathbf{w}_a(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a(k) + \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

Za ocenjevanje stanj s tem razširjenim modelom uporabimo časovno nespremenljivo izvedbo Kalmanovega filtra (KF)

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_a(k|k-1) &= \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a(k-1|k-1) + \mathbf{B}_a \mathbf{u}(k-1) \\ \mathbf{x}_a(k|k) &= \mathbf{x}_a(k|k-1) + \mathbf{M}_K [\mathbf{y}(k) - \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a(k|k-1)] \end{aligned} \quad (5)$$

kjer \mathbf{M}_K določimo z rešitvijo Riccatijeve enačbe v ustaljenem stanju na podlagi kovariančnih matrik $\mathbf{Q}_K = E\{\mathbf{w}_a \mathbf{w}_a^T\}$ in $\mathbf{R}_K = E\{\mathbf{v} \mathbf{v}^T\}$. KF uporabljamo v smislu opazovalnika, tako da diagonalne elemente \mathbf{Q}_K in \mathbf{R}_K uporabljamo kot uglastitvene parametre za doseganje ustrezne dinamike.

Hitrostno obliko dosežemo tako, da razširjeni model $\{\mathbf{A}_a, \mathbf{B}_a, \mathbf{C}_a, \mathbf{0}\}$ ponovno razširimo. V hitrostno-razširjeni obliki postane novi vhod sistema diferenčni vhod $\delta \mathbf{u}$; razširjeno stanje je $\mathbf{x}_{av} = [\mathbf{x}_a^T \mathbf{u}(k-1)^T]^T$; novi izhod je $\mathbf{y}_{av} = [\mathbf{y}_a^T \mathbf{u}(k-1)^T]^T$:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(k+1) \\ \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_a & \mathbf{B}_a \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(k) \\ \mathbf{u}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_a \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \delta \mathbf{u}(k) \\ \begin{bmatrix} \mathbf{y}_a(k) \\ \mathbf{u}(k-1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_a & \mathbf{D}_a \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(k) \\ \mathbf{u}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_a \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \delta \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

kar pri $\mathbf{D}_a = \mathbf{0}$ krajše zapišemo kot

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{av}(k+1) &= \mathbf{A}_{av} \mathbf{x}_{av}(k) + \mathbf{B}_{av} \delta \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}_{av}(k) &= \mathbf{C}_{av} \mathbf{x}_{av}(k) \end{aligned} \quad (7)$$

Prediktivni RTOPP nato zgradimo z uprabo knjižnice Multi-Parametric Toolbox (MPT) [4] s kriterijsko funkcijo

$$J(\delta \mathbf{u}) = \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{y}_{av,k}^T \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{C,y} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{y}_{av,k} + \delta \mathbf{u}_k^T \mathbf{R}_{C,\delta u} \delta \mathbf{u}_k \quad (8)$$

kjer diagonalne elemente utežnih matrik izhodov $\mathbf{Q}_{C,y}$ in sprememb vhodov $\mathbf{R}_{C,\delta u}$ uporabljamo kot uglastitvene parametre ter je $N = 30$ dolžina predikcijskega obzorja.

Regulacijski zakon dobimo z minimizacijo J glede na vektor prihodnjih sprememb vhodov $\delta \mathbf{u}$ v prisotnosti omejitev amplitude vhodov $\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max}$ in opsijsko še omejitev tokov $\max(\mathbf{I}_{PF}) \leq 4$ kA. Za zmanjšanje računske zahtevnosti število optimiranih sprememb regulirnega signala zmanjšamo iz 30 na 3 z uporabo grupiranja zaporednih vrednosti (move blocking) v intervale dolžin [2 2 16]. V odsotnosti omejitev lahko regulacijski zakon določimo analitično po metodi najmanjših kvadratov, v prisotnosti omejitev pa ga lahko pretvorimo v standardni optimizacijski problem kvadratnega programiranja [13].

