

کنترل تطبیقی فیدبک حالت غیر خطی برای سطح توان راکتورهای آبی تحت فشار

عظیمی، صابر^(۱) - ایوبیان، نوید*^(۱) - کوفی‌گر، حمیدرضا^(۲)

^(۱) دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

^(۲) دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق

چکیده:

در این مقاله یک کنترل‌کننده غیرخطی سطح توان برای قلب راکتورهای آب تحت فشار ارائه می‌شود که در آن کنترل‌کننده در برابر عدم قطعیت‌های مختلف سیستم، تطبیقی است. مدل غیرخطی استفاده‌شده، مدل سینتیک نقطه‌ای راکتور به همراه فیدبک‌های دمایی و معادلات سموم زینان و ید است؛ و کنترل‌کننده طراحی شده به این مدل دارای عدم قطعیت اعمال می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این کنترل‌کننده در کاهش دادن اثر عدم قطعیت‌های اعمالی است.

کلمات کلیدی: کنترل‌کننده تطبیقی غیر خطی، مدل سینتیک نقطه‌ای، راکتور آبی تحت فشار

مقدمه:

حصول اطمینان از عملکرد ایمن و مؤثر قلب راکتور یک پیش‌شرط در توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای به شمار می‌رود. از نظر کنترل راکتور، اعمال کنترل مطلوب برای یک قلب در نیروگاه هسته‌ای یک اقدام مهم برای بهبود ایمنی و اثر قلب است. کنترل تطبیقی در دنیای امروز یک استراتژی طبیعی برای پایداری و ردگیری چنین سیستم‌های دینامیکی نامطمئن است. خواجه‌ای و دوستانش [۱] یک سیستم کنترل عصبی توان راکتور را پیشنهاد کردند که تمام ضرایب کنترل‌کننده شبکه عصبی با پیشنهاد نمودن پاسخ یک رگولاتور خودتنظیم بهینه مقاوم بعنوان مسیر مرجع تعیین می‌شدند. همچنین کنترل‌کننده هوشمند جدیدی با معرفی یادگیری احساسی توسط خرم آبادی و همکارش [۲] برای تنظیم توان قلب مطرح شد. الیاسی و دوستان [۳] سیستم کنترل توان را در جملاتی از کنترل پیش‌بین طراحی کردند، به‌طوری‌که نوسانات زینان و سرعت میله کنترل با وجود عدم قطعیت و اغتشاشات کراندار در محدوده قابل قبول قرار گیرند. انصاری فر و همکارانش [۴-۸] کنترل مد لغزشی را با معرفی یک رویکرد مد لغزشی برای سیستم کنترل توان PWR و کنترل نوسانات محوری توان و تعقیب بار راکتور در حضور عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات کراندار به-کار گرفتند. رویکرد کنترلی فیزیک-مبنا با یک رویکرد توسط دونگ و دوستانش در سری مقالات [۹-۱۳] برای طراحی سیستم‌های کنترل فیدبک-خروجی یا فیدبک-حالت به‌منظور سطح توان راکتورهای گازی توسعه و استفاده شد. در این تحقیق، با هدف کنترل سطح توان راکتورهای هسته‌ای و با الهام از مقاله آقای دونگ [۹]، یک کنترل

تطبیقی غیرخطی بر اساس مدل سینتیک نقطه ای راکتور و با در نظر گرفتن فیدبک‌های دمایی سوخت و خنک کننده و اثرات سموم جاذب نوترون با معیارهای پایداری تابع لیاپانوف برای راکتور آب تحت فشار طراحی و شبیه‌سازی شده است.

روش کار:

با استفاده از تغییر متغیر (۱) معادلات فضای حالت را بازنویسی می‌کنیم.

$$\delta x_n = x_n - x_{n0} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، δx_n بیانگر اختلاف حالت n ام از مقدار تعادلی اش یعنی x_{n0} است. با توجه به این رابطه، معادلات غیرخطی راکتور به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta \dot{n}_r = \frac{-\beta}{L} (\delta n_r - \delta c_r) + \frac{(n_{r0} + \delta n_r)}{L} (\alpha_f \delta T_f + \alpha_c \delta T_c - \frac{\sigma_a^x}{\Sigma_f} \delta X + \delta \rho_r) \\ \delta \dot{c}_r = \lambda (\delta n_r - \delta c_r) \\ \delta \dot{T}_f = \frac{1}{m_f c_f} (f_f P_0 \delta n_r - hA (\delta T_f - \delta T_c)) \\ \delta \dot{T}_c = \frac{1}{m_c c_c} [(1-f_f) P_0 \delta n_r + hA (\delta T_f - \delta T_c) - 2\dot{m} c_c \delta T_c] \\ \delta \dot{X} = \gamma_x \Sigma_f B \delta n_r - \sigma_a^x B (X_0 \delta n_r + n_{r0} \delta X + \delta n_r \delta X) + \lambda_I \delta I - \lambda_x \delta X \\ \delta \dot{I} = \gamma_I \Sigma_f B \delta n_r - \lambda_I \delta I \\ \delta \dot{\rho}_r = G_r Z_r \end{array} \right. \quad (1)$$

