



مطالعه کنترل موقعیت افقی پلازما در توکامک IR-T1 با استفاده از یک کنترل گر مقاوم پیشنهادی

نقی دخت، احمد*^(۱) - قرآن نویس، محمود^(۲)

^۱ دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، مرکز تحقیقات فیزیک پلازما

چکیده:

کنترل موقعیت پلازما، در هنگام تخلیه باری معمول یک توکامک، بسیار مهم است. با این حال، مدل پلازما در توکامک معمولاً دارای عدم قطعیت است، مانند عدم قطعیت ساختاری و دینامیک مدل‌سازی نشده. کنترل مقاوم، نظریه مناسب‌تر برای حل این مشکل در مقایسه با روش کنترل مرسوم PID است. در این مقاله، ما یک طرح کنترلی مقاوم H_∞ را برای کنترل موقعیت افقی پلازما در فاز مسطح توکامک IR-T1 پیشنهاد می‌دهیم. یک بررسی مقایسه‌ای بین کنترل گر بهینه‌ساز H_∞ و کنترل گر PID مرسوم برای این توکامک، بهبود قابل توجه عملکرد با کنترل گر مقاوم H_∞ نسبت به کنترل گر PID را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: توکامک IR-T1، موقعیت افقی پلازما، کنترل گر PID، کنترل گر مقاوم H_∞

Study of the Plasma Horizontal Position Control in IR-T1 Tokamak Using a Proposed Robust Controller

Naghidokht, Ahmad^{1*}; Ghoranneviss, Mahmood²

¹ Damghan University, School of physics

² Islamic Azad University, Science and Research Branch of Tehran, Plasma Physics Research Center

Abstract:

The plasma position control during routine discharge is very important for tokamak. However, the model of plasma in tokamak usually contains the uncertainty, such as structured uncertainties and unmodeled dynamics. Robust control theory is more suitable to handle this problem, compared with the traditional PID control approach. In this paper, we propose a H_∞ robust control scheme to control the horizontal position of plasma during the flat-top phase of discharge on IR-T1 tokamak. A comparison study between the optimized H_∞ robust controller and the traditional PID controller for this tokamak shows a significant improvement of the performance with respect to those obtained with traditional PID controller.

Keywords: IR-T1 Tokamak, Plasma Horizontal Position, PID Controller, H_∞ Robust Controller

مقدمه:

پلازما در توکامک بطور الزامی توسط مجموعه‌ای از کویل‌های میدان قطبی کنترل می‌شود که میدان‌های مغناطیسی تولیدی توسط آن‌ها برای تثبیت پلازما و جلوگیری از برخورد آن با محفظه توکامک، که منجر به تخریب سطح اجزای توکامک و نفوذ ذرات و در نتیجه از بین رفتن پلازما و فشار الکترومغناطیسی بالای متعاقب آن بر روی ساختارهای مغناطیسی



احاطه شده می‌شود، بکار می‌روند. برای این منظور و در طول حالت‌های مختلف تخلیه باری توکامک، کنترل دقیق موقعیت پلازما باید تضمین شود. توکامک‌های قدیمی بطور معمول از کنترل‌گرهای مرتبه پایین بر پایه ساختار^۱ PID استفاده می‌کنند که بر اساس مدل‌های ساده از سیستم‌های کنترلی خودتنظیم‌گر در حین کار توکامک طراحی می‌شوند. با این وجود، رفتار پلازما در میدان مغناطیسی برای توکامک‌های امروزی دارای عدم قطعیت فراوان می‌باشد که باعث نقص‌های عملکردی در آن‌ها می‌شود. امروزه روش‌های مختلفی برای حل این نوع مشکلات کنترلی وجود دارد که عموماً می‌تواند به دو گروه تقسیم شود: کنترل انطباقی^۲ [۱] و کنترل مقاوم^۳ [۲]. در سال‌های اخیر، کنترل مقاوم اثرات بسیار قدرتمندی بر بحث کنترلی داشته است و هنوز هم در سراسر جهان در حال توسعه است چراکه می‌تواند یک حاشیه ثبات بزرگ فراهم کند که قابلیت مقابله با انواع مختلفی از اختلالات و بخش‌های مدل‌سازی نشده، بدون تنظیم دوباره کنترل‌گر، را داراست. کنترل‌کننده‌های قوی برای کنترل جریان و شکل پلازما در توکامک ITER و نیز برخی توکامک‌های دیگر از جمله D-III-D، TCV، JET، J-TEXT، COMPASS-D و بسیاری دیگر بکار رفته که نتایج بهتری در مقایسه با عملکرد کنترل‌گرهای مرسوم PID بدست می‌دهد [۳-۷]. در این مقاله برآنیم تا با پیشنهاد یک کنترل‌گر مقاوم، کنترل موقعیت افقی پلازما در توکامک IR-T1 را بهبود ببخشیم.