4.2 Dekompozicija s singularno perturbacijo (SPD)

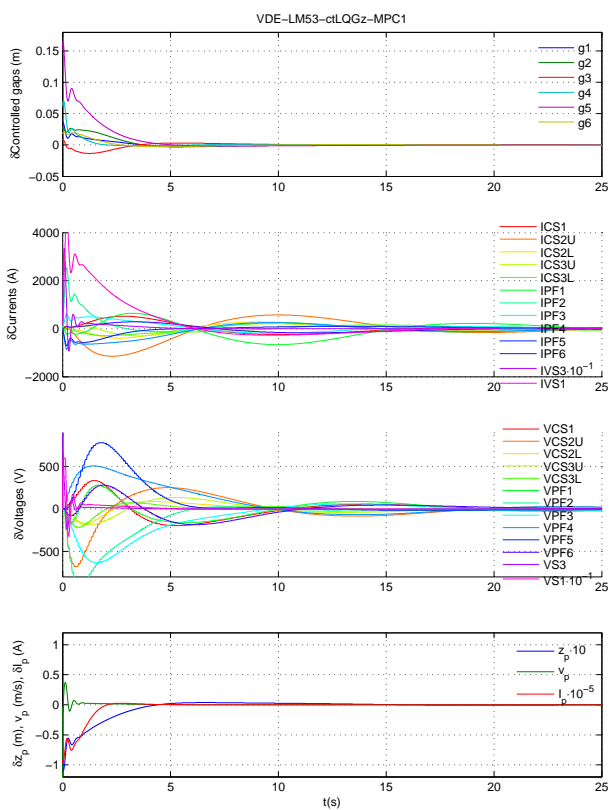
Za vrednotenje delovanja smo rezultate primerjali z regulatorjem na podlagi SPD [7]. Ta je izveden v obliki multivariabilnega proporcionalno-integrirnega regulatorja z \mathbf{g} in I_p na \mathbf{V}_{PF} , z dodatnim proporcionalnim ojačenjem z \mathbf{I}_{PF} na \mathbf{V}_{PF} . Vsebuje tudi zaščito pred integralskim pobegom v primeru zasičenja izvršnih členov.

5 Simulacijski rezultati

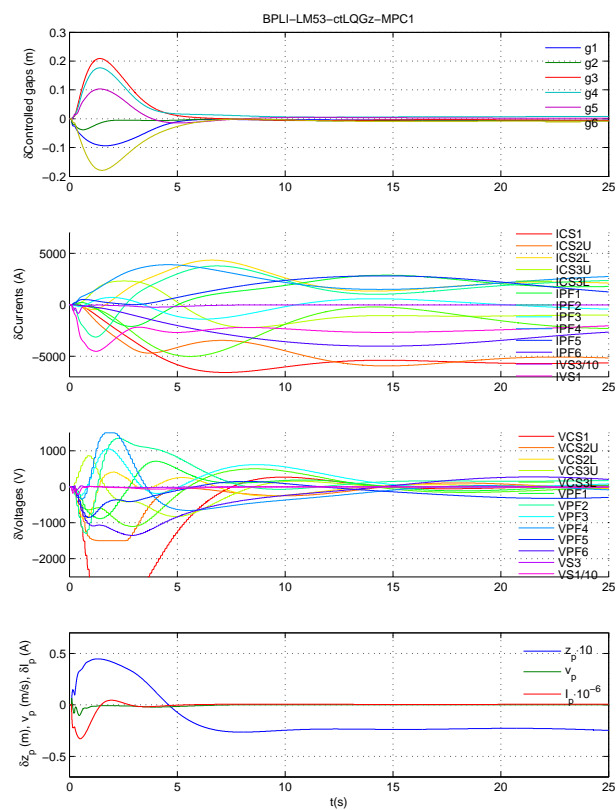
V tabeli 2 so podane RISE vrednosti (root-integral-square-error, kvadratni koren integrala kvadratnega pogreška) glavnih procesnih signalov v simulacijah dolžine 25 s

- z uporabo regulatorjev MPC in SPD,
- za motnji tipov VDE in BPLI,
- s petimi lokalnimi modeli (za oceno robustnosti na spremembo delovne točke).