در این دسته معادلات، برخی از پارامترهای فیزیکی مثل β و L نمی‌توانند به صورت دقیق به دست آیند. برخی دیگر از پارامترها نیز به توان وابسته‌اند. این عوامل و برخی دیگر از عوامل بیرونی مثل دینامیک‌های مدل نشده باعث بروز عدم قطعیت‌هایی در سیستم می‌شوند. با استفاده از مجموعه معادلات (۲)، مدل فضای حالت راکتور به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = f(x) + g(x)\zeta + \sigma \\ \dot{\zeta} = u \end{array} \right. \quad (3)$$

که در آن:

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [\delta n_r, \delta c_r, \delta T_f, \delta T_c, \delta X, \delta I]^T \quad (4)$$

$$\zeta = \delta \rho_r \quad (5)$$

$$u = G_r Z_r \quad (6)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{-\beta}{L}(x_1 - x_2) + \frac{(n_{r0} + x_1)}{L}(\alpha_f x_3 + \alpha_c x_4 - \frac{\sigma_a^x}{\Sigma_f} x_5) \\ \lambda(x_1 - x_2) \\ \frac{1}{m_f c_f}(f_f P_0 x_1 - hA(x_3 - x_4)) \\ \frac{1}{m_c c_c}[(1 - f_f)P_0 x_1 + hA(x_3 - x_4) - 2\dot{m}c_c x_4] \\ \gamma_x \Sigma_f B x_1 - \sigma_a^x B(X_0 x_1 + n_{r0} x_5 + x_1 x_5) + \lambda_7 x_6 - \lambda_x x_5 \\ \gamma_f \Sigma_f B x_1 - \lambda_7 x_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$g(x) = \left[\frac{n_{r0} + x_1}{L}, O_{1 \times 5} \right]^T \quad (8)$$

$$\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6]^T \quad (9)$$

که $\sigma \in R^6$ بیانگر بردار عدم قطعیت است. x و ζ_r هر دو حالت‌های سیستم هستند و u ورودی کنترل است. کنترل‌کننده تطبیقی فیدبک حالت غیرخطی سطح توان: در این قسمت ابتدا یک قانون کنترل برای پایدار کردن زیرسیستم زیر پیشنهاد داده می‌شود:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)\zeta_r + \sigma \quad (10)$$

به این منظور قضیه زیر به اثبات می‌رسد.

قضیه ۱: یک راکتور PWR در حالت کار با توان عادی در نظر بگیرید و نیز فرض کنید تغییرات عدم قطعیت‌های سیستم به آرامی صورت بگیرد. تعریف می‌کنیم:

$$\zeta_r = -\frac{k_a x_1 + k_b x_3 + k_c x_4}{n_{r0} + x_1} - \frac{k_d x_3^2}{(n_{r0} + x_1)x_1} - \frac{1}{(n_{r0} + x_1)} \omega^T \Gamma \hat{\theta} \quad (11)$$

$$\omega = [1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \quad (12)$$

$$\Gamma = \text{diag}([Lk_1, \frac{\beta}{\lambda} k_2, \mu_f (\frac{k_b - n_{r0}\alpha_f}{f_f P_0}) k_3, \mu_c (\frac{k_c - n_{r0}\alpha_c}{(1-f_f)P_0}) k_4, k_5, k_6]) \quad (13)$$

$$\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3, \hat{\theta}_4, \hat{\theta}_5, \hat{\theta}_6]^T \quad (14)$$

اعداد اسکالر مثبت k_a, k_b, k_c, k_d گین‌های فیدبک هستند که انتخاب می‌شوند. $\hat{\theta}_i (i = 1, \dots, 6)$ از طریق قانون تطبیق زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\hat{\theta}} = Q^{-1} \phi(x) \quad (15)$$

که در آن:

$$\phi(x) = [x_1, x_1 x_2, x_1 x_3, x_1 x_4, x_1 x_5, x_1 x_6]^T \quad (16)$$

$$Q = \text{diag}([q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]), q_i > 0, (i = 1, \dots, 6) \quad (17)$$

کنترلر تطبیقی (۱۱) پایداری حلقه بسته مجانبی فراگیر را فراهم می‌کند اگر شرایط زیر تامین گردد:

$$\frac{(k_c - n_{r0}\alpha_c)f_f}{(k_b - n_{r0}\alpha_f)(1-f_f)} = 1 \quad (18)$$