روش کار:

در مرحله اول باید یک تابع تبدیل برای سیستم کلی توکامک IR-T1 به منظور کنترل موقعیت افقی آن بدست آوریم که حاصلضرب تابع تبدیل پاسخ پلاسمایی و تابع تبدیل برای سیستم کویل قائم، که وظیفه کنترل موقعیت افقی پلازما در این توکامک را بر عهده دارد، خواهد بود. تابع تبدیل پاسخ پلاسمایی با استفاده از پاسخ خطی شده پلازما که توسط آریولا^۴ و پیرونتی^۵ ارائه شده است [۸]، استخراج می‌شود:

$$\begin{aligned} \delta \dot{x}_a &= -\left(R_a + \frac{R_p L_{pa}^*}{L_p^{*2}}\right) \left(L_a^* - \frac{L_{ap} L_{pa}^*}{L_p^*}\right)^{-1} \delta x_a + \left(L_a^* - \frac{L_{ap} L_{pa}^*}{L_p^*}\right)^{-1} \delta u \\ \begin{pmatrix} \delta y \\ \delta I_p \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} C \\ -L_{pa}^*/L_p^* \end{pmatrix} \delta x_a \end{aligned} \quad (1)$$

^۱Proportional-Integral-Derivative (PID)

^۲Adaptive Control

^۳Robust Control

^۴M. Ariola

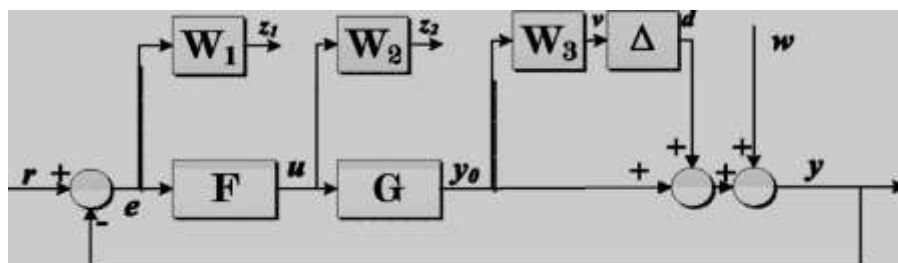
^۵A. Pironti



که در آن $B, L^*, u, y, C, \delta R$ ، به ترتیب انحراف خطی شده حول مقادیر اسمی، ماتریس مرتبط کننده حالت به خروجی، خروجی سیستم، ورودی سیستم، ماتریس القایش تصحیح شده [۸]، ماتریس واحد و ماتریس مقاومت برای مولفه‌های فعال، پلازما و غیرفعال می‌باشد. همچنین a و p مربوط به مولفه‌های فعال و پلازما بوده و x_a و I_p نیز جریان در مولفه فعال و جریان پلاسمایی می‌باشند. این معادلات برای منظور خاص ما در اینجا به شکل ساده بالا درآمده‌اند. تابع تبدیل پاسخ پلاسمایی، $G_p(s)$ ، با در نظر گرفتن پارامترهای مشخصه توکامک IR-T1 [۹] و روش معرفی شده در مرجع [۱۰]، محاسبه خواهد شد. تابع تبدیل برای سیستم کویل قائم در این توکامک نیز توسط یک فیلتر مرتبه اول، که تاخیر زمانی و پهنای باند منبع تغذیه این سیستم را تقریب می‌زند، حاصل می‌شود:

$$G_v(s) \cong K_v \frac{e^{-T_v s}}{s+a} ; K_v \approx 1 , T_v = 1 \mu s \quad (2)$$