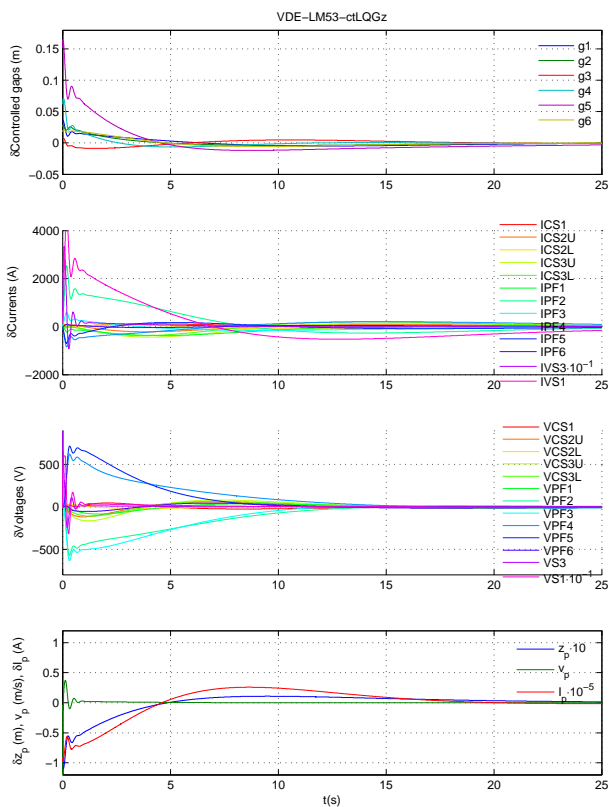
Sliki 1-2 kažeta poteke glavnih procesnih signalov pri motnji VDE, slike 3-7 pa pri motnji BPLI, z regulatorjema MPC in SPD. Prikazane so samo simulacije z modeloma LM52 in LM53. Grafi prikazujejo "delta" vrednosti signalov (odmik od nazivne delovne točke, ne absolutne vrednosti).



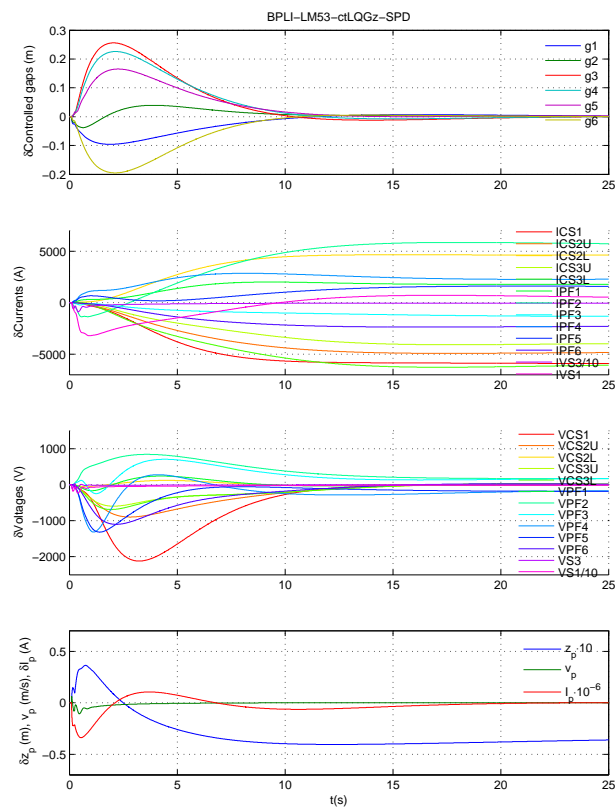
Slika 1: Simulacija VDE: ctLQGz-MPC, model LM53.



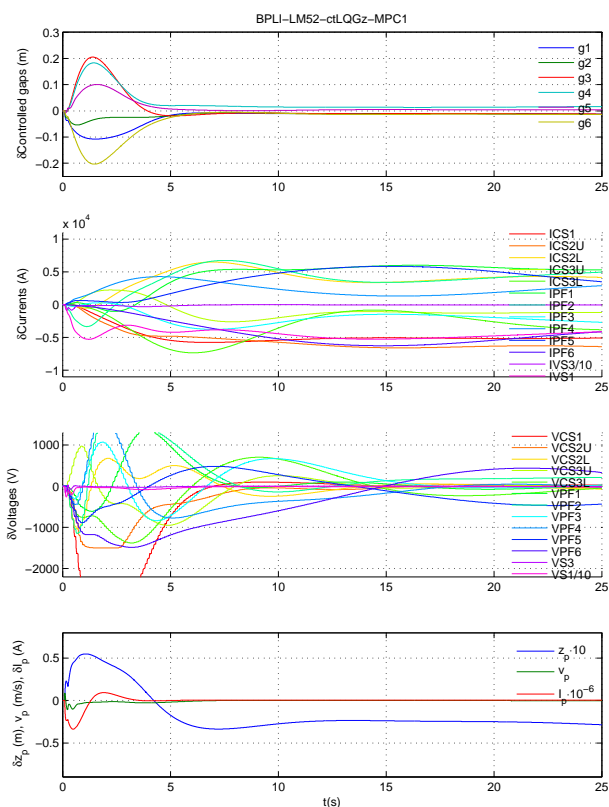
Slika 3: Simulacija BPLI: ctLQGz-MPC, model LM53.