با توجه به اینکه انتخاب ضرایب k_b و k_c به عهده طراح است بنابراین می‌توان این شرط را تامین کرد. همچنین باید مقدار زیر مثبت باشد:

$$k_a' = k_a - \frac{P_0\alpha_c(1-f_f)}{8(k_c - n_{r0}\alpha_c)\dot{m}c_c} r_1^2 - \frac{\alpha_f^2}{2k_d} r_1^2 - \frac{\gamma_I^2 \Sigma_f^2 B^2}{2\lambda_I} - \frac{(\sigma_a^x)^2 r_1^2}{2\Sigma_f^2 (\lambda_x - \frac{\lambda_I}{2})} - \frac{(\gamma_x \Sigma_f B - \sigma_a^x B X_0 - n_{r0} \frac{\sigma_a^x}{\Sigma_f})^2}{2(\lambda_x - \frac{\lambda_I}{2})} \quad (19)$$

اثبات: برای اثبات پایدار بودن زیرسیستم با ورودی کنترل مطرح شده در صورت قضیه از تابع لیپانوف به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$V_1(x, \tilde{\theta}) = \frac{L}{2} x_1^2 + \frac{\beta}{2\lambda} x_2^2 + \left(\frac{k_b - n_{r0}\alpha_f}{f_f P_0}\right) \frac{\mu_f}{2} x_3^2 + \left(\frac{k_c - n_{r0}\alpha_c}{(1-f_f)P_0}\right) \frac{\mu_c}{2} x_4^2 + \frac{x_5^2}{2} + \frac{x_6^2}{2} + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \tilde{\Gamma} \tilde{\theta} \quad (20)$$

با مشتق گرفتن از رابطه (۲۰) و جایگذاری روابط موجود در قضیه و ساده‌سازی، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -\beta(x_1 - x_2)^2 - \frac{hA(k_b - n_{r0}\alpha_f)}{f_f P_0} (x_3 - x_4)^2 \\ & - \frac{(k_c - n_{r0}\alpha_c)}{P_0} \left[\frac{2\dot{m}c_c}{(1-f_f)} (x_4 - \frac{P_0\alpha_c(1-f_f)}{4(k_c - n_{r0}\alpha_c)\dot{m}c_c} x_1^2)^2 \right] \\ & - \frac{k_d}{2} x_3^2 - \frac{\lambda_I}{2} (x_6 - \frac{\gamma_I \Sigma_f B}{\lambda_I} x_1)^2 - \frac{\lambda_I}{2} (x_6 - x_5)^2 - \frac{k_d}{2} (x_3 - \frac{\alpha_f}{k_d} x_1^2)^2 \\ & - \frac{(\lambda_x - \frac{\lambda_I}{2})}{2} (x_5 - \frac{\sigma_a^x}{\Sigma_f (\lambda_x - \frac{\lambda_I}{2})} x_1^2)^2 - \sigma_a^x B (n_{r0} + x_1) x_5^2 - k_a' x_1^2 \\ & - \frac{(\lambda_x - \frac{\lambda_I}{2})}{2} (x_5 - \frac{(\gamma_x \Sigma_f B - \sigma_a^x B X_0 - n_{r0} \frac{\sigma_a^x}{\Sigma_f})}{(\lambda_x - \frac{\lambda_I}{2})} x_1)^2 + \tilde{\theta}^T \Gamma (\phi + Q \tilde{\theta}) \end{aligned} \quad (21)$$

با استفاده از فرض (۱۸) و جایگذاری رابطه (۱۵) در (۲۱) منفی بودن مشتق تابع لیپانوف و در نتیجه پایداری کنترل‌کننده به اثبات می‌رسد.

قضیه ۲: ورودی کنترل

$$u = \zeta_r - k_{\zeta} e_{\zeta} \quad (22)$$

که در آن k_{ζ} ورودی کنترل مجازی است که در (۱۱) تعیین شد و اسکالر مثبت k_{ζ} گین فیدبک است و نیز:

$$e_{\zeta} = \zeta - \zeta_r \quad (23)$$

این ورودی کنترل پایداری حلقه بسته مجانبی فراگیر را برای سیستم (۳) فراهم می‌کند در صورتی که \bar{k}_{ζ} مثبت باشد:

$$\bar{k}_\zeta = k_\zeta - \frac{b}{2k_a'} \quad (24)$$

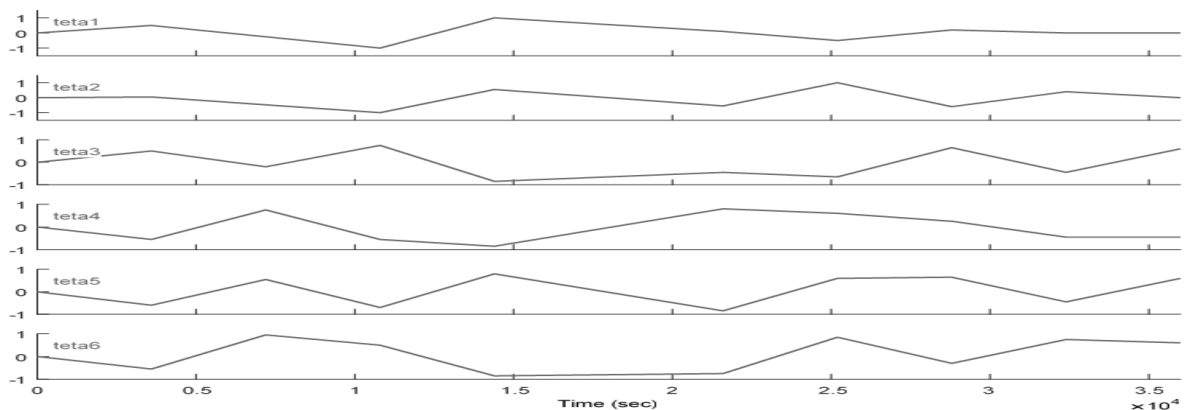
اثبات: برای نشان دادن پایداری این کنترل کننده نیز از یک تابع لیاپانوف به شکل زیر استفاده می‌کنیم:

$$V_2 = V_1(x, \tilde{\theta}) + \frac{1}{2} e_\zeta^2 \quad (25)$$

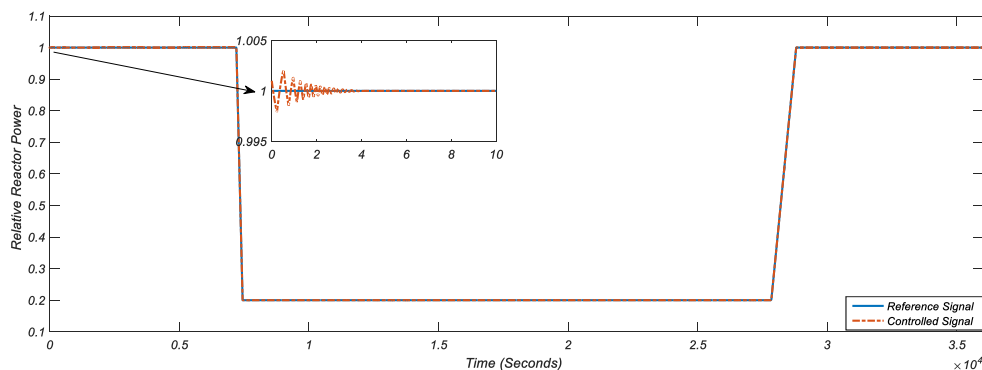
با مشتق گرفتن از این رابطه و استفاده از روابط (۲۲) تا (۲۴) پایداری کنترل کننده کل سیستم نیز به اثبات می‌رسد.

نتایج:

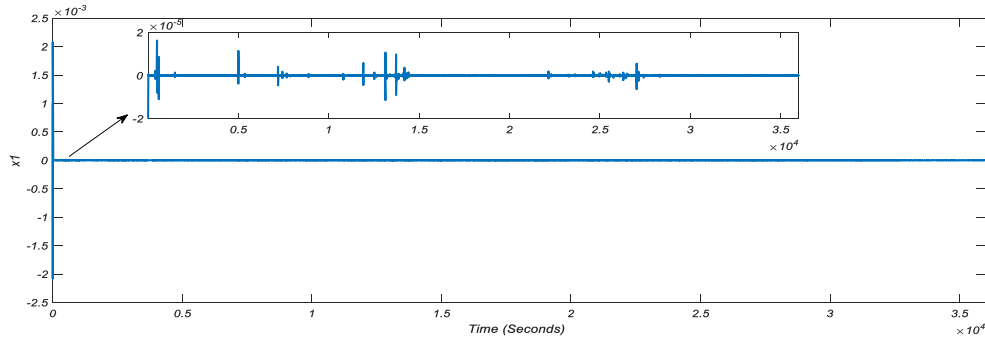
کنترل کننده طراحی شده برای تغییر توان $100\% \rightarrow 20\% \rightarrow 100\%$ در طی زمان ۱۰ ساعت شبیه‌سازی گردید. تغییر توان با نرخ $\frac{10\%}{\text{min}}$ صورت گرفت. دلیل انتخاب زمان شبیه‌سازی طولانی ۱۰ ساعت، بررسی عدم واگرایی حالت‌ها در زمان وسیع و پایداری سیستم در حالت بروز اثرات سموم است. برای بررسی کارکرد بخش تطبیقی کنترل کننده، بردار عدم قطعیت به صورت سیگنال‌هایی اختیاری که دامنه تغییرات آن‌ها در بازه -1 تا 1 تغییر می‌کنند انتخاب شدند (شکل ۱). در شکل ۲ سیگنال مرجع به همراه سیگنال ردگیری شده آن قابل مشاهده است. نمودار تغییرات مربوط به حالت‌های سیستم در شکل‌های ۳ تا ۸ آورده شده‌اند.