که در آن K_v بهره، T_v تاخیر زمانی و a مرتبط با پهنای باند منبع تغذیه کویل قائم است و مقادیر آنها متناسب با نیازمندی‌های سیستم تعیین می‌شود. تغییرات جریان در کویل فعال (در اینجا همان کویل قائم)، $\delta x_a = \delta I_v$ ، به عنوان بردار حالت، تغییر در ولتاژ کویل قائم، $\delta u = \delta V$ ، به عنوان ورودی و تغییر در موقعیت افقی پلاسمای توکامک IR-T1 یعنی ΔR به عنوان خروجی سیستم منظور شده است. هر نوع تغییر در ولتاژ اسمی کویل قائم این توکامک (۳ کیلوولت) باعث تغییر در موقعیت افقی پلاسمای مربوطه می‌شود که اختلاف این تغییر موقعیت افقی با مقدار مرجع آن به عنوان خطا به سیستم کنترلی داده شده و یک سیگنال کنترلی برای جبران خطا خواهیم داشت. با بدست آوردن تابع تبدیل سیستم کلی توکامک IR-T1 بصورت $G = G_p(s)G_v(s)$ ، حال می‌توانیم به سراغ طراحی کنترل‌گر مقاوم برای کنترل موقعیت افقی پلازما در آن برویم. برای این منظور، بلوک دیاگرام مربوط به ساختار تقویت شده برای طراحی کنترل‌گر مقاوم H_∞ در شکل (۱) نمایش داده شده است که در آن، W_1, W_2, W_3 توابع وزنی، w اختلال خروجی، u ورودی کنترلی و y خروجی سیستم و ورودی کنترلی کننده است. برای تحلیل مقاوم بودن سیستم، $\mathbf{z} = [z_1 \text{ و } z_2]^T$ و v ، خروجی‌های موهومی برای بهینه سازی شاخص، به ساختار اضافه شده است. بلوک پایدار $\Delta(s)$ برای ارائه دینامیک مدل سازی نشده در سیستم معرفی شده است.



شکل (۱) سیستم تقویت شده با دینامیک مدل سازی نشده برای تحلیل مقاوم بودن.



تحلیل کنترل‌گر مقاوم H_∞ ، منظور F_s ، از طریق رهیافت حساسیت ترکیبی^۱ که با بهینه‌سازی نرم H_∞ تابع تبدیل کامل از اختلال w به خروجی $[z^T \text{ و } v]^T$ انجام می‌شود، صورت خواهد گرفت [۷]:

$$\min_{F(s) \text{ stabilizing}} \left\| \begin{pmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)F(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{pmatrix} \right\| = \min_{F(s) \text{ stabilizing}} \|\Phi(s)\|_\infty \quad (۳)$$

که در آن $S(s)$ تابع حساسیت (خروجی)، $T(s)$ تابع حساسیت مکمل (خروجی) و تابع هدف $\Phi(s)$ ، بصورت زیر تعریف می‌شوند (I ماتریس یک‌ه بوده و کنترل‌گر بهینه‌شده $F(s)$ باید بطور داخلی پایدار شود):

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

$$\Phi(s) = \begin{pmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)F(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{pmatrix} \quad (۴)$$