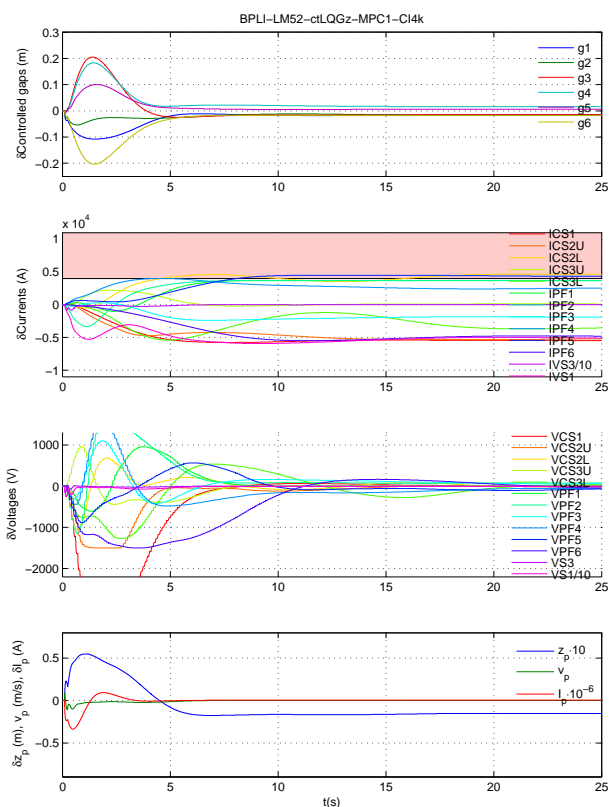
Slika 2: Simulacija VDE: ctLQGz-SPD, model LM53.



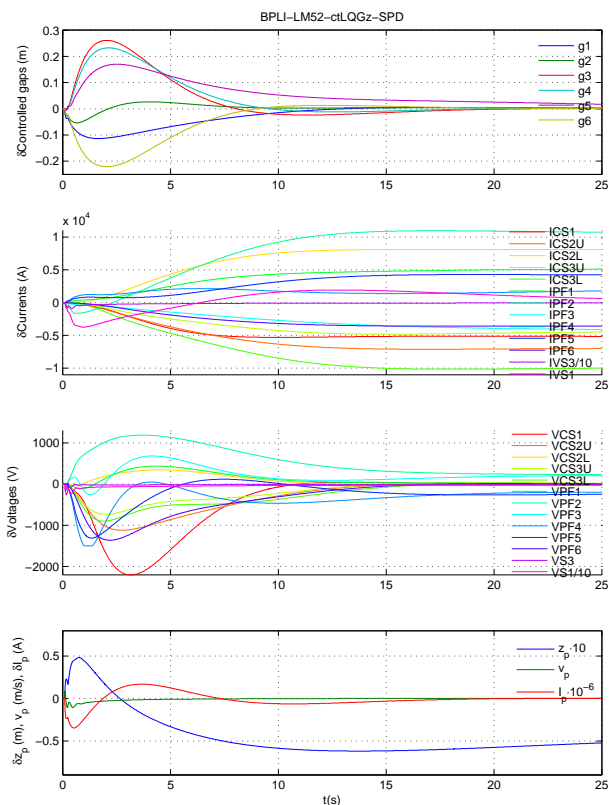
Slika 4: Simulacija BPLI: ctLQGz-SPD, model LM53.



Slika 5: Simulacija BPLI: ctLQGz-MPC, model LM52.



Slika 7: Simulacija BPLI: ctLQGz-MPC, model LM52, with soft constraints $\max(\mathbf{I}_{PF}) \leq 4 \text{ kA}$.



Slika 6: Simulacija BPLI: ctLQGz-SPD, model LM52.