شکل ۱: بردارهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده برای مدت زمان ۱۰ ساعت



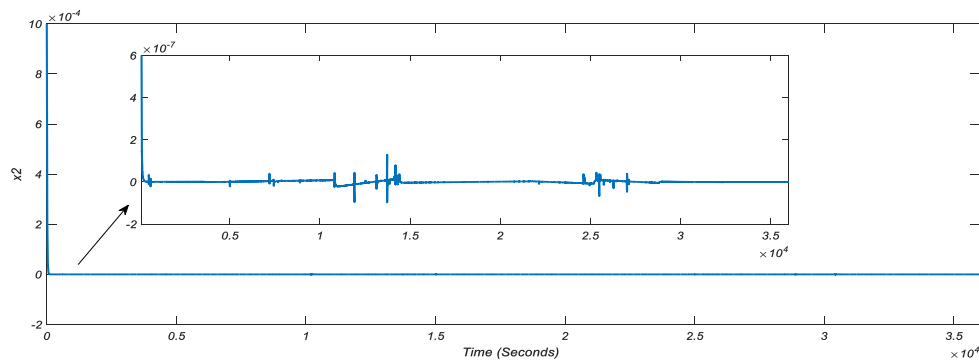
شکل ۲: نمودار توان نسبی راکتور با وجود بردار عدم قطعیت



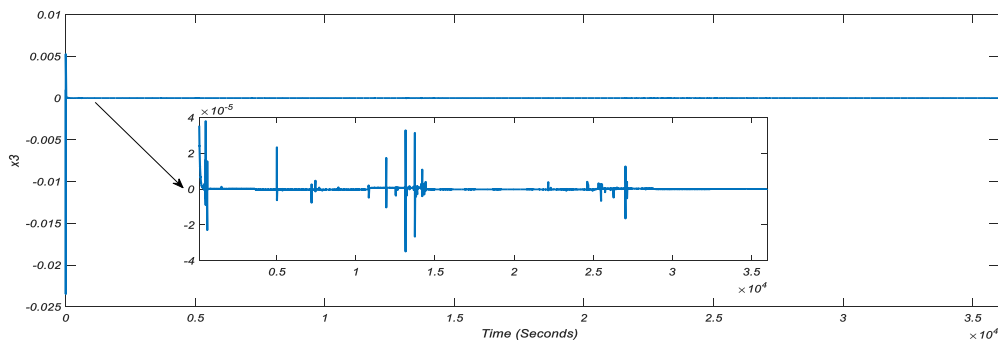
شکل ۳: نمودار تغییرات اختلاف توان نسبی از مقدار تعادلی آن

توان نسبی سیستم بعد از گذشت چند ثانیه به مقدار تعادلی خودش همگرا شده است و در حالت پایدار نیز خطای قابل قبولی دارد (شکل ۳). همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اختلاف بین نیاهسته‌های نوترون‌های تاخیری با مقدار تعادلی آن نیز در کمتر از چند ثانیه به عدد صفر همگرا می‌شود و در ادامه نیز نوسانات بسیار کوچکی حول صفر دارد که ناشی از عدم قطعیت‌ها و تغییرات توان است.

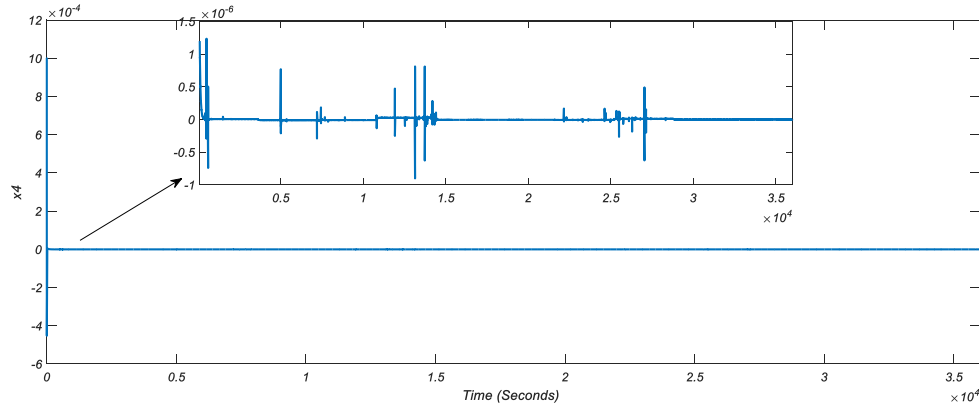
دمای متوسط سوخت و خنک‌کننده نیز در زمان کوتاهی به مقدار تعادلی خود رسیده‌اند و نوسانات ناشی از عدم قطعیت‌ها چندان ملموس نیست (شکل‌های ۵ و ۶).