بنابه تعریف، $S(s)$ با توانایی‌های ضدتداخلی^۲ و دنبال‌کردن^۳ سیستم مرتبط بوده و $T(s)$ با پایداری مقاوم سیستم در ارتباط می‌باشد. همچنین $S(s) + T(s) = I$ بنابراین ما باید یک طراحی مناسب برای تحقق بخشیدن به یک تعادل خوب بین این دو تابع را انتخاب کنیم [۱۱]. از این جهت، ما این مسئله را حساسیت ترکیبی می‌نامیم. اضافه‌کردن توابع وزنی W_1, W_2, W_3 برای بهنجارکردن مساله حساسیت ترکیبی به استاندارد مساله H_∞ یعنی $\|\Phi(s)\|_\infty < 1$ می‌باشد. با توجه به عدم وجود قانون خاص در مورد چگونگی انتخاب توابع وزنی و پارامترهای آن‌ها در سیستم تقویت‌شده، این مشکل می‌تواند به شیوه‌ای عملی بر اساس یک روش‌شناسی مبتنی بر آزمایش و خطای تکرار شونده مورد بررسی قرار گیرد [۱۲]. هر یک از تکرارها باید شامل این مراحل باشد. مرحله ۱: تنظیم پارامترهای وزن اولیه برپایه ویژگی‌های فرکانسی سیستم. مرحله ۲: تحلیل کنترل‌گر مقاوم H_∞ با استفاده از دستورات متلب^۴ (الگوریتم‌های مرتبط) [۱۳]. مرحله ۳: شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته با کنترل‌گر ساخته شده در یک اختلال جزئی در نقطه سناریوی اسمی با استفاده از تجزیه و تحلیل محدوده زمانی (مانند پاسخ گام). این تکرار زمانی که عملکرد قابل قبول شود، متوقف می‌شود. با توجه به روش کار ارائه شده، توابع وزنی موردنظر با عملکرد قابل قبول، بصورت زیر بدست آمد:

$$W_1(s) = \frac{0.004s+0.2}{5s+1}, \quad W_2(s) = 0.01, \quad W_3(s) = \frac{0.6s+0.2}{0.025s+1} \quad (۵)$$

با توجه به اینکه نرم H_∞ تابع $\Phi(s)$ باید کوچکتر از یک باشد، لذا شروط زیر در طراحی باید برآورده شود که شکل (۲) این شروط را در طراحی ما تایید می‌کند (که در آن GAM کمینه نرم H_∞ می‌باشد):

^۱Mixed Sensitivity

^۲Anti-Interference

^۳Tracking

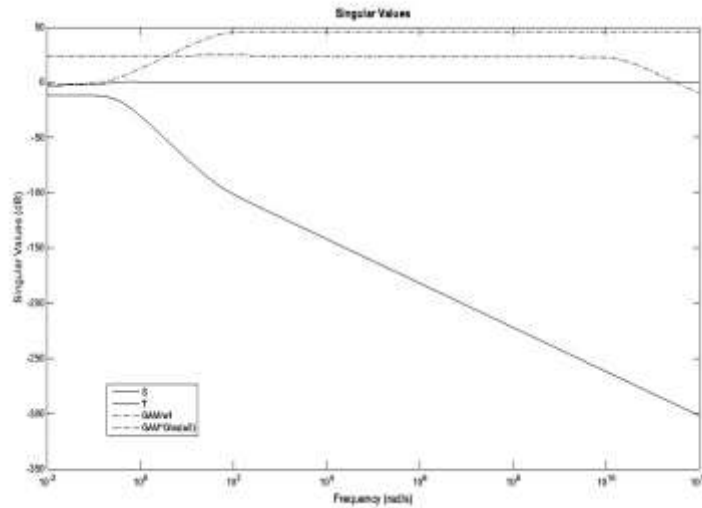
^۴Matlab



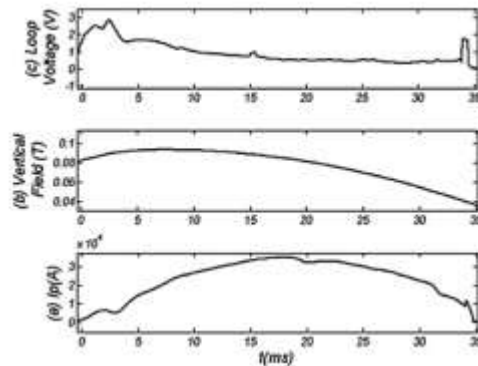
$$S < \frac{GAM}{W_1} \text{ و } T < \frac{GAM * G}{ss(W_2)} \quad (6)$$

برای تحلیل عملکرد کنترل گر مقاوم H_∞ محاسبه کرده در کنترل موقعیت افقی پلاسما، مقایسه‌ای با کنترل گر PID مرسوم برای توکامک IR-T1 (یک سیستم قدیمی PID بر روی توکامک IR-T1 نصب بوده که البته در حال حاضر از کار افتاده است) انجام داده‌ایم. تخلیه نوعی برای این توکامک در شکل (۳) نشان داده شده است. تابع تبدیل PID بکاررفته در اینجا از طریق دستور `sysstune` در نرم افزار متلب و بادر نظر گرفتن نیازمندی‌های کنترلی خاص برای این توکامک (پیگیری مقدار مرجع در یک میلی ثانیه، دفع اختلالات در یک میکروثانیه) بصورت زیر حاصل شده است:

$$G_{PID}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{1+T_f s} ; K_p = 0 , K_i = 0.001 , K_d = 0 \text{ \& } T_f = 1 \quad (7)$$



شکل (۲) شروط طراحی کنترل گر مقاوم.