Rezultatov regulatorjev MPC in SPD ni enostavno primerjati, ker imata obe znatno število stopenj prostosti pri uglasitvi in je mogoče pri tem dosežati različne kompromise. Zato so prikazani rezultati veljavni le za uporabljeni uglasitvi. Z MPC je bilo načeloma doseženo hitrejše izločanje motenj v I_p in \mathbf{g} . Odziv z_p je večinoma izboljššan v BPLI simulacijah, vendar nekoliko upočasnjjen v simulacijah VDE. Izboljšano regulacijsko delovanje je bilo doseženo na račun rahlo povečanih napetosti \mathbf{V}_{PF} in tokov \mathbf{I}_{PF} , vendar brez agresivnih odzivov, ki bi nakazovali preobčutljivost.

Slika 7 prikazuje simulacijo podobno tisti na sliki 5, pri kateri so bile poleg omejitev amplitude \mathbf{u} aktivirane tudi mehke izhodne omejitve $\max(\mathbf{I}_{PF}) \leq 4 \text{ kA}$. Regulator se te omejitve ne more držati popolnoma, vendar so vrhovi prehodnih vrednosti tokov v rdeče osenčenem področju opazno nižji.

6 Sklep

Študija je doslej pokazala, da je doseženo učinkovito simulacijsko delovanje

prediktivnega RTOPP in da je bilo dosežena učinkovita omejitev tokov v navitjih, ne da bi bilo potrebno izvesti dodatni vmesni kaskadni nivo regulacije I_{PF} . Vendar MPC regulator praktično ni preprosto izvedljiv ob času vzorčenja 0.1 s in je potrebna vsaj 10-kratna pohitritev izračuna v primerjavi z razvojno različico. Delo bomo zato nadaljevali z izvedbo sheme s kompenzatorjem delovne točke, z uporabo pristopov za zmanjšanje kompleksnosti in z raziskavami nedavno razvitih hitrih MPC metod. Potrebno je tudi nadaljnje delo na uglaševanju za učinkovito delo v območju omejitev in podpora uglaševanja s pomočjo lokalne linearne analize.

7 Zahvala

Delo je nastalo v sodelovanju s konzorcijem CREATE iz Neaplja in podjetjem Cosylab, d.d.. Zahvaljujemo se za sofinanciranje ARRS (P2-0001).

8 Literatura

- [1] T. Bellizio et al., Control of elongated plasma in presence of ELMs in the JET tokamak, IEEE T. Nucl. Sci. 58, 4 (2011).
- [2] A. Neto et al., Exploitation of Modularity in the JET Tokamak VS System, Control Eng. Pract. 20, 9 (2012).
- [3] S. J. Qin and T. A. Badgwell, A survey of industrial model predictive control technology, Control Eng. Pract., 11 (2003).
- [4] Kvasnica, M.: "*Real-time model predictive control via multi-parametric programming*". VDM verlag, Saarbrücken, 2009.
- [5] M. N. Zeilinger et al., Real-time suboptimal Model Predictive Control using a combination of Explicit MPC and Online Optimization, IEEE Trans. Auto. Contr., 56 (2011) 1524–1534.
- [6] E. N. Hartley et al., Predictive control using an FPGA with application to aircraft control, IEEE Trans. Control Systems Technology, 22, 3 (2014)
- [7] M. Ariola and A. Pironti, An Application of the Singular Perturbation Decomposition to Plasma Position and Shape Control, Eur. J. Control 9 (2003) 410–420.
- [8] S. Gerškšič, G. De Tommasi, Improving magnetic plasma control for ITER Fusion Eng. Des. 89, 9-10 (2014) 2477–2488.
- [9] R. Albanese and F. Villone, The linearized CREATE-L plasma response model for the control of current, position and shape in tokamaks, Nucl. Fus. 38 (5) (1998).
- [10] R. Albanese et al., Plasma response models for current, shape and position control at JET, Fusion Eng. Des. 66–68 (2003).
- [11] G. Ambrosino et al., Design of the Plasma Position and Shape Control in the ITER Tokamak Using In-Vessel Coils, IEEE Trans. Plasma Science 37 (2009).
- [12] S. Gerškšič and G. De Tommasi, Vertical stabilization of ITER plasma using explicit model predictive control, Fusion Eng. Des. 88, 6-8 (2013) 1082–1086.
- [13] S. Gerškšič and B. Pregelj, Tuning of a tracking multi-parametric predictive controller using local linear analysis, IET Control Theory Appl. 6, 5 (2012), 1–11.

