

# Regulacija vertikalnega položaja plazme v fuzijskem tokamak reaktorju Iter

Samo Gerkšič<sup>1</sup>, Gianmaria de Tommasi<sup>2</sup>, Klemen Žagar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Odsek za sistem in vodenje, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, Ljubljana

<sup>2</sup> Associazione EURATOM-ENEA-CREATE, Univ. di Napoli Federico II, Napoli

<sup>3</sup> Cosylab d.d., Teslova 30, Ljubljana

Samo.Gerksic@ijs.si

## *Control of vertical plasma position in Iter tokamak fusion reactor*

This work addresses the problem of stabilization of the vertical position of plasma centroid in the Iter tokamak. It is the inner loop of a cascade scheme for control of plasma cross-section shape. The controller has two outputs, which are the voltages applied to the circuits of external superconducting and in-vessel ohmic poloidal coils. There are two controlled outputs: the vertical velocity of the plasma cross-section centroid, and the current in the in-vessel ohmic coils. The control problem is challenging due to the multivariable structure, instability, variation of dynamics depending on the operating point, and thermal constraints of the in-vessel ohmic coils. We design a control scheme based on a linear-quadratic optimal (LQ) controller with a Kalman filter. We test it on first-principles local linear models, and compare it with a static output-feedback control scheme.

## *Kratek pregled prispevka*

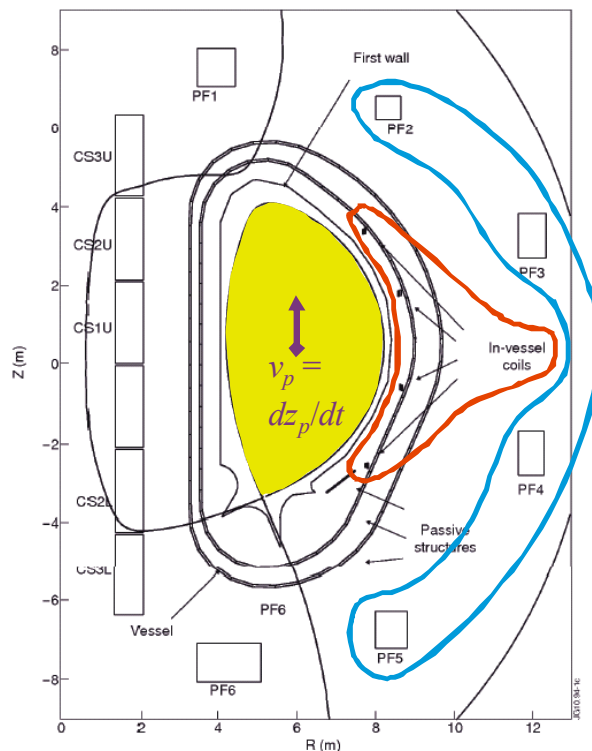
Članek obravnava problem stabilizacije vertikalnega položaja centroida plazme v fuzijskem tokamak reaktorju Iter. Gre za notranjo zanko kaskadne regulacijske sheme za vodenje oblike preseka plazme. Vodenje poteka preko dveh izvršnih členov, t.j. napetostnih generatorjev za kombinaciji zunanjih superprevodnih in notranjih ohmskih navitij. Reguliramo dva izhoda: vertikalno hitrost centroida preseka plazme in tok v ohmskih navitjih. Problem je regulacijsko zahteven zaradi multivariabilnosti, dinamične nestabilnosti, sprememb dinamike v odvisnosti od delovne točke in termičnih omejitev ohmskih navitij. Izvedli smo regulacijsko shemo, ki temelji na linearnem kvadratnem (LQ) optimalnem regulatorju s Kalmanovim filtrom. Preizkusili smo jo na lokalnih linearnih modelih, izvirajočih iz postopkov teoretičnega modeliranja, in jo primerjali z izvirno regulacijsko shemo s statično povratno zvezo z izhodov.

## 1 Uvod

Razvoj na področju vertikalnega vodenja nestabilne plazme visoke gostote v fuzijskih tokamak reaktorjih je v zadnjem obdobju osredotočen na zmožnostih vzdrževanja obratovanja v prisotnosti izrazitih motenj, kot naprimer vertikalnih pomikov (vertical displacement event, VDE) in robnih lokaliziranih načinov (edge localised mode, ELM) [1,2].