شکل ۴: نمودار تغییرات اختلاف نیاهسته‌های نوترون‌های تاخیری از مقدار تعادلی آن

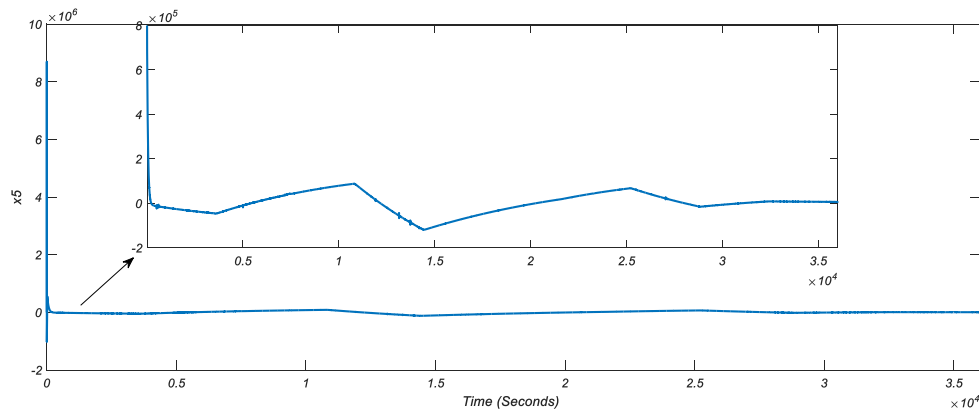


شکل ۵: نمودار تغییرات اختلاف دمای متوسط سوخت از مقدار تعادلی آن

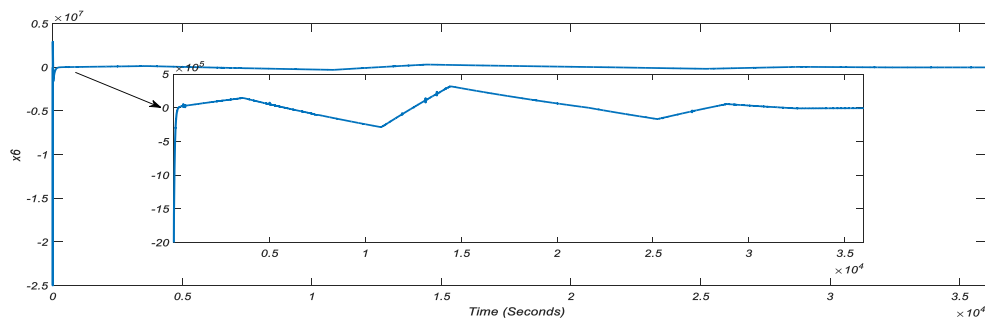


شکل ۶: نمودار تغییرات اختلاف دمای متوسط خنک‌کننده از مقدار تعادلی آن

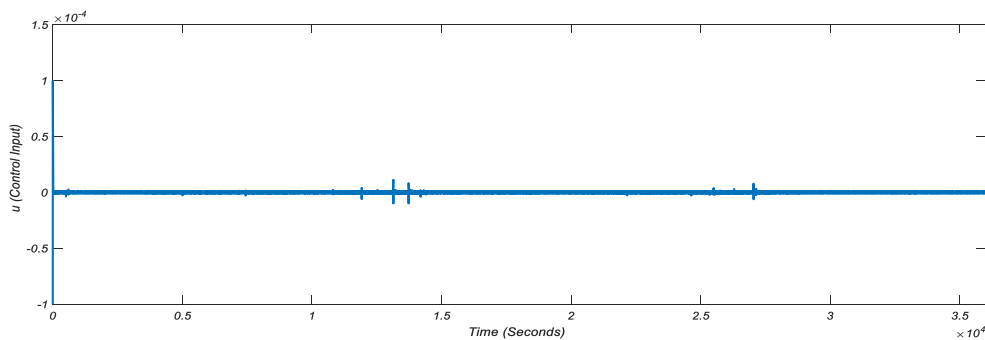
همانطور که در شکل ۷ و ۸ قابل مشاهده است، غلظت زینان و ید نیز در حال همگرا شدن به مقادیر تعادلی خودشان بعد از مدتی کوتاه هستند. مشاهده می‌شود که اثر عدم قطعیت‌ها روی این دو نمودار بیشتر از قبل نمایان است. این امر با توجه به اینکه مقادیر تعادلی زینان و ید از مرتبه زیاد و در حد 10^{15} می‌باشد، قابل توجیه است. همچنین در شکل ۹ ورودی کنترل اعمالی به سیستم قابل مشاهده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که ورودی کنترل نیز در محدوده قابل قبولی قرار داشته و کار کنترلی مورد نیاز برای ردگیری مناسب توان و مقابله با عدم قطعیت‌ها در گستره مناسبی قرار دارد.