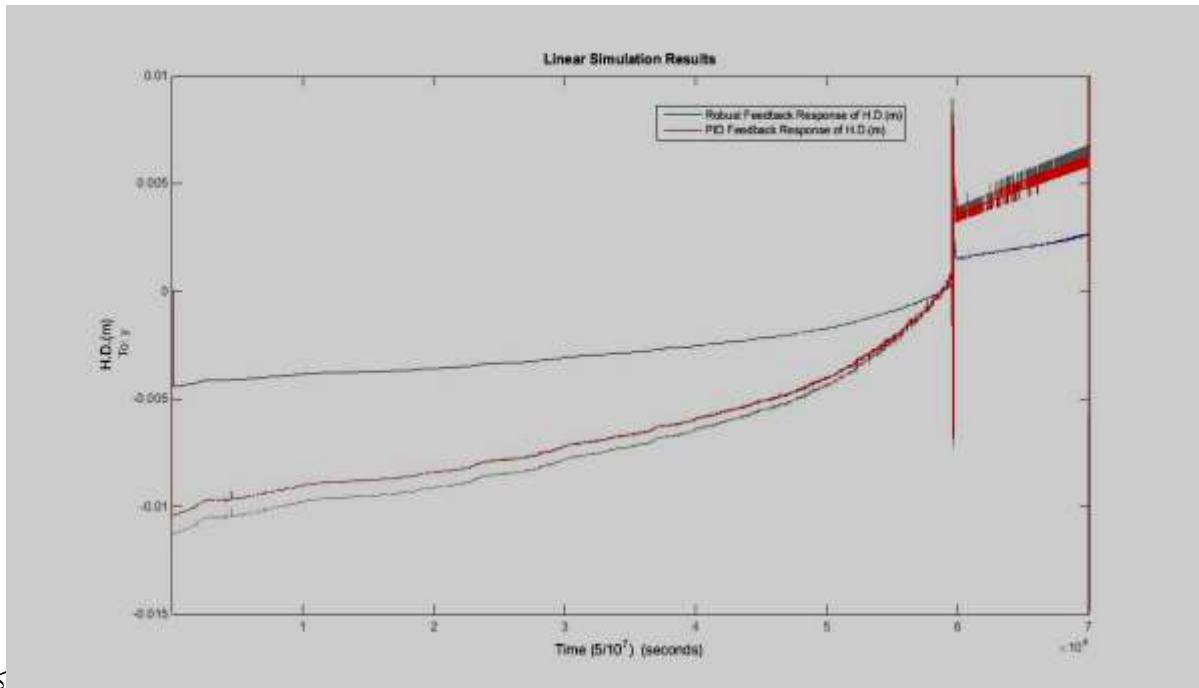
شکل (۳) جریان پلاسمایی (پایین)، میدان قائم (وسط) و ولتاژ حلقه (بالا) برای توکامک IR-T1.



با در نظر گرفتن مقدار عملکردی ولتاژ کویل قائم این توکامک، ۳ کیلوولت، با تغییر مقادیر این ولتاژ به $2/8$ و $3/25$ کیلوولت رفتار این دو کنترل گر را در شکل های ۴، ۵ و ۶ نشان داده ایم. کل بازه زمانی تخلیه باری ۳۵ میلی ثانیه می باشد.