Eden izmed predlaganih konceptov magnetnega vodenja za Iter [3,6] predvideva izvedbo vertikalne stabilizacije (VS) plazme preko dveh napetostnih generatorjev za kombinaciji zunanjih superprevodnih (superconducting, SC) navitij PF2-PF5 in dodatnih notranjih (in-vessel, IV) ohmskih navitij, obkroženih z modro oz. rdečo črto na shemi preseka reaktorja na sliki 1. Slednja so potrebna zato, ker oklep reaktorja preveč oslabi magnetno polje SC navitij, da bi le-ta sama omogočala učinkovito izločanje motenj; pri njihovi uporabi pa je nujno upoštevati termične omejitve. Za regulacijo je uporabljena statična izhodna povratna zveza (static output feedback, SOF). Gre za izredno preprost regulator z le tremi proporcionalnimi ojačenji, vseeno pa dosega razmeroma učinkovito in robustno regulacijo. Preprosta struktura je zaželena iz več razlogov:

- zaradi možnosti dovolj hitre računalniške izvedbe (predvsem na manjših tokamak reaktorjih z zelo hitro dinamiko);
- zaradi zahteve po robustnosti na izjemo velike spremembe dinamike procesa v različnih delovnih točkah
- zaradi možnosti sprotnega razporejanja ali adaptacije parametrov.



Slika 1: Presek Iter tokamak reaktorja.

Rumena: plazma; modro obkroženo: PF navitja uporabljena za VS; rdeče obkroženo: dodatna IV navitja

V tem delu iščemo možnost izboljšanja regulacije VS ob ohranitvi robustnosti z uporabo regulacijske sheme, ki temelji na linearnem kvadratnem (LQ) optimalnem regulatorju s Kalmanovim filtrom (KF) na podlagi reduciranega modela procesa [8]. Preizkusili smo jo na lokalnih linearnih modelih, izvirajočih iz postopkov teoretičnega modeliranja, in jo primerjali z izvorno SOF shemo. Uvodoma opisujemo simulacijski model za vertikalno stabilizacijo plazme za Iter in SOF regulacijsko shemo, nato predstavimo shemo na podlagi LQ in KF.

## 2 Simulacijski model za VS plazme za Iter

Modeli uporabljeni za načrtovanje regulatorjev in simulacijske eksperimente temeljijo na rezultatih programskih kod CREATE-L in CREATE-NL za simulacijo ravnotežnih modelov plazme in magnetnih navitij po pristopu teoretičnega modeliranja [4,5], s pomočjo katerih smo dobili lokalne

linearne modele visokega reda (130 stanj). Kot nominalni model smo uporabili Model 1 za ravnotežno stanje v delovni točki pri toku plazme  $I_p = 14.5 \text{ MA}$ , poloidnem beta faktorju  $\beta_p = 0.11$  in notranji induktanci  $l_i = 0.85$ , za oceno robustnosti pa smo uporabljali znatno drugačen Model 2 v delovni točki pri  $I_p = 15 \text{ MA}$ ,  $\beta_p = 0.1$  in  $l_i = 1.21$ .

Za problem stabilizacije vertikalnega položaja plazme smo obravnavali podsistem celotnega modela z dvema vhidoma:

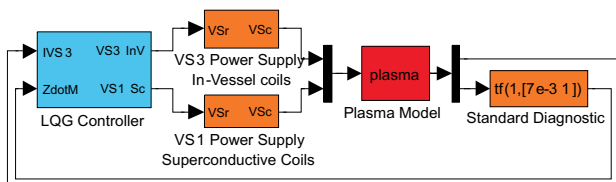
- napetost VS3 na IV navitjih  $u_1 = u_{ic}$
- napetost VS1 na SC navitjih  $u_2 = u_{VS1}$

in dvema izhodoma:

- tok v IV navitjih  $y_1 = x_{ic}$
- vertikalna hitrost centroida plazme  $y_2 = v_p$

