



مطالعه سیستم کنترلی تک‌ورودی-تک‌خروجی مستقل برای کنترل موقعیت افقی و جریان پلاسمایی در توکامک IR-T1 با استفاده از کنترل‌گرهای PID و مقاوم

جانغز، مرتضی - نقی‌دخت، احمد*

دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی

چکیده:

مدل پلاسمای در توکامک معمولاً دارای عدم قطعیتی همچون عدم قطعیت ساختاری و دینامیک مدل سازی نشده می‌باشد. کنترل مقاوم، نظریه مناسب‌تر برای حل این مشکل در مقایسه با روش کنترل مرسوم PID است. در این مطالعه، ما یک طرح کنترلی مقاوم H_{∞} را برای کنترل موقعیت افقی و یکی نیز برای جریان پلاسمایی در توکامک IR-T1 پیشنهاد می‌دهیم. بررسی مقایسه‌ای بین کنترل‌گر بهینه‌ساز H_{∞} و کنترل‌گر PID مرسوم برای این توکامک، بهبود قابل توجه عملکرد با کنترل‌گر مقاوم H_{∞} نسبت به کنترل‌گر PID برای کنترل موقعیت افقی پلاسمای را نشان می‌دهد در حالی که برای کنترل جریان پلاسمایی، هر یک از این دو کنترل‌گر در محدوده زمانی خاصی رفتار بهتری دارند.

کلمات کلیدی: توکامک IR-T1، موقعیت افقی و جریان پلاسمای، سیستم SISO، کنترل‌گر PID و مقاوم.

مقدمه:

کنترل جریان، موقعیت و نیز شکل پلاسمایی برای دستیابی به نواحی عملکردی پیشرفته در عملیات توکامک حیاتی است. برای این منظور مجموعه‌ای از کوئل‌های میدان قطبی که با تولید میدان‌های مغناطیسی باعث تثبیت پلاسمای و جلوگیری از برخورد آن با محفظه توکامک می‌شوند، بکار می‌روند. لذا در طول حالت‌های مختلف تخلیه باری توکامک، کنترل دقیق این پارامترهای پلاسمایی باید تضمین شود. بدنبال این هدف، مطالعه سیستم تک‌ورودی-تک‌خروجی (SISO) برای هرکدام از پارامترها پیشنهاد می‌شود. بدلیل بکارگیری آسان و عدم وجود خطای حالت پایا، الگوریتم کنترل PID کلاسیک بطور وسیعی در کنترل فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. توکامک‌های قدیمی بطور معمول از کنترل‌گرهای مرتبه پایین بر پایه این الگوریتم استفاده می‌کنند که براساس مدل‌های ساده از سیستم‌های کنترلی خودتنظیم‌گر در حین کار توکامک طراحی می‌شوند. با این وجود در توکامک‌های امروزی، بدلیل ویژگی‌های غیرخطی با عدم قطعیت فراوان سیستم‌های کنترلی پارامترهای پلاسمای، امکان رسیدن به اثر کنترلی رضایتمند از طریق کنترل PID کلاسیک مشکل می‌باشد. روش‌های مختلفی برای حل این نوع مشکلات کنترلی وجود دارد که عموماً می‌تواند به دو گروه تقسیم شود: کنترل انطباقی [۲] و کنترل مقاوم [۳]. امروزه استفاده از تکنیک‌های کنترلی مدرن و پیچیده سطح بالا همچون $LQG-LTR$ [۴] یا H_{∞} [۵]، با حاشیه‌های امنیت نسبتاً سخت و دقیق به عنوان مثال برحسب ولتاژهای کوئل‌ها و جریان‌ها، توان الکتریکی، بارگذاری‌های الکترومغناطیسی و گرمایی، ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از کنترل‌گرهای مقاوم برای کنترل جریان و شکل پلاسمای در توکامک‌های ITER و TCV و نیز برخی توکامک‌های دیگر مثل D-III-D، JET، J-TEXT،

¹Single-Input Single-Output

²Proportional-Integral-Derivative (PID)