شکل ۷: نمودار تغییرات غلظت زینان از مقدار تعادلی آن



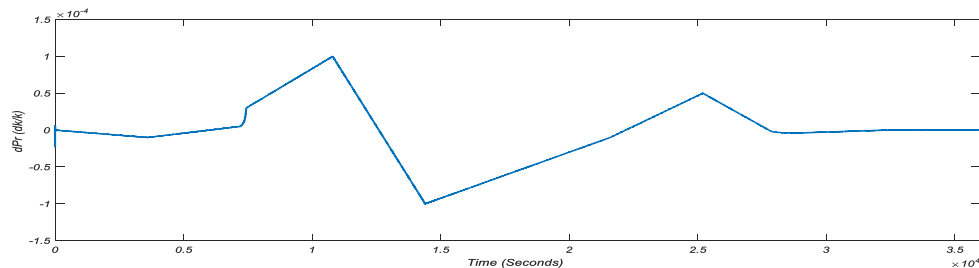
شکل ۸: نمودار تغییرات اختلاف غلظت یید از مقدار تعادلی آن



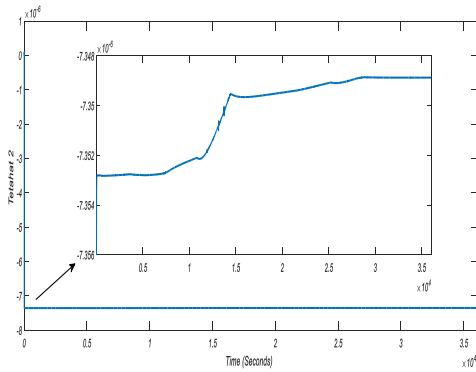
شکل ۹: نمودار تغییرات ورودی کنترل

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات اختلاف راکتیویته اعمالی از طریق میله کنترل از مقدار تعادلی آن قابل مشاهده است. با مقایسه این نمودار با نمودار تغییرات مربوط به θ که در شکل ۱ داده شده بود، به این نتیجه می‌رسیم که هرگونه تغییرات در θ باید با راکتیویته اعمالی از طریق میله کنترل و در نتیجه ورودی کنترل پاسخ داده شود تا سیستم در حالت وجود عدم قطعیت‌ها همچنان به کار عادی خود ادامه دهد. مادامی که سیستم از این عدم قطعیت‌ها برخوردار است، نیاز به تغییرات در مکان میله کنترل و ورودی کنترل خواهد بود.

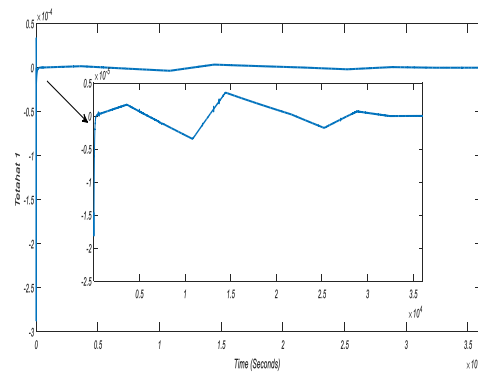
مقادیر بردار عدم قطعیت تخمین زده شده $\hat{\theta}$ که از طریق قانون تطبیق به دست می‌آیند، در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ آمده اند. همانطور که مشاهده می‌شود، تمام $\hat{\theta}$ ها همگرا می‌شوند. با توجه به اینکه در قانون تطبیق پیشنهادی، هدف تخمین دقیق مقادیر عدم قطعیت‌ها نبوده است، صرف همگرایی قانون تطبیقی به یک مقدار کفایت می‌کند.



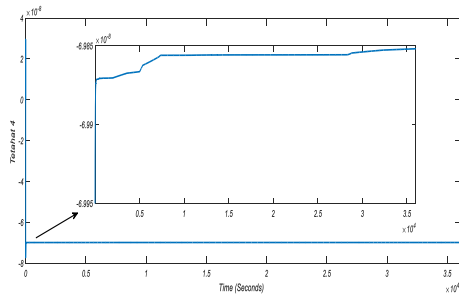
شکل ۱۰: نمودار تغییرات اختلاف راکتیویته اعمالی از طریق میله کنترل از مقدار تعادلی آن