Tabela 2: RISE vrednosti simulacij (odmik od delovne točke).

LMNE	VDE-ctLQGz-MPC	VDE-ctLQGz-SPD	BPLI-ctLQGz-MPC	BPLI-ctLQGz-SPD
max(CtrlGaps)	0.067183	0.07322	0.24188	0.6735
avg(CtrlGaps)	0.019551	0.02092	0.16442	0.447
max(AllGaps)	0.088145	0.09702	0.48326	1.0339
avg(AllGaps)	0.017834	0.01875	0.20083	0.48994
IVS3	36320	36357	7358.9	8557.4
IVS1	1262	1344.2	4731.5	7366.8
VS3	97.011	97.126	17.127	65.23
VS1	3264.5	3283.2	1420.5	2411.2
v_p	0.6012	0.60184	0.11636	0.087254
z_p	0.025029	0.02783	0.087254	0.25402
I_p	25926	31177	442220	575550
LM52	VDE-ctLQGz-MPC	VDE-ctLQGz-SPD	BPLI-ctLQGz-MPC	BPLI-ctLQGz-SPD
max(CtrlGaps)	0.11312	0.13224	0.28927	0.45392
avg(CtrlGaps)	0.03931	0.04727	0.19914	0.32625
max(AllGaps)	0.21748	0.24904	0.6673	1.2303
avg(AllGaps)	0.052378	0.06047	0.2547	0.42863
IVS3	10014	9840.8	6860.6	8539.7
IVS1	3861	4097.4	22622	8149.3
VS3	158.11	156.92	63.439	69.548
VS1	2484.3	2435.7	1825.7	2412.4
v_p	0.13284	0.13179	0.075632	0.086616
z_p	0.082884	0.09539	0.14286	0.26018
I_p	79948	134900	275000	431300
LM53	VDE-ctLQGz-MPC	VDE-ctLQGz-SPD	BPLI-ctLQGz-MPC	BPLI-ctLQGz-SPD
max(CtrlGaps)	0.10138	0.11235	0.27591	0.46948
avg(CtrlGaps)	0.037829	0.04289	0.18146	0.30869
max(AllGaps)	0.25307	0.28416	0.56506	0.8483
avg(AllGaps)	0.055365	0.06094	0.2296	0.36091
IVS3	11949	11860	5730.9	6909.6
IVS1	4075.3	4311.1	12920	5927
VS3	192.85	192.27	54.533	56.088
VS1	2615.1	2586.5	1548.7	1897.1
v_p	0.16552	0.16504	0.062971	0.073573
z_p	0.078885	0.08749	0.12626	0.17578
I_p	68748	122600	265130	380330
LM59	VDE-ctLQGz-MPC	VDE-ctLQGz-SPD	BPLI-ctLQGz-MPC	BPLI-ctLQGz-SPD
max(CtrlGaps)	0.12084	0.16562	0.30581	0.54037
avg(CtrlGaps)	0.048016	0.05993	0.25257	0.29891
max(AllGaps)	0.20879	0.28263	1.2666	2.3938
avg(AllGaps)	0.059293	0.07147	0.41902	0.58263
IVS3	9016.3	8624.3	8502.6	10344
IVS1	3401.4	3459	55016	7778.7
VS3	134.88	132.64	86.887	94.695
VS1	2623.4	2533.1	2282.3	3016.1
v_p	0.10447	0.10228	0.091223	0.10034
z_p	0.091871	0.11635	0.15196	0.35798
I_p	128420	192320	291360	378100
LM60	VDE-ctLQGz-MPC	VDE-ctLQGz-SPD	BPLI-ctLQGz-MPC	BPLI-ctLQGz-SPD
max(CtrlGaps)	0.14021	0.17821	0.36421	0.6735
avg(CtrlGaps)	0.049426	0.06082	0.23439	0.447
max(AllGaps)	0.25214	0.29641	0.68351	1.0339
avg(AllGaps)	0.062564	0.07296	0.28841	0.48994
IVS3	8424.5	7989.6	6378.5	8557.4
IVS1	3923.5	4168.2	19028	7366.8
VS3	119.07	116.17	55.333	65.23
VS1	2356.3	2248.4	1691.6	2411.2
v_p	0.10323	0.10036	0.071016	0.087254
z_p	0.085086	0.10566	0.13991	0.25402
I_p	79535	120170	308480	575550