³Adaptive Control

⁴Robust Control

⁵Linear-Quadratic-Gaussian/ Loop-Transfer-Recovery



COMPASS-D و بسیاری دیگر بکار رفته که نتایج بهتری در مقایسه با عملکرد کنترل‌گرهای مرسوم PID بدست می‌دهد [۶-۱۰]. هدف ما در این مقاله پیشنهاد یک کنترل‌گر مقاوم برای کنترل موقعیت افقی پلازما و یکی برای کنترل جریان پلاسمایی و مقایسه آن‌ها با کنترل‌گرهای PID تنظیمی، برای استخراج کارآمدترین کنترل‌گر برای کنترل این پارامترهای پلاسمایی در توکامک IR-T1 می‌باشد. نمای از این توکامک در شکل (۱) آورده شده است.

شکل (۱) نمایی از توکامک IR-T1 و سیستم‌های اصلی آن.

روش کار :

کنترل موقعیت افقی و جریان پلاسمایی در توکامک IR-T1 بوسیله یک حلقه بسته پس‌خوراند، در برگیرنده منبع تغذیه کویل قائم (به منظور کنترل موقعیت افقی) و کویل اهمی (برای کنترل جریان) این توکامک، امکان‌پذیر است. یکی از وسیع‌ترین کنترل‌گرهای استفاده‌شده در طراحی سیستم‌های SISO در تجهیزات صنعتی، کنترل‌گر PID است. در مرحله نخست، دو کنترل‌گر پس‌خوراند PID از نوع SISO مستقل، یکی برای کنترل جریان پلاسمایی و دیگری برای کنترل موقعیت افقی پلاسمای طراحی می‌شود که برای هدف ما در اینجا تابع تبدیلی بصورت زیر خواهد داشت:

$$G_{PID,Position}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{1+T_f s} \quad ; \quad K_p = -4.9877 \times 10^{-10} \quad , \quad K_i = K_d = T_f = 0$$

$$G_{PID,Current}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{1+T_f s} \quad ; \quad K_p = 2.9248 \times 10^{-6}, K_i = K_d = T_f = 0 \quad (1)$$

توابع حاصل از طریق دستور pidtune در نرم‌افزار متلب و با توجه به نیازمندی‌های کنترلی خاص برای این توکامک، یعنی برای کنترل موقعیت افقی شامل پیگیری مقدار مرجع در یک میلی‌ثانیه با خطای یک درصد و برای کنترل جریان پلاسمایی شامل پیگیری مقدار مرجع در ۱۰ میلی‌ثانیه با خطای یک درصد حاصل شده است. از آنجایی که تابع تبدیل برای سیستم کلی توکامک IR-T1 به منظور کنترل موقعیت افقی (و نیز جریان پلاسمایی) حاصلضرب تابع تبدیل برای سیستم کویل قائم (و نیز کویل اهمی) در تابع تبدیل پاسخ پلاسمایی برای تغییرات موقعیت افقی پلاسمای (و نیز تغییرات جریان پلاسمایی) است، تابع تبدیل برای منبع تغذیه این دو کویل در این توکامک (گرچه غیرخطی است)، توسط یک فیلتر مرتبه اول، که تاخیر زمانی و پهنای باند منبع تغذیه این سیستم را تقریب می‌زند، حاصل می‌شود:

$$G_v(s) \cong K_v \frac{e^{-T_v s}}{s+a_v}, \quad K_v \cong 1, T_v = 100 \mu s;$$

$$G_o(s) \cong K_o \frac{e^{-T_o s}}{s+a_o}, \quad K_o \cong 1, T_o = 100 \mu s \quad (2)$$

که $(K_o), (T_o), (a_o)$ و $(K_v), (T_v), (a_v)$ به ترتیب بهره، تاخیر زمانی و کمیت مرتبط با پهنای باند برای منبع تغذیه کویل قائم (کویل اهمی) است که مقادیر آنها متناسب با نیازمندی‌های سیستم تعیین می‌شوند. مرحله آخر بدست‌آوردن تابع تبدیل پاسخ پلاسمایی برای تغییرات موقعیت افقی