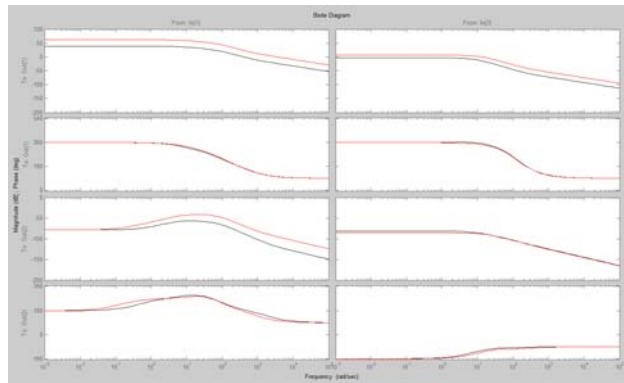
Simulacije poleg le-teh prikazujejo še vertikalno pozicijo centroida plazme  $z_p$  in tok za vertikalno stabilizacijo skozi SC navitja  $i_{VS1}$ .

Slika 2 prikazuje ogrodje regulacijske sheme VS. Poleg samega modela plazme (rdeči blok) v širši kontekst dinamike procesa spadajo še dinamika rekonstrukcije  $v_p$  iz magnetnih meritev (blok 'Standard Diagnostics', modelira se kot nizkoprepustni člen prvega reda) in dinamika napajalnikov VS1 in VS3 (modelirata se kot nizkoprepustna člena prvega reda s časovno zakasnitvijo in zasičenjem) v oranžnih blokih.



Slika 2: Regulacijska shema VS

Za ilustracijo je na sliki 3 prikazan Bodejev diagram obeh modelov.



Slika 3: Bodejev diagram: Model 1 (črna), Model 2 (rdeča)

V tipičnih simulacijskih preizkusih smo simulirali motnjo tipa VDE z odmikom 10 cm. Dodatno smo preizkušali tudi simulacijski odziv na motnje tipa ELM preko posnetih vhodnih potekov parametrov  $\beta_p$  in  $l_i$ .

Za oceno kvalitete regulacije smo dodatno opazovali še RISE cenilke (root-integral-squared-error, koren integrala kvadrirane vrednosti pogreška) signalov  $x_{ic}$  (termična obremenitev IV navitij) in  $v_p$  (učinkovitost vertikalne regulacije).

### 3 Regulacija VS s shemo SOF

Rezultate novih shem smo primerjali z izhodiščno regulacijsko shemo s statično povratno zvezo (SOF) Ambrosina s sod. [3,6]

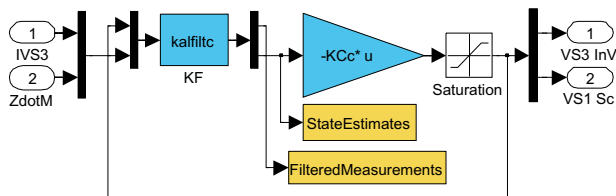
$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{y}(t), \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0.00285 & -2309 \\ 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ki kljub preprostosti zagotavlja relativno učinkovito in robustno regulacijo. Glavni cilj regulacije VS je stabilizacija inherentne nestabilnosti pozicije plazme z regulacijo vertikalne hitrosti plazme  $v_p$  proti 0 (medtem ko vertikalne pozicije  $z_p$  regulator VS ne vrača v izhodišče, ker je to naloga zunanje regulacijske zanke). Sekundarni cilj je regulacija  $x_{ic}$  proti 0.

### 4 Shema z LQ in KF

Izboljšano vodenje smo poskušali doseči s shemo na sliki 2, kjer je regulator LQG izveden z LQ optimalnim regulatorjem in Kalmanovim filtrom na sliki 4. Blok zasičenja prepreči, da bi

v primeru zasičenja regulirnih signalov KF tvoril napačne ocene stanj. Za izračun LQ regulatorja in KF smo uporabljali funkcije iz Matlabove knjižnice Control Systems Toolbox, in sicer najprej v časovno zvezni različici (ctLQ), nato pa še v časovno diskretni (dtLQ).