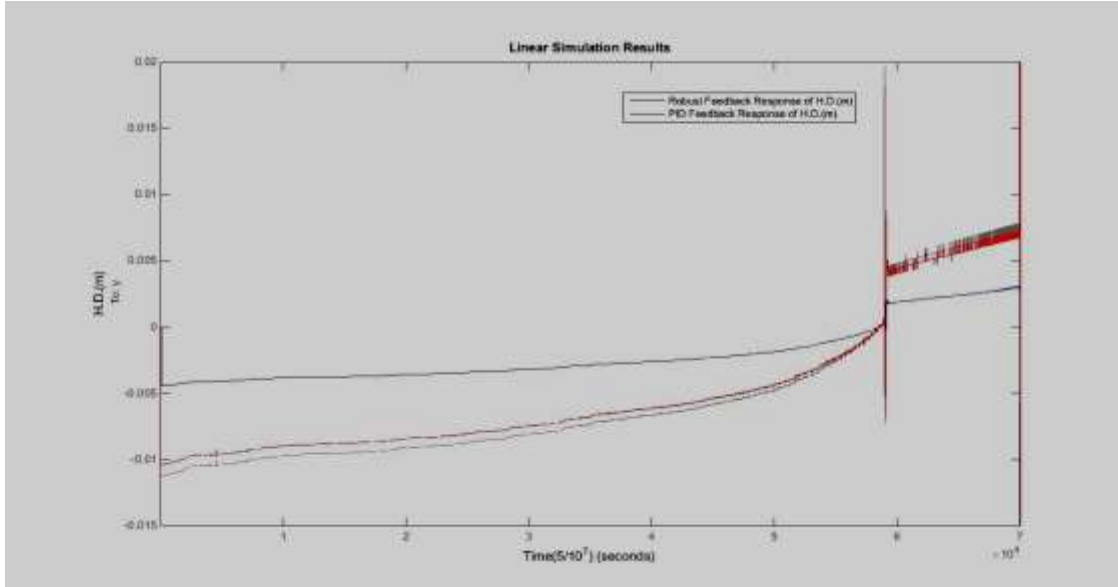
نتایج:

نتایج حاصل در شکل های ۴، ۵ و ۶ بطور واضح نشان دهنده عملکرد بهتر کنترل گر مقاوم در مقابله با اثر اختلالات و نیز دنبال کردن سریع سیگنال مرجع نسبت به کنترل گر PID می باشد. همچنین در بخش های پایانی تخلیه باری که درهم ریختگی و رفتار نوسانی شدیدی رخ می دهد، برخلاف کنترل گر PID که هیچ گونه کنترلی بر این رفتار ندارد، کنترل گر مقاوم تا حد بسیار زیادی این ناپایداری و رفتار نوسانی را کنترل می کند که نشان از عملکرد عالی این کنترل گر می باشد.

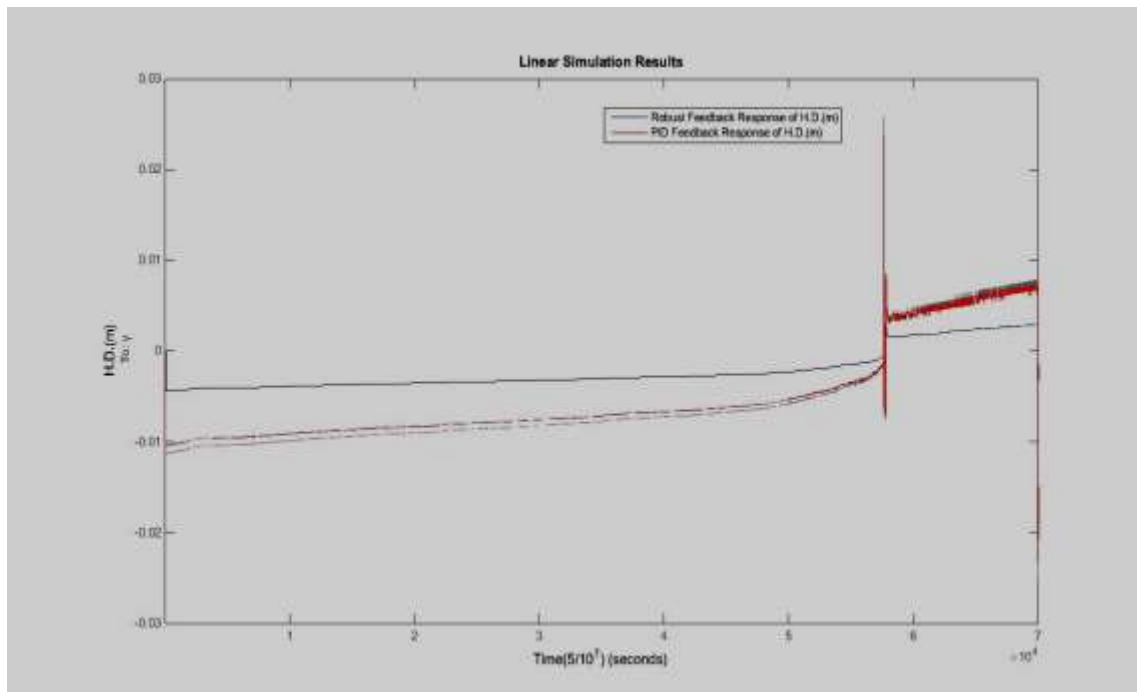


که

شکل (۴) پاسخ فیدبک مقاوم و PID (به همراه خود پروفایل موقعیت افقی پلاسما) برای کنترل موقعیت افقی پلاسما با ولتاژ کویل قائم $2/8$ کیلوولت.



شکل (۵) پاسخ فیدبک مقاوم و PID (به همراه خود پروفایل موقعیت افقی پلاسما) برای کنترل موقعیت افقی پلاسما با ولتاژ کویل قائم ۳ کیلوولت.



شکل (۶) پاسخ فیدبک مقاوم و PID (به همراه خود پروفایل موقعیت افقی پلاسما) برای کنترل موقعیت افقی پلاسما با ولتاژ کویل قائم ۳/۲۵ کیلوولت.



بحث و نتیجه‌گیری:

در این مقاله، ما با استفاده از نظریه بهینه‌سازی H_∞ ، یک کنترل‌گر مقاوم برای کنترل موقعیت افقی پلازما در توکامک IR-T1 بر مبنای مدل خطی شده پاسخ پلاسمایی و با هدف بهبود مقاوم‌بودن و ثبات سیستم در مقایسه با کنترل‌گر PID مرسوم پیشنهاد دادیم. برخلاف کنترل‌گر PID مرسوم که در طی عملکرد توکامک نیاز به یک تنظیم خوب دارد، کنترل‌گر H_∞ مقاوم، عملکرد و پایداری مقاوم عالی را بدون طراحی مجدد تضمین می‌کند. نتایج حاصل از مقایسه بین عملکرد این دو کنترل‌گر با استفاده از شبیه‌ساز متلب، نشان‌دهنده مزیت بزرگ کنترل‌گر H_∞ مقاوم در کنترل مدل با عدم قطعیت و جلوگیری از تاثیر اختلالات در عملکرد کنترلی نسبت به کنترل‌گر PID مرسوم است. همچنین کنترل‌گر H_∞ مقاوم درجه آزادی بیشتری در مقایسه با کنترل‌گر PID دارد که امکان یافتن بهترین پارامتر برای این کنترل‌گر H_∞ را فراهم می‌آورد.

خلاصه انگلیسی:

مراجع:

- [1] L. Scibile and B. Kouvaritakis, Application of an adaptive algorithm to the control of the plasma vertical position, *Fusion Technol.* **36** (1999) 139–164.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] P. Vyas, D. Mustafa, A. W. Morris, Vertical position control on COMPASS-D, *Fusion Technology* **33** (1998) 97–105.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Ariola, and A. Pironti, *Magnetic Control of Tokamak Plasmas*, Springer-Verlag, London, (2008).
- [9] 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.
- [10] Y. Suzuki, H. Ninomiya, A. Ogata, A. Kameari, and H. Aikawa, *Jpn. Journal of Appl. Physics* **16**, 2237 (1977).
- [11] K. Zhou, J. Doyle, *Essential of Robust Control*, Prentice Hall Inc., New Jersey (1998).
- [12] 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.



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۲۰۱ اسفندماه ۱۳۹۲ - دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)



[13] G. Balas, J. Doyle, K. Glover, A. Packard, R. Smith, μ -Analysis and Synthesis Toolbox. Users Guide, The MathWorks Inc., Natick, MA, 1998.