پلازما (و نیز تغییرات جریان پلاسمایی) است. تابع تبدیل پاسخ پلاسمایی با استفاده از پاسخ خطی شده پلازما که توسط آریولا و پیرونتی^۷ ارائه شده است [۱۱]، استخراج می‌شود:

$$\delta \dot{x}_a = - \left(R_a + \frac{R_p L_{pa}^*}{L_p^*} \right) \left(L_a^* - \frac{L_{ap} L_{pa}^*}{L_p^*} \right)^{-1} \delta x_a + \left(L_a^* - \frac{L_{ap} L_{pa}^*}{L_p^*} \right)^{-1} \delta u \quad \left(\begin{matrix} \delta y \\ \delta I_p \end{matrix} \right) = \left(- \frac{C}{L_{pa}^* / L_p^*} \right) \delta x_a \quad (۳)$$

که در آن $B, L^*, u, y, C, \delta R$ ، به ترتیب انحراف خطی شده حول مقادیر اسمی، ماتریس مرتبط‌کننده حالت به خروجی، خروجی سیستم، ورودی سیستم، ماتریس القایش تصحیح‌شده [۱۱]، ماتریس واحد و ماتریس مقاومت برای مولفه‌های فعال، پلازما و غیرفعال می‌باشد. همچنین p و a مربوط به مولفه‌های فعال و پلازما بوده و I_p و x_a نیز جریان در مولفه فعال و جریان پلاسمایی می‌باشند. این معادلات برای منظور خاص ما در اینجا به شکل ساده بالا در آمده‌اند. تابع تبدیل پاسخ پلاسمایی، $G_p(s)$ ، با در نظر گرفتن پارامترهای مشخصه توکامک IR-T1 [۱۲]، در پایین، و روش معرفی شده در مرجع [۱۳]، محاسبه خواهد شد:

$$R_p = R_v = R_u = 45 \text{ cm}, r_p = 12.5 \text{ cm}, r_v = 5 \text{ cm}, r_u = 16 \text{ cm}, I_p = 30 \text{ kA}, I_v = 5 \text{ kA}, I_u = 12.5 \text{ kA}, \eta_p = 1 \text{ m}\Omega, \eta_v = 5 \Omega, \eta_u = 0.4 \text{ m}\Omega, \kappa = 1, \delta = 0, \beta_p = 1, l_i = 1$$

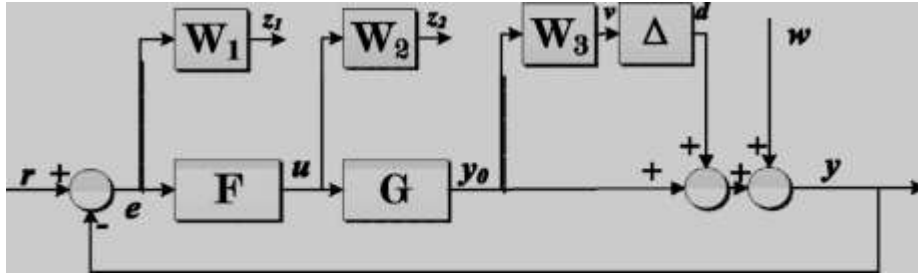
که در آن R_u, R_v, R_p به ترتیب شعاع پلاسمایی، شعاع محفظه خلا و شعاع کوئل مربوطه، r_u, r_v, r_p به ترتیب شعاع کوچک پلاسمایی، شعاع کوچک محفظه خلا و شعاع کوچک کوئل مربوطه، I_u, I_v, I_p به ترتیب جریان پلاسمایی، جریان در محفظه خلا و جریان در کوئل مربوطه، η_u, η_v, η_p به ترتیب مقاومت پلاسمایی، مقاومت در محفظه خلا و مقاومت در کوئل مربوطه و $\kappa, \delta, \beta_p, l_i$ به ترتیب کشیدگی، سه‌گوشی، بنای قطبی و القایش داخلی در این توکامک خواهد بود. با تعیین ضرایب مربوطه در رابطه (۳)، این تابع با استفاده از دستور $G_p(s) = ss(A, B, C, D)$ در نرم‌افزار متلب بدست می‌آید که در آن ss نشان‌دهنده تابع حالت-فضا، A ضریب δx_a ، B ضریب δu و $D = 0$ می‌باشد. با توجه به محاسبه تابع تبدیل سیستم کلی توکامک IR-T1 بصورت $G = G_{p,p}(s)G_v(s)$ ، برای کنترل موقعیت افقی پلازما و نیز $G = G_{p,c}(s)G_o(s)$ برای کنترل جریان پلاسمایی، حال می‌توانیم مبحث طراحی کنترل‌گر مقاوم برای کنترل این دو پارامتر پلاسمایی را مطرح کنیم. بلوک دیاگرام مربوط به ساختار تقویت‌شده برای طراحی کنترل‌گر مقاوم H_∞ نمایش داده شده در شکل (۲) شامل پارامترهای W_1, W_2, W_3 به عنوان توابع وزنی، w اختلال خروجی، u ورودی کنترلی و y خروجی سیستم و ورودی کنترل‌کننده می‌باشد. پارامتر $z = [z_1 \text{ و } z_2]^T$ برای تحلیل مقاوم بودن سیستم و v ، خروجی‌های موهومی برای بهینه‌سازی شاخص، به ساختار اضافه شده است. بلوک پایدار $\Delta(s)$ برای ارائه دینامیک مدل‌سازی نشده در سیستم معرفی شده است. تحلیل کنترل‌گر مقاوم $H_\infty, K(s)$ ، از طریق رهیافت حساسیت ترکیبی^۸ با بهینه‌سازی نرم H_∞ تابع تبدیل کامل از اختلال w به خروجی $[z^T \text{ و } v]^T$ صورت می‌گیرد، [۱۰]:

$$\min_{K(s) \text{ stabilizing}} \left\| \begin{pmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{pmatrix} \right\| = \min_{K(s) \text{ stabilizing}} \|\Phi(s)\|_\infty \quad (۴)$$

^۷M. Ariola

^۸A. Pironti

^۹Mixed Sensitivity



شکل (۲) سیستم تقویت شده با دینامیک مدل‌سازی نشده برای تحلیل مقاوم بودن.

بنا به تعریف، $S(s)$ با توانایی‌های ضدتداخلی^۱ و دنبال کردن سیستم به عنوان تابع حساسیت (خروجی) و $T(s)$ با عنوان تابع حساسیت مکمل (خروجی) با پایداری مقاوم سیستم در ارتباط بوده و چون $S(s) + T(s) = I$ لذا باید یک طراحی مناسب برای تحقق یک تعادل خوب بین این دو تابع را انتخاب کنیم [۱۴]. تابع هدف $\Phi(s)$ ، به همراه بقیه توابع بصورت زیر می‌باشند (I ماتریس یکه بوده و کنترل‌گر بهینه شده $K(s)$ باید بطور داخلی پایدار شود):

$$S(s) = [I + K(s)G(s)]^{-1}, \quad T(s) = I - S(s) = K(s)G(s)[I + K(s)G(s)]^{-1}$$

$$\Phi(s) = \begin{pmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{pmatrix} \quad (۵)$$

توابع وزنی W_1 ، W_2 و W_3 بسته به ویژگی‌های دلخواه کنترل‌گر بطور اختیاری انتخاب و برای بهنجار کردن مساله حساسیت ترکیبی به استاندارد مساله H_∞ یعنی $\|\Phi(s)\|_\infty < 1$ ، اضافه شده‌اند. در اینجا ساده‌ترین توابع وزنی با یک صفر و یک قطب بکار برده شده است. انتخاب توابع وزنی و پارامترهای آن‌ها در سیستم تقویت شده، توسط یک روش شناسی مبتنی بر آزمایش و خطای تکرارشونده انجام می‌گیرد [۱۵ و ۱۶]. این تکرار زمانی که عملکرد قابل قبول شود، متوقف می‌شود. با توجه به روش ارائه شده، توابع وزنی با عملکرد قابل قبول برای کنترل موقعیت افقی پلاسما بصورت زیر:

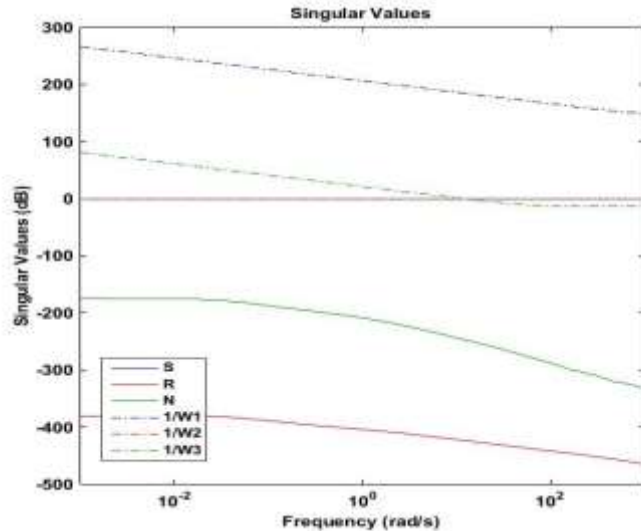
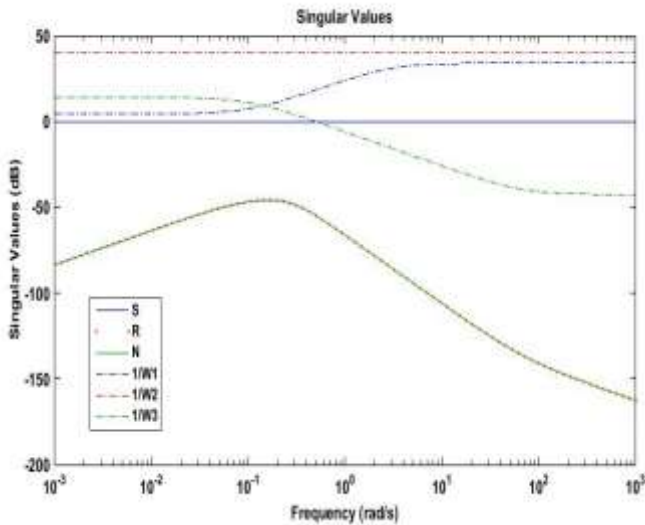
$$W_1(s) = \frac{0.20(s+3)}{(10s+1)}; \quad W_2(s) = 0.01; \quad W_3(s) = \frac{0.20(10s+1)}{(0.015s+1)}; \quad (۶)$$

و برای کنترل جریان پلاسمایی به شکل زیر بدست آمد:

$$W_1(s) = 5 \times 10^{-8} \frac{s}{(s+1000)}; \quad W_2(s) = 1; \quad W_3(s) = \frac{5s}{(s+55)}; \quad (۷)$$

چون نرم H_∞ تابع $\Phi(s)$ باید کوچکتر از یک باشد، لذا شروط زیر در طراحی باید برآورده شود که شکل (۳) تایید این شروط در طراحی ما برای کنترل موقعیت افقی و جریان پلاسمایی است (GAM کمینه نرم H_∞ می‌باشد):

^۱Anti-Interference



$$S < \frac{GAM}{W_1} \text{ و } T < \frac{GAM * G}{ss(W_2)}$$

(۸)

دیگرام بُد برای کنترل‌گرهای H_∞ و PID تنظیمی طراحی شده برای کنترل موقعیت افقی و جریان پلاسما و نیز نمودارهای گام مربوطه در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) آورده شده است.

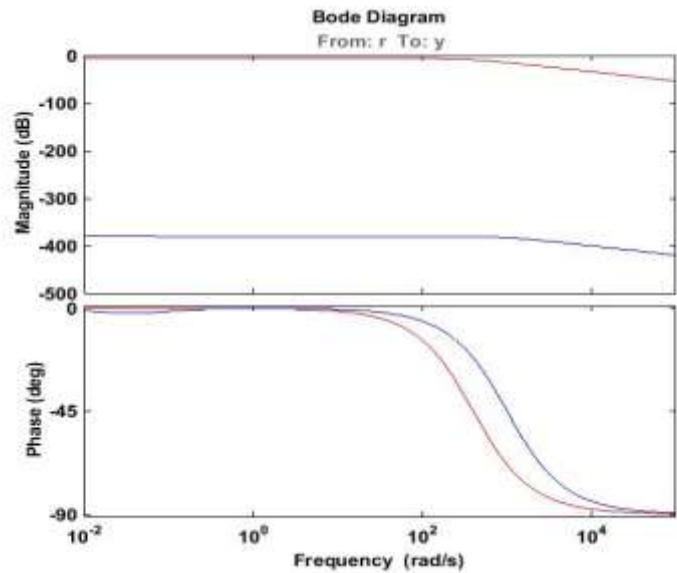
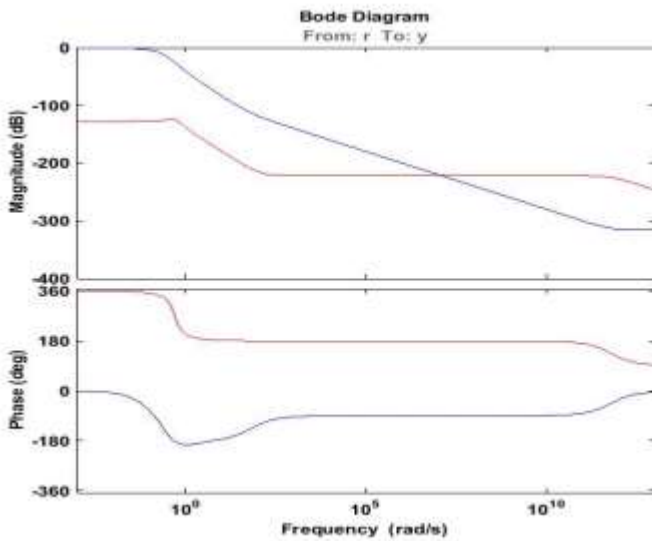
شکل (۳) شروط طراحی کنترل‌گر مقاوم برای کنترل موقعیت افقی (چپ) و کنترل جریان پلاسمایی (راست) در توکامک IR-T1.

نتایج :

نتایج حاصل در شکل‌های (۴) و (۵) نشان‌دهنده عملکرد بهتر کنترل‌گر مقاوم در کنترل موقعیت افقی پلاسما در مقابله با فراجش، دنبال کردن سریع سیگنال مرجع و کنترل مناسب ناپایداری و رفتار نوسانی نسبت به کنترل‌گر PID می‌باشد. اما در مورد کنترل‌گر مرتبط با کنترل جریان پلاسمایی، شکل‌های (۴) و (۶) برتری محسوسی در رفتار دو کنترل‌گر نشان نمی‌دهند بگونه‌ای که رفتار نسبتاً بهتری برای PID در یک محدوده زمانی و برای کنترل‌گر مقاوم در محدوده زمانی دیگری می‌بینیم.

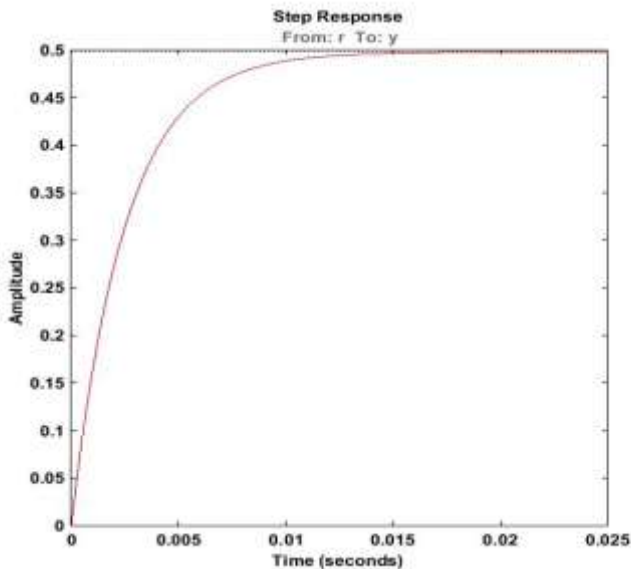
بحث و نتیجه‌گیری :

در این مقاله با استفاده از نظریه بهینه‌سازی H_∞ ، یک کنترل‌گر مقاوم برای کنترل موقعیت افقی و یکی برای جریان پلاسمایی در توکامک IR-T1 بر مبنای مدل خطی شده پاسخ پلاسمایی پیشنهاد شده و عملکرد، مقاوم بودن و ثبات سیستم با استفاده از کنترل‌گرهای H_∞ از نوع SISO

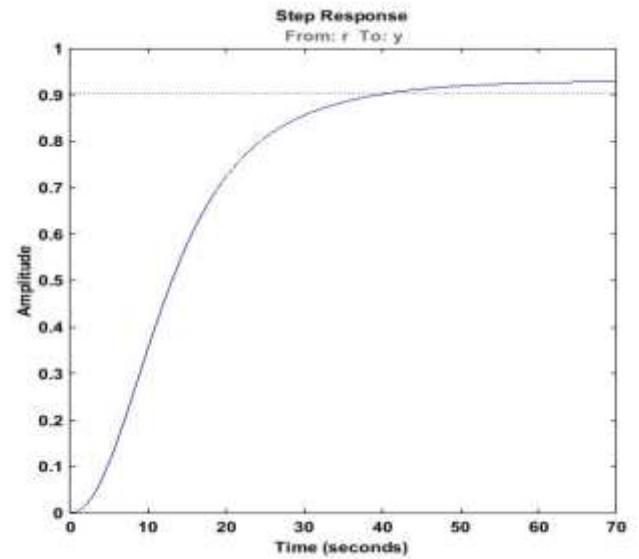
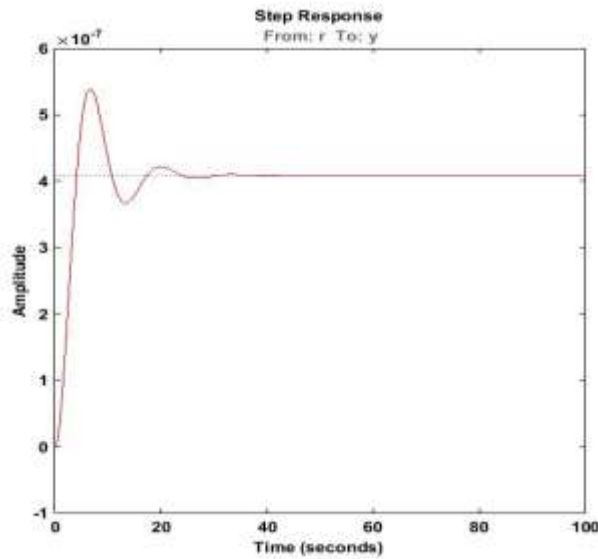


در مقایسه با کنترل گر PID تنظیمی مرسوم مورد مقایسه قرار

گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه بین عملکرد این دو کنترل گر با استفاده از شبیه ساز متلب، نشان دهنده مزیت بزرگ کنترل گر H_∞ مقاوم در کنترل موقعیت افقی پلاسمایی با مدل دارای عدم قطعیت و جلوگیری از تاثیر اختلالات در عملکرد کنترلی نسبت به کنترل گر PID مرسوم است. نتایج برای کنترل جریان پلاسمایی، نشان دهنده رفتار نسبتاً بهتر برای PID در یک محدوده زمانی و برای کنترل گر مقاوم در محدوده زمانی دیگر می باشد.



شکل (۴) دیاگرام بُد کنترل گر مقاوم و کنترل گر PID برای کنترل موقعیت افقی (چپ) و کنترل جریان پلاسمایی (راست) در توکامک IR-T1. (کنترل گر PID با رنگ قرمز در هر دو نمودار مشخص شده است).

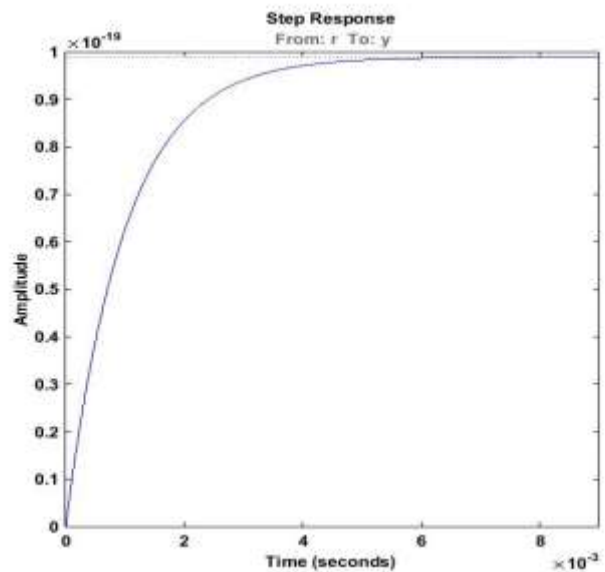


شکل (۵) نمودار گام برای کنترل موقعیت افقی پلازما با استفاده از کنترل گر PID (چپ) و کنترل گر مقاوم (راست) در توکامک IR-T1.

شکل (۶) نمودار گام برای کنترل جریان پلاسمایی با استفاده از کنترل گر PID (چپ) و کنترل گر مقاوم (راست) در توکامک IR-T1.

مراجع :

- [1] M. Parnichkun, C. Ngaechoenkul, Kinematics control of a pneumatic system by hybrid fuzzy PID, Journal of Mechatronics **11** (2001) 1001–1023.
- [2] L. Scibile and B. Kouvaritakis, Application of an adaptive algorithm to the control of the plasma vertical position, Fusion Technol. **36** (1999) 139–164.
- [3] Y. V. Mitrishkin, K. Kurachi, H. Kimura, Plasma multivariable robust control system design and simulation for a thermonuclear tokamak-reactor, International Journal of Control **76** (2003) 1358–1374.
- [4] J.C. Doyle, G. Stein, IEEE Trans. Autom. Control **AC-26** (1981) 4.
- [5] J.M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley, Reading, MA, (1989).
- [6] A. Portone, Y. Gribov, J. B. Lister, D. Ward, Control of the magnetic configuration in ITER, in: Proceedings of the 19th Symposium on Fusion Technology, Lisbon, Portugal, 1996, pp. 731–734.
- [7] P. Vyas, D. Mustafa, A. W. Morris, Vertical position control on COMPASS-D, Fusion Technology **33** (1998) 97–105.
- [8] M. Ariola, G. Ambrosino, A. Pironti, J. B. Lister, P. Vyas, Design and experimental testing of a robust multivariable controller on a tokamak, IEEE Transactions on Control Systems Technology **10** (2002) 646–653.





- [9] D. A. Humphreys, M. L. Walker, J. A. Leuer, J. R. Ferron, Initial implementation of a multivariable plasma shape and position controller on the DIII-D tokamak, in: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications, 2000, pp. 412–418.
- [10] W. Z. Yu, Z. P. Chen, G. Zhuang, Z. J. Wang, J-TEXT Team, Robust control design for the plasma horizontal position control on J-TEXT Tokamak, Fusion Eng. Design **88** (2013) 3021-3927.
- [11] M. Ariola, and A. Pironti, *Magnetic Control of Tokamak Plasmas*, Springer-Verlag, London, (2008).
- [12] M. Emami, M. Ghoranneviss and R. Tarkeshian, Comparative study of plasma position measurements using multipole moments and discrete magnetic probes methods on IR-T1 tokamak, Fusion Eng. Design **83**(2008) 684–688.
- [13] Y. Suzuki, H. Ninomiya, A. Ogata, A. Kameari, and H. Aikawa, Jpn. Journal of Appl. Physics **16**, 2237 (1977).
- [14] K. Zhou, J. Doyle, *Essential of Robust Control*, Prentice Hall Inc., New Jersey (1998).
- [15] G. Balas, J. Doyle, K. Glover, A. Packard, R. Smith, μ -Analysis and Synthesis Toolbox. Users Guide, The MathWorks Inc., Natick, MA, 1998.