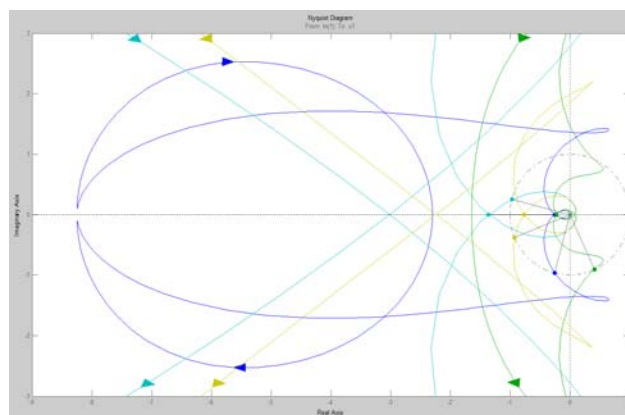


Slika 4: Izvedba regulatorja LQG

Izhodiščni modeli plazme, ki izvirajo iz postopkov teoretičnega modeliranja, zaradi svoje kompleksnosti niso neposredno uporabni za določanje regulatorja LQ in KF. Modelu plazme je potrebno najprej priključiti aproksimirano dinamiko napajalnikov in modula za rekonstrukcijo  $v_p$ . Nato smo določili aproksimacijo nizkega reda za tako razširjeni model. Uporabili smo reducirani model v prostoru stanj tretjega reda,  $\{A_r, B_r, C_r, 0\}$  ki smo ga dobili z Schurovo metodo [7]. Drastično zmanjšanje reda je na mestu zato, ker se lokalne dinamike v različnih delovnih točkah izredno razlikujejo; z visokim redom lahko sicer dobimo mnogo boljši model v posamezni delovni točki, ki pa v drugi delovni točki ne bo točnejši kot model nizkega reda. Ključna je namreč dovolj robustna uglasitev sheme.

Znani težavi pri uglasitvi LQG regulatorjev sta občutljivost na pogrešek modela in veliko število parametrov, kar smo reševali z uporabo konceptov pristopa Loop Transfer Recovery [8]. S tem smo število prostih parametrov zmanjšali na 5, kar pa je še vedno relativno veliko za simulacijsko uglasitev v razmerah, ko simulacija zaradi dinamične togosti pogosto ni zanesljiva. Zato smo si pri uglasitvi pomagali z grafičnim okoljem, v katerem lahko z drsniki preprosto spreminjamo parametre, program pa ob vsaki spremembi v hipu izračuna zaprtostne funkcije in grafično prikaže rezultate linearne analize, npr. v obliki Nyquistovega diagrama na sliki 5. Ta primerja Nyquistove krivulje izhodiščnega SOF

regulatorja z Modelom 1 (temno modra) in Modelom 2 (svetlo modra) s krivuljami LQG regulatorja z Modelom 1 (zelena) in Modelom 2 (rumena). Iz diagrama je mogoče razbrati, da ima LQG shema boljše stabilnostne rezerve. Po želji nato sprožimo še simulacijo odziva, kar vzame nekaj več računskega časa. Dodana vrednost pristopa z linearno analizo je, da so rezultati indikativni tudi takrat, ko simulacija zaradi nestabilnosti ali dinamične togosti sistema ne da uporabnega rezultata.



Slika 5: Analiza LQG in SOF shem z Nyquistovim diagramom

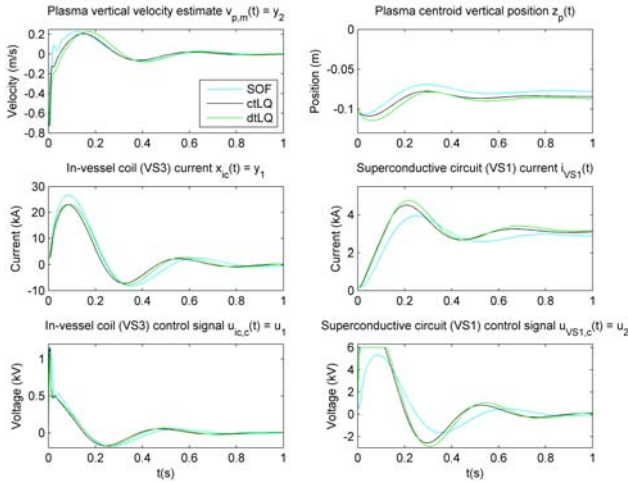
Izbrali smo naslednje utežne matrike LQ in KF:

$$\mathbf{Q}_y = \begin{bmatrix} 0.00001 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_u = \begin{bmatrix} 0.008 & 0 \\ 0 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{Q}_{KF,y} = \mathbf{B}_r \mathbf{B}_r^T, \quad \mathbf{R}_{KF,u} = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 10^{-13} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Simulacijski odziv na motnjo tipa VDE amplitude 10 cm z Modelom 1 je prikazan na sliki 6, vrednosti RISE cenilk pa v tabeli 1. Na sliki svetlomodre črte prikazujejo simulacijo z izhodiščnim regulatorjem SOF, črne pa časovno zvezno izvedbo ctLQ+KF sheme. Slednja doseže nekoliko hitrejši regulacijski odziv in nižjo termično obremenitev IV navitij. Prav tako nekoliko boljše rezultate dosežemo pri simulaciji z Modelom 2, kar kaže na izboljšano robustnost. Izboljšanje je doseženo predvsem na račun hitrejšega odziva  $u_2$ , ki je pri SOF shemi reguliran iz dinamično zakasnjene signala  $y_1$ .

V zadnjem koraku smo preizkusili še časovno diskretno izvedbo sheme dtLQ+KF, ker je v praktični izvedbi regulator izveden časovno diskretno. Pri zelo kratkih časih vzorčenja bistvene razlike med izvedbama ne opazimo, z daljšanjem časa vzorčenja pa se odziv pri časovno diskretni izvedbi slabša. Rezultati pri času vzorčenja  $T_s = 0.005$  s so prikazani v tabeli 1 in na sliki 6 (zeleni črta).



Slika 6: Simulacija zaprtzančnega odziva na motnjo tipa VDE amplitude 10 cm, Model 1

Tabela 1: Kvaliteta regulacije pri motnji tipa VDE amplitude 10 cm, Model 1

Regulator	Termična obremenitev IV navitij $RISE(x_{ic}(t))$	Učinkovitost vertikalne regulacije $RISE(v_p(t))$
SOF	9805.7	0.10786
ctLQ	8239.4	0.09625
dtLQ	8563.6	0.11658

## 5 Sklep

Z regulacijsko shemo z LQ optimalnim regulatorjem in Kalmanovim filtrom na podlagi reduciranega modela smo uspeli nekoliko izboljšati regulacijski odziv v smislu pospešitve

odziva, zmanjšanja termične obremenitve IV navitij in tudi izboljšanja robustnosti na pogrešek modela. Struktura regulatorja je kompleksnejša kot pri izhodiščni SOF shemi, vendar še vedno omogoča praktično izvedbo.

## 6 Zahvala

Delo je nastalo v okviru Kompetenčnega centra za sodobne tehnologije vodenja (KC STV), ki ga delno financirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport ter Evropska unija (EU) iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

## 7 Literatura

- [1] A. Neto, R. Albanese, G. Ambrosino, M. Ariola, G. Artaserse, B. Carvalho, et al., Exploitation of Modularity in the JET Tokamak VS System, *Control Eng. Pract.* **20**, 9, 2012
- [2] T. Bellizio, R. Albanese, G. Ambrosino, M. Ariola, G. Artaserse, F. Crisanti, et al., Control of elongated plasma in presence of ELMs in the JET tokamak, *IEEE T. Nucl. Sci.* **58**, 4, 2011
- [3] G. Ambrosino, M. Ariola, G. De Tommasi, A. Pironti, Plasma Vertical Stabilization in the ITER Tokamak via Constrained Static Output Feedback, *IEEE T. Contr. Syst. T.* **19**, 2, 2011
- [4] 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
- [5] R. Albanese, G. Calabrò, M. Mattei, F. Villone, Plasma response models for current, shape and position control at JET, *Fusion Eng. Des.* **66–68**, 2003
- [6] G. Ambrosino, M. Ariola, G. De Tommasi, A. Pironti, Robust vertical control of ITER plasmas via static output feedback, *Proc. IEEE MSC'11*, Denver CO, 2011
- [7] M. G. Safonov and R. Y. Chiang, A Schur Method for Balanced Model Reduction, *IEEE T. Automat. Contr.* **34**, 7, 1989
- [8] J.M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*. Addison-Wesley, Wokingham UK, 1989