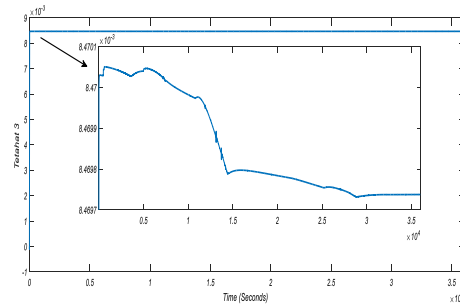
شکل ۱۲: نمودار مربوط به تخمین θ_2



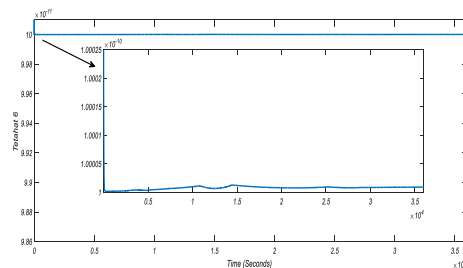
شکل ۱۱: نمودار مربوط به تخمین θ_1



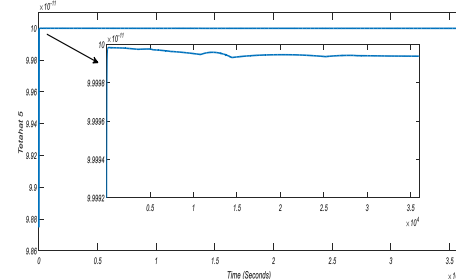
شکل ۱۴: نمودار مربوط به تخمین θ_4



شکل ۱۳: نمودار مربوط به تخمین θ_3



شکل ۱۶: نمودار مربوط به تخمین θ_6



شکل ۱۵: نمودار مربوط به تخمین θ_5

بحث و نتیجه‌گیری:

برای استفاده بهینه و ایمن از راکتورهای آب تحت فشار، نیاز به کنترل‌کننده‌هایی داریم که در شرایط وجود تغییرات در پارامترها نیز همچنان عملکرد مناسبی داشته باشند. کنترل‌کننده‌های تطبیقی از چند دهه قبل برای جبران اثر این نامعینی‌ها به کار رفته‌اند. در این مقاله، یک کنترل‌کننده تطبیقی فیدبک حالت غیرخطی برای قلب راکتور PWR طراحی گردید. شبیه‌سازی‌ها عملکرد مناسب این کنترل‌کننده را در جبران عدم قطعیت‌ها نشان می‌دهند.

مراجع:

- [۱] M.N. Khajavi, M.B. Menhaj, A.A. Suratgar, A neural network controller for load following operation of nuclear reactors, *Annals of Nuclear Energy*, 29 (2002) 751-760.
- [۲] S.S. Khorramabadi, M. Boroushaki, C. Lucas, Emotional learning based intelligent controller for a PWR nuclear reactor core during load following operation, *Annals of Nuclear Energy*, 35 (2008) 2051-2058.
- [۳] H. Eliasi, M. Menhaj, H. Davilu, Robust nonlinear model predictive control for a PWR nuclear power plant, *Progress in Nuclear Energy*, 54 (2012) 177-185.
- [۴] G. Ansarifar, H. Akhavan, Sliding mode control design for a PWR nuclear reactor using sliding mode observer during load following operation, *Annals of Nuclear Energy*, 75 (2015) 611-619.
- [۵] G. Ansarifar, M. Rafiei, Higher order sliding mode controller design for a research nuclear reactor considering the effect of xenon concentration during load following operation, *Annals of Nuclear Energy*, 75 (2015) 728-735.
- [۶] R. Ghasemi, G.R. Ansarifar, Non-linear control of the reactor power in a PWR using online parameter adaptation, *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, 10 (2016) 28-58.
- [۷] G. Ansarifar, S. Saadatzi, Sliding Mode Control for Pressurized-Water Nuclear Reactors in load following operations with bounded xenon oscillations, *Annals of Nuclear Energy*, 76 (2015) 209-217.
- [۸] G.R. Ansarifar, S. Saadatzi, Nonlinear control for core power of pressurized water nuclear reactors using constant axial offset strategy, *Nuclear Engineering and Technology*, 47 (2015) 838-48.
- [۹] Z. Dong, Nonlinear adaptive power-level control for modular high temperature gas-cooled reactors, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60 (2013) 1332-1345.
- [۱۰] Z. Dong, Nonlinear dynamic output-feedback power-level control for PWRs: A shifted-entropy based design approach, *Progress in Nuclear Energy*, 68 (2013) 223-234.
- [۱۱] Z. Dong, Nonlinear power-level control design for MHTGRs by considering stepper motor dynamics, *Progress in Nuclear Energy*, 78 (2015) 216-230.
- [۱۲] Z. Dong, Nonlinear state-feedback dissipation power level control for nuclear reactors, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58 (2011) 241-257.
- [۱۳] Z. Dong, X. Huang, L. Zhang, Output-feedback load-following control of nuclear reactors based on a dissipative high gain filter, *Nuclear Engineering and Design*, 241 (2011) 4783-4793.