



کنترل پیش بین تابعی برای ردیابی تغییرات توان هسته راکتور آب سبک تحت فشار به کمک توابع لاگر و مدل کاهش یافته

حسن نصیری سلوکلو¹، نوشین بیگدلی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی برق، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، قزوین

2- دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، قزوین

* قزوین، صندوق پستی 3414916818، n.bigdeli@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 شهریور 1396

پذیرش: 09 آذر 1396

ارائه در سایت: 22 دی 1396

کلید واژگان:

کنترل پیش بین تابعی

کاهش مرتبه

برش متعادل

نیروگاه هسته ای

توابع لاگر

چکیده

در این مقاله به طراحی کنترل پیش بین تابعی مبتنی بر توابع لاگر برای ردیابی تغییرات بار راکتور آب سبک تحت فشار (PWR) موجود در نیروگاه های هسته ای پرداخته شده است. از آن جا که علی رغم کارایی بسیار خوب کنترل کننده های پیش بین در صنعت، پیاده سازی آن ها برای سیستم های مرتبه بالای مقید، حجم محاسبات بالایی می طلبد، در این مقاله، طراحی کنترل پیش بین با حجم محاسبات نسبتاً پایین مورد نظر قرار گرفت. لذا، ابتدا مرتبه مدل PWR با استفاده از روش برش متعادل، کاهش داده شد. سپس، با توجه به حجم محاسبات نسبتاً پایین و کارایی بالای کنترل کننده پیش بین تابعی، به طراحی کنترل کننده پیش بین تابعی مبتنی بر توابع لاگر پرداخته شده است. بدین منظور، با کمینه سازی انتگرال مربع خطا، پارامتر مقیاس بندی چند جمله ای لاگر تعیین شده است. سپس به علت وجود محدودیت های مکانیکی، قیدهایی روی فرمان کنترلی و تغییرات فرمان کنترلی در نظر گرفته شده و برای حل مساله کنترل پیش بین مقید و طراحی فرمان کنترلی، از روش برنامه ریزی مربعی استفاده شده است. همچنین به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، پاسخ سیستم در حضور اغتشاش بررسی شده است. نشان داده شده که با استفاده از کنترل پیش بین تابعی بر روی مدل مرتبه کاهشی، علاوه بر کاهش حجم محاسبات، کنترل توان هسته و ردیابی تغییرات بار در حضور اغتشاش خارجی به خوبی انجام شده است.

Predictive Functional Control for Tracking of Core Power Variations in Pressurized Water Reactor based on Laguerre functions and Reduced-Order Model

Hasan Nasiri Soloklo, Noshin Bigdeli*

Electrical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* P.O.B. 3414916818, Qazvin, Iran, n.bigdeli@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 September 2017

Accepted 30 November 2017

Available Online 12 January 2018

Keywords:

Predictive Functional Control

Order Reduction

Balanced Truncation

Power Station

Laguerre functions

ABSTRACT

In this paper, the design of predictive functional controller based on Laguerre functions to track the load changes in Pressurized Water Reactor (PWR) nuclear power stations has been considered. Since, despite of out-performance of predictive controllers in industrial applications, their implementation implies high computational complexity for constrained large scale systems, in this paper, the design of model predictive controller with low computational complexity was considered. For this purpose, at first, the order of PWR model was reduced via Balanced Truncation method. Then, due to low computational complexity and high performance of predictive functional controllers, we dealt with the design of predictive functional controllers based on Laguerre functions. In this context, the Laguerre polynomial scaling parameter was determined by minimizing integral square error. Then, due to mechanical constraints, some specific constraints were applied to the control effort and its changes, and the Quadratic Programming method was used for solving the constrained model predictive control problem and consequently, designing the control effort signal. Also, in order to show the efficiency of the proposed core power control method, the system response in the presence of disturbance is investigated. It is shown that, by using predictive functional controller on a reduced order model, in addition to the decrease of the computation volume, the performance of the core power control to track load changes in presence of external disturbance is well done.

1- مقدمه

زیست و همچنین بهره‌وری بالای آن نسبت به انرژی های فسیلی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [1]. همچنین انرژی هسته ای نسبت به انرژی های تجدیدپذیر دارای محدودیت بسیار کمتری در منابع می باشد. یکی از مهم ترین و پرچالش ترین بخش های نیروگاه هسته ای راکتور آب سبک تحت

نیروگاه های هسته ای در کنار نیروگاه های انرژی های فسیلی و انرژی های تجدیدپذیر یکی از منابع مهم و اصلی تامین برق می باشند. امروزه با توجه به مزایای بسیار زیاد انرژی هسته ای از قبیل پاک بودن و خطر کمتر برای محیط

Please cite this article using:

H. Nasiri Soloklo, N. Bigdeli, Predictive Functional Control for Tracking of Core Power Variations in Pressurized Water Reactor based on Laguerre functions and Reduced-Order Model, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 01, pp. 299-306, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

فشار^۱ می‌باشد که با کنترل توان هسته تغییرات بار را دنبال می‌کند. چون راکتور آب سبک تحت فشار پیچیده و غیرخطی است، مدل‌سازی دقیق و طراحی مناسب سیستم کنترل توان هسته در آن‌ها بسیار مشکل می‌باشد. از همین رو دستیابی به عملکرد رضایت بخش توسط کنترل کننده‌های کلاسیک برای کنترل توان راکتور هسته‌ای بسیار سخت و مشکل می‌باشد [2].

در سال‌های اخیر کنترل توان هسته نیروگاه‌های هسته‌ای PWR بسیار مورد توجه قرار گرفته است و روش‌های مختلفی برای کنترل آن از قبیل استراتژی انحراف محور ثابت [3]، استراتژی مبتنی بر LQR/LTR [4]، روش مود لغزشی [6,5]، کنترل کننده‌ها و تکنیک‌های هوشمند [8,7]، روش‌های منطق فازی [10,9]، روش‌های تطبیقی [11]، شبکه عصبی مصنوعی [12]، سیستم‌های کنترل بهینه مقاوم [13]، و کنترل پیش‌بین مدل [14] ارائه شده است.

یکی از روش‌های توانمند ارائه شده توسط محققین برای کنترل توان هسته راکتور PWR کنترل پیش‌بین مدل می‌باشد. کنترل کننده‌های پیش بین با توجه به قابلیت مواجهه با فرآیندهای چند متغیره با تاخیر بالا، سیستم‌های ناکمینه فاز، سیستم‌های غیرخطی و تغییرپذیر با زمان محبوبیت فراوانی دارند [15-18]. با این وجود یکی از مشکلات کنترل پیش‌بین مدل حجم بالای محاسبات و سرعت پایین در طراحی فرمان کنترلی می‌باشد. از همین رو در این کار سعی شده است تا روشی جهت کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت طراحی فرمان کنترلی در کنترل پیش‌بین ارائه شود. کنترل پیش‌بین تابعی^۲ یکی از انواع کنترل کننده پیش‌بین است که ویژگی‌های حجم محاسبات پایین، سادگی طراحی و کارایی مناسب را به‌طور همزمان دارا می‌باشد [19] و به همین دلیل کاندید مناسبی برای کنترل سیستم‌های سریع به شمار می‌رود.

امروزه به علت بزرگ شدن و پیچیدگی اغلب سیستم‌ها، مدل ریاضی که برای تحلیل آن‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود، دارای بُعد بالا و متعاقباً پیچیدگی زیادی است. تحلیل و طراحی دقیق سیستم‌های ابعاد وسیع، به پیچیدگی محاسبات، طولانی شدن زمان شبیه‌سازی و در نتیجه طولانی شدن زمان تحلیل و طراحی منجر می‌گردد. همچنین علاوه بر این مشکلات، به علت بُعد بالای سیستم و کنترل کننده، پیاده‌سازی کنترل کننده، تعمیر و نگهداری آن نیز پر هزینه و پیچیده می‌شود. یکی از بهترین و مؤثرترین رهیافت‌های ارائه شده برای غلبه بر چنین مشکل‌هایی، کاهش مرتبه سیستم است.

کاهش مرتبه سیستم اولین بار در سال 1965 توسط دیویسون [20] ارائه گردید و طی سالیان متمادی مورد توجه و بررسی بسیاری از محققین و دانشمندان قرار گرفت [21]. روش‌هایی مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند جدیدترین روش‌های کاهش مرتبه می‌باشند [22,23].

روش برش متعادل ارائه شده توسط مور^۳ در مرجع [24]، یکی از معروف‌ترین و توانمندترین روش‌های کاهش مرتبه می‌باشد. در این مقاله، تنها به معرفی این روش و بررسی کارایی آن بسنده شده و به طراحی کنترل کننده برای سیستم‌های ابعاد وسیع (کاهش یافته) پرداخته نشده است. از طرفی، کنترل PWR، به عنوان یک سیستم صنعتی در مراجع مختلف مورد توجه بوده است [3-14]. در [14]، طراحی کنترل کننده پیش بین برای این

سیستم ارائه شده است. به هر حال، علی‌رغم کارایی این روش، با توجه به ابعاد وسیع بودن مدل PWR و همچنین حجم بالای محاسبات در طراحی کنترل پیش‌بین مقید، لزوم طراحی کنترل کننده پیش‌بین با حجم محاسبات کمتر احساس گردید. بدین منظور، در این مقاله طراحی کنترل کننده پیش بین تابعی براساس مدل کاهش یافته PWR انجام شد. کنترل کننده پیشنهادی، از یک سو از مزیت سادگی و حجم کاهش یافته محاسبات کنترل کننده پیش بین تابعی سود می‌برد و از یکسو با به‌کارگیری مدل کاهش یافته، حجم محاسبات کمتری را در پیش‌بینی خروجی‌های سیستم طلب می‌کند. لذا، نوآوری این مقاله را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

الف) استفاده از روش برش متعادل [24] برای کاهش مدل برای سیستم راکتور آب سبک تحت فشار به‌عنوان یک سیستم مرتبه بالا جهت کاهش حجم محاسبات طراحی کنترل کننده پیش‌بین.

ب) طراحی کنترل کننده پیش‌بین تابعی مبتنی بر توابع لاگر برای سیستم PWR، به‌عنوان یک روش کنترل پیش‌بین ساده، سریع، مؤثر و کاربردی جهت بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته در زمینه‌های ردیابی سیگنال مرجع و حذف اثر اغتشاش.

ج) تعیین پارامتر مقیاس بندی توابع لاگر با استفاده از کمینه‌سازی معیار انتگرال مربع خطا جهت تنظیم پاسخ گذرای سیستم حلقه بسته.

در این مقاله، در بخش 2 به مدل‌سازی راکتور آب سبک تحت فشار پرداخته شده است. در بخش 3 تئوری کنترل پیش‌بین تابعی مبتنی بر توابع لاگر توضیح داده شده و سپس رهیافتی جهت طراحی کنترل کننده پیش بین نامقید و مقید ارائه شده است. در بخش 4 به شبیه‌سازی روش پیشنهادی پرداخته شده است. شبیه‌سازی در سه سناریو انجام شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده بهبود پایداری توان هسته در PWR ها در حضور کنترل کننده پیش‌بین مرتبه کاهشی می‌باشد. همچنین برای حالتی که از مدل مرتبه کاهشی استفاده شده است حجم محاسبات کاهش یافته در حالی که پاسخ سیستم همچنان مناسب است. همچنین کنترل کننده پیشنهادی قابلیت دفع اغتشاش و ردیابی مناسب ورودی مرجع را دارد.

2- مدل‌سازی راکتور آب سبک تحت فشار

برای مدل‌سازی راکتور آب سبک تحت فشار از معادلات سینتیک همراه با یک گروه از نوترون‌های تاخیری به همراه دو فیدبک از دمای سوخت و دمای خنک‌کننده استفاده شده است [25]. این مدل مبتنی بر مدل‌های دینامیک‌های نوترون، مدل‌های هیدرولیک گرمایی، و مدل‌های واکنش‌پذیری می‌باشد [26].

مدل دینامیک‌های نوترون براساس معادلات سینتیک با یک گروه نوترون تاخیری و پس از نرمال‌سازی به جهت سادگی و سهولت محاسبات، در زیر داده شده است

$$\frac{dn_r}{dt} = \frac{\delta\rho - \beta}{\Lambda} n_r + \frac{\beta}{\Lambda} c_r \quad (1)$$

$$\frac{dc_r}{dt} = \lambda n_r - \lambda c_r \quad (2)$$

همچنین توان هسته با چگالی نوترون رابطه مستقیم دارد و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$P_a(t) = n_r P_0 \quad (3)$$

معادلات دیفرانسیلی دمای سوخت و دمای خنک کننده که در دسته مدل‌های هیدرولیکی گرمایی قرار دارند، به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{f_f P_0}{\mu_f} n - \frac{\Omega}{\mu_f} T_f + \frac{\Omega}{2\mu_f} T_i + \frac{\Omega}{2\mu_f} T_e \quad (4)$$

¹ Pressurized Water Reactor(PWR)

² Predictive Functional Control (PFC)

³ Moore

غیر خطی PWR دست یافت.

با انتخاب $x = [\delta n_r \ \delta c_r \ \delta T_f \ \delta T_l \ \delta \rho r_r]^T$ به عنوان متغیرهای حالت، ورودی مدل فضای حالت و $y = \delta n_r$ به عنوان متغیر خروجی،

نمایش فضای حالت مدل خطی شده PWR به صورت زیر به دست می آید.

$$\begin{cases} \dot{x} = A_d x + B_d u \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (11)$$

که در آن

$$A_d = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{\Lambda} & \frac{\beta}{\Lambda} & \frac{\alpha_f}{\Lambda} n_0 & \frac{\alpha_c}{2\Lambda} n_0 & \frac{n_0}{\Lambda} \\ \lambda & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \frac{f_f}{\mu_f} P_0 & 0 & -\frac{\Omega}{\mu_f} & \frac{\Omega}{2\mu_f} & 0 \\ \frac{1-f_f}{\mu_c} P_0 & 0 & \frac{\Omega}{\mu_c} & -\frac{2M+\Omega}{2\mu_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_d = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$D = 0$$

می باشد.

لذا با توجه به مقادیر پارامترها در جدول 1، مقادیر ویژه ماتریس A_d

برای نقاط تعادل مذکور به ترتیب به صورت ذیل می باشد:

$$\lambda x_{1e} = [523.08 \ -1.47 \ -0.24 \ -0.23 \ 0] \quad (12a)$$

$$\lambda x_{2e} = [-300.4 \ -1.3 \ -0.86 \ -0.12 \ 0] \quad (12b)$$

که در آن، λx_{1e} و λx_{2e} به ترتیب بردارهای مقادیر ویژه ماتریس A_d مربوط

به نقاط تعادل x_{1e} و x_{2e} هستند. با توجه به مقادیر ویژه به دست آمده، نقطه

تعادل اول ناپایدار می باشد. در مورد نقطه تعادل دوم، با توجه به دینامیک

سیستم، چهار مقدار ویژه در نیم صفحه سمت چپ قرار گرفته است. مقدار

ویژه صفر ایجاد شده نیز، مربوط به دینامیک $\delta \rho_r$ در معادله (8) است که یک

رابطه خطی دکوپله، کنترل پذیر و پایدار پذیر است که در آن، تغییرات حالت

به صورت مضربی از ورودی مدل گردیده است. لذا با توجه به قضیه خطی-

سازی لیاپانوف، سیستم کلی، پایدار مرزی خواهد بود.

3- کنترل پیش بین تابعی با استفاده از توابع لاگر

3-1- توصیف مسیر سیگنال کنترلی

با توجه به تئوری کنترل پیش بین [28,27]، برای توصیف مسیر اختلاف

سیگنال کنترلی آینده در افق کنترل می توان از توابع لاگر به عنوان دسته

مهمی از توابع یک متعامد گسسته استفاده نمود [17]. بنابراین برای یک

مجموعه از توابع لاگر $l_1(k), l_2(k), \dots, l_N(k)$ داریم:

$$\Delta u(k_i + k) \approx \sum_{m=1}^N c_m(k_i) l_m(k) \quad (13)$$

که $\Delta u(k_i + k) = u(k_i + k) - u(k_i + k - 1)$ است که k_i زمان اولیه

افق کنترلی و k لحظه نمونه برداری بعدی، N تعداد ترم های مورد استفاده در

بسط، c_m ضرایب بسط می باشند. از این پس برای سادگی

از نماد c_m به جای $c_m(k_i)$ استفاده شده است.

تبدیل تابع لاگر زمان گسسته به صورت زیر داده شده است [28]:

$$\Gamma_m(z) = \Gamma_{m-1}(z) \frac{z^{-1} - a}{1 - az^{-1}} \quad (14)$$

که در آن $\Gamma_1(z) = (\sqrt{1-a^2}/(1-az^{-1}))$ و ضریب مقیاس بندی بوده

که $0 \leq a < 1$ است. مجموعه توابع لاگر دارای ویژگی های جالب بسیاری

می باشد که یکی از مهم ترین این ویژگی ها تعامد می باشد

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{(1-f_f)P_0}{\mu_c} n_r + \frac{\Omega}{\mu_c} T_f - \frac{(2M+\Omega)}{2\mu_c} T_l + \frac{(2M-\Omega)}{2\mu_c} T_e \quad (5)$$

معادله دیفرانسیلی واکنش پذیری به طور مستقیم به موقعیت میله بستگی دارد.

همچنین واکنش پذیری $\delta \rho$ دارای چندین مولفه از جمله دمای خروجی خنک

کننده و دمای ورودی به راکتور می باشد.

$$\delta \rho = \delta \rho_r + \alpha_f (T_f - T_{f0}) + \frac{\alpha_c (T_l - T_{l0})}{2} + \frac{\alpha_c (T_e - T_{e0})}{2} \quad (6)$$

در PWR ها دمای ورودی خنک کننده آب عموماً ثابت و در محدوده 300

درجه سانتی گراد پایدار می باشد. در نتیجه رابطه (6) را می توان به صورت زیر

در نظر گرفت

$$\delta \rho = \delta \rho_r + \alpha_f (T_f - T_{f0}) + \frac{\alpha_c (T_l - T_{l0})}{2} \quad (7)$$

$$\frac{d\delta \rho_r}{dt} = G_r Z_r \quad (8)$$

متغیرهای ارائه شده در معادلات (1)-(8) در فهرست اصطلاحات به طور کامل

معرفی شده اند. مقادیر نامی این پارامترها در جدول 1 آورده شده است.

با توجه به معادلات (1)-(2) و (4)-(7) مشاهده می شود که به دلیل ضرب

$\delta \rho$ در n_r معادلات به دست آمده غیر خطی می باشند. با توجه به مقادیر

پارامترها در جدول 1، سیستم PWR مورد بررسی دارای دو نقطه تعادل

می باشد که به ترتیب در نقاط ذیل واقع شده اند:

$$x_{1e} = [0 \ 0 \ 300 \ 300 \ 0] \quad (9a)$$

$$x_{2e} = [1.15 \ 1.15 \ 705.75 \ 318.24 \ 0] \quad (9b)$$

بررسی پایداری این نقاط، با توجه به خصوصیات سیستم خطی شده PWR

انجام خواهد گرفت. بدین منظور، با استفاده از قضیه اغتشاش آرام حول نقطه

تعادل و با تعریف:

$$\begin{aligned} \delta n_r &= n_r - n_{r0} \\ \delta c_r &= c_r - c_{r0} \\ \delta T_f &= T_f - T_{f0} \\ \delta T_l &= T_l - T_{l0} \\ \delta \rho r_r &= \rho_r - \rho_{r0} \end{aligned} \quad (10)$$

که δ انحراف از نقطه تعادل و $n_{r0}, T_{f0}, c_{r0}, n_{r0}, T_{l0}, \rho_{r0}$ مقادیر متغیرهای

حالت سیستم در نقطه تعادل می باشند، می توان به مدل خطی از سیستم

جدول 1 داده های مورد استفاده در شبیه سازی [14]

Table 1 Data used for simulation [14]

پارامتر	مقدار
$n_0(1)$	1 (m ⁻³)
$n_0(2)$	0.5 (m ⁻³)
$G_r(1)$	0.0145
$G_r(2)$	0.0145
P_0	2500 MW
λ	0.15 s ⁻¹
μ_c	$\left(\frac{160}{9} n_0 + 54.002\right)$ MWsC ⁻¹
α_f	$(n_0 - 4.24) \times 10^{-5}$ C ⁻¹
β	0.006019
Ω	$\left(\frac{5}{3} n_0 + 4.9333\right)$ MWsC ⁻¹
f_f	0.92
M	$(28 n_0 + 74)$ MWsC ⁻¹
α_c	$(-4 n_0 - 17.3) \times 10^{-5}$ C ⁻¹
Λ	0.00002 s
μ_f	26.3 MWsC ⁻¹

جبری خطی زیر را ارضا می کند [31]:

$$AS_c(m) - S_c(m)\psi^T = A^m BL(0)^T - BL(m)^T \quad (23)$$

چون ψ یک ماتریس پایین مثلثی است، جواب ماتریس جبری معادله (23) با روش تکراری ستون به ستون یافته می شود.

به سادگی اثبات می شود که خروجی در زمان آینده با استفاده از تابع لاگر به صورت زیر می باشد.

$$y(k_i + m|k_i) = CA^m x(k_i) + \phi(m)^T \eta \quad (24)$$

که در آن $\phi(m)^T = \sum_{j=1}^{m-1} CA^{m-j-1} BL(j)^T$ است.

3-3- طراحی فرمان کنترلی

ورودی مرجع زیر را در نظر بگیرید

$$r(k_i + m) = [r_1(k_i + m) \quad r_2(k_i + m) \quad \dots \quad r_q(k_i + m)]^T \quad (25)$$

که $0 \leq m \leq N_p$ افق پیش بینی است. در کنترل پیش بین تابع هدف مناسبی که با کمینه سازی آن بتوان قانون کنترلی یافت که خروجی پیش بینی شده سیستم $y(k_i + m)$ را تا حد امکان به مسیر آینده ورودی مرجع $r(k_i + m)$ نزدیک کند، در زیر داده شده است.

$$J = \sum_{m=1}^{N_p} (r(k_i + m) - y(k_i + m|k_i))^T Q (r(k_i + m) - y(k_i + m|k_i)) + \sum_{m=0}^{N_p-1} \Delta u(k_i + m)^T R \Delta u(k_i + m) \quad (26)$$

که $Q > 0$ و $R > 0$ می باشند. با توجه به ویژگی یک متعامد بودن توابع لاگر، می توان تابع هدف (26) را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$J = \sum_{m=1}^{N_p} (r(k_i + m) - y(k_i + m|k_i))^T Q (r(k_i + m) - y(k_i + m|k_i)) + \eta^T R \eta \quad (27)$$

$$\hat{\eta} = \left(\sum_{m=1}^{N_p} \phi(m) Q \phi(m)^T + R \right)^{-1} \times \left(\sum_{m=1}^{N_p} \phi(m) Q (r(k_i + m) - CA^m x(k_i)) \right) \quad (28)$$

با استفاده از بردار بهینه $\hat{\eta}$ که در رابطه (28) تعیین شد، قانون کنترل پیش بین به صورت زیر به دست می آید.

$$\Delta u(k_i) = L(0)^T \hat{\eta} \quad (29)$$

یکی از ویژگی های کنترل پیش بین مدل قابلیت اجرا و پیاده سازی انواع قیود موجود در طراحی سیستم کنترل از قبیل قید مشتق اول متغیر کنترلی، قید بر روی دامنه سیگنال کنترلی و قید روی متغیرهای خروجی می باشد.

به طور کلی به علت محدودیت های مکانیکی، مانند بیشینه سرعت میله کنترل که 72 گام بر دقیقه است و محدوده موقعیت میله کنترل که از 0 تا 1 می باشد و همچنین نیاز میله کنترل به تقریباً 300 گام برای حرکت از 0 تا 1، مساله بهینه سازی مورد نظر دارای قیدهایی می باشد [14]. در این مدل، با توجه به قیدهای بالا محدوده $u(k)$ و $\Delta u(k)$ به صورت زیر توصیف شده است:

$$\begin{cases} -0.004 \leq u(k) \leq 0.004 \\ -0.004 \leq \Delta u(k) \leq 0.004 \end{cases} \quad (30)$$

همان طور که مشاهده می شود معادله (30) قیدهای روی دامنه سیگنال کنترلی و قیدهای مشتق اول سیگنال کنترلی می باشند. در نتیجه مساله بهینه سازی نامقید (27) به مساله بهینه سازی مقید تبدیل می شود.

بایستی به این نکته توجه نمود که تابع هزینه (27) به فرم مربعی می باشد و چون در توابع هزینه مربعی شرط بهینگی کاروش-کان-توکر¹ برقرار است، و با توجه به روش شیب نزولی² به سادگی اثبات می شود که نقطه بهینه

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Gamma_m(\exp(j\omega)) \Gamma_n^*(\exp(j\omega)) d\omega = \begin{cases} 1 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad (15)$$

که در آن * نشان دهنده مزدوج مختلط می باشد. با تعریف

$l_m(k) = \Gamma_m(z, a)$
بردار $L(k) = [\Gamma_1(z, a) \quad \Gamma_2(z, a) \quad \dots \quad \Gamma_m(z, a)]^T$ را می توان به صورت $L(k+1) = [l_1(k) \quad l_2(k) \quad \dots \quad l_N(k)]^T$ خلاصه نمود. ارتباط میان $L(k)$ و $L(k+1)$ در معادله (14) داده شده است.

$$L(k+1) = \psi L(k) \quad (16)$$

که در آن

$$L(0)^T = \sqrt{(1-a^2)} [1 \quad -a \quad a^2 \quad -a^3 \quad \dots \quad (-1)^{N-1} a^{N-1}]$$

و

$$\psi = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b & a & 0 & \dots & 0 \\ -ab & b & a & \dots & 0 \\ a^2 b & -ab & b & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-1)^{N-2} a^{N-2} b & (-1)^{N-3} a^{N-3} b & \dots & b & 0 \end{bmatrix}$$

می باشد و $b = 1 - a^2$ است.

3-2- پیش بینی

سیستم p ورودی و q خروجی با مدل فضای حالت زمان گسسته زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) + \xi(k) \\ y(k) = C_m x_m(k) + \eta(k) \end{cases} \quad (17)$$

که متغیر حالت x_m دارای بعد n_1 می باشد. برای تعیین Δu مدل فضای حالت (17) به فرم مدل فضای حالت الحاقی زیر بازنویسی شده است [30]:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ \bar{y}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & 0 \\ C_m B_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ \bar{y}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} \xi(k) - \xi(k-1) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y(k) = [0_m \quad I_{q \times q}] \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ \bar{y}(k) \end{bmatrix} + \eta(k) \quad (18)$$

که $0_1, 0_m, 0_2$ به ترتیب ماتریس های صفر با ابعاد $n_1 \times q, m \times q$ و $q \times q$ و $I_{q \times q}$ ماتریس واحد با بعد q می باشند. برای سادگی رابطه (18) به صورت زیر نشان داده شده است.

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) + \xi(k) \\ y(k) = Cx(k) + \eta(k) \end{cases} \quad (19)$$

که در آن A, B و C ماتریس های متناظر با ماتریس های رابطه (18) می باشند. فرض کنید آینده مسیر کنترلی برای سیستم در زمان آینده m به صورت زیر باشد

$$\Delta u(k_i + m) = \sum_{i=1}^N l_i(m) c_i = L(m)^T \eta \quad (20)$$

که $\eta^T = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_N]$ می باشد. بنابراین پیش بینی آینده متغیر حالت به صورت زیر خواهد بود

$$x(k_i + m|k_i) = A^m x(k_i) + \sum_{i=0}^{m-1} A^{m-i-1} BL(i)^T \eta \quad (21)$$

یک جواب بسته برای جمع کانولوشن به صورت زیر می باشد

$$S_c(m) = \sum_{i=0}^{m-1} A^{m-i-1} BL(i)^T \quad (22)$$

اثبات می شود که جمع کانولوشن $S_c(m)$ برای هر $m \geq 0$ رابطه ماتریسی

¹ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

² steepest descent

به دست آمده از نوع جهانی می باشد [33].

4- نتایج شبیه سازی

برای تایید کارایی و توانمندی روش کنترل پیش بین کاهش مرتبه یافته پیشنهادی، ردیابی تغییرات بار توسط توان هسته در نیروگاه PWR انجام شده است. داده ها و مشخصات مورد استفاده در شبیه سازی مدل راکتور آب سبک تحت فشار در جدول 1 ارائه شده است. همچنین پارامترهای کنترل پیش بین مدل از قبیل افق کنترلی، افق پیش بین و توابع وزنی به ترتیب 20، 0.5 و 0.1 انتخاب شده است. انتظار داریم با استفاده از روش پیشنهادی تغییرات بار به خوبی توسط تغییرات توان دنبال شوند. در ادامه عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی به منظور ردیابی بار، در سه سناریو بررسی شده است.

4-1- سناریوی اول) بررسی اثر ضریب مقیاس بندی تابع لاگر در

طراحی کنترل کننده پیش بین نامقید

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در طراحی کنترل پیش بین مقید مبتنی بر تابع لاگر، ضریب مقیاس بندی تابع لاگر است که با a نشان داده شده است. در این بخش با تغییر این پارامتر و با در نظر گرفتن 5 ترم اول چندجمله ای لاگر، به بررسی نتایج به دست آمده توسط کنترل کننده پیش بین نامقید مبتنی بر تابع لاگر پرداخته شده است. با در نظر گرفتن ورودی مرجع به صورت $70\% \leftarrow 90\% \leftarrow 80\% \leftarrow 90\%$ و با در نظر گرفتن 5 ترم اول چند جمله ای لاگر و با تغییر ضریب مقیاس بندی a به طراحی کنترل کننده پیش بین مقید پرداخته شده است. در "شکل 1" نتایج به ازای $a = 0.1, 0.3, 0.5, 0.65$ رسم شده است.

با توجه به "شکل 1" مشاهده می گردد که با افزایش ضریب مقیاس بندی پایداری سیستم تضعیف می شود به گونه ای که در $a \geq 0.7$ سیستم ناپایدار می شود. در جدول 2 با استفاده از شاخص انتگرال مربع خطا به مقایسه نتایج به دست آمده به ازای ضرایب مقیاس بندی مختلف و $N=5$ به عنوان تعداد ترم های چندجمله ای لاگر پرداخته شده است.

همان طور که در [31] نشان داده شده است، ضریب مقیاس بندی با قطب غالب سیستم زمان پیوسته توسط رابطه $a \approx e^{-p\Delta t}$ مرتبط است که در آن Δt بازه نمونه برداری سیستم زمان گسسته می باشد. همان طور که در جدول 2 و همچنین "شکل 1" مشاهده می گردد با افزایش a پایداری سیستم تضعیف می یابد به گونه ای که در $a \geq 0.7$ سیستم ناپایدار می گردد.

تعداد ترم های چندجمله ای لاگر که با N نشان داده شده است بیانگر تعداد ترم های مورد استفاده برای تعریف سیگنال کنترلی می باشد. در [31] نشان داده شده است با افزایش N ، درجه آزادی توصیف کننده مسیر کنترلی

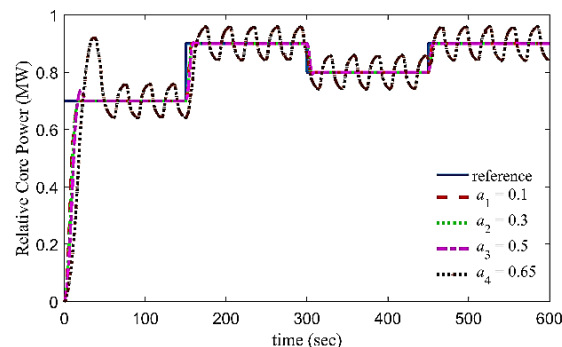


Fig. 1 System output for different values of the scaling factor

شکل 1 خروجی سیستم به ازای مقادیر مختلف ضریب مقیاس بندی

جدول 2 مقایسه شاخص انتگرال مربع خطا به ازای ضرایب مقیاس بندی مختلف
Table 2 Comparison of Integral Square Error Index for different scaling coefficients

ضریب مقیاس بندی	انتگرال مربع خطا
$a = 0.1$	2.7595
$a = 0.2$	2.9137
$a = 0.3$	3.0851
$a = 0.4$	3.2781
$a = 0.5$	3.5020
$a = 0.6$	3.9664
$a = 0.7$	ناپایدار
$a = 0.8$	ناپایدار
$a = 0.9$	ناپایدار

افزایش می یابد. همچنین با افزایش N پیچیدگی سیستم افزایش یافته و حجم محاسبات به شدت افزایش می یابد. به همین دلیل در انتخاب پارامتر N باید مصالحه ای میان افزایش دقت و کاهش پیچیدگی و حجم محاسبات برقرار نمود. در این مقاله $N=5$ در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول 2 مشاهده می شود که مناسب ترین پاسخ برای $a = 0.1$ به دست آمده است. در "شکل 2 تا 4" به ترتیب نمودار خروجی سیستم، نمودار حالت های سیستم و نمودار فرمان کنترلی برای پارامتر $a = 0.1$ ، $N=5$ نشان داده شده است.

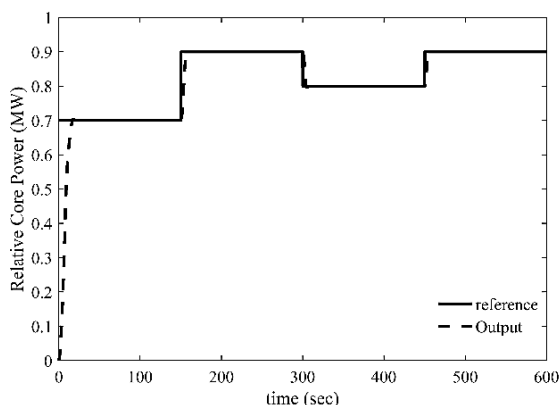


Fig. 2 The relative core power output of proposed control system for the first scenario

شکل 2 خروجی توان نسبی هسته سیستم کنترل پیشنهادی در سناریوی اول

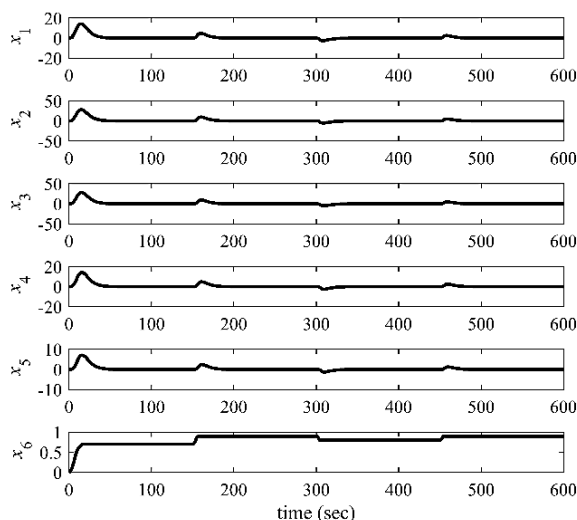


Fig. 3 States of system for the first scenario

شکل 3 حالت های سیستم برای سناریوی اول

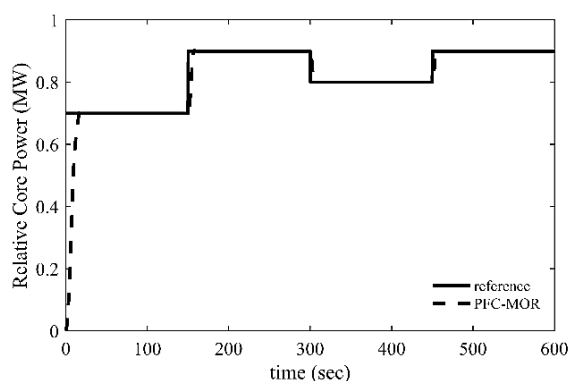


Fig. 6 The relative core power output of proposed control system for the second scenario

شکل 6 خروجی توان نسبی هسته سیستم کنترل پیشنهادی در سناریوی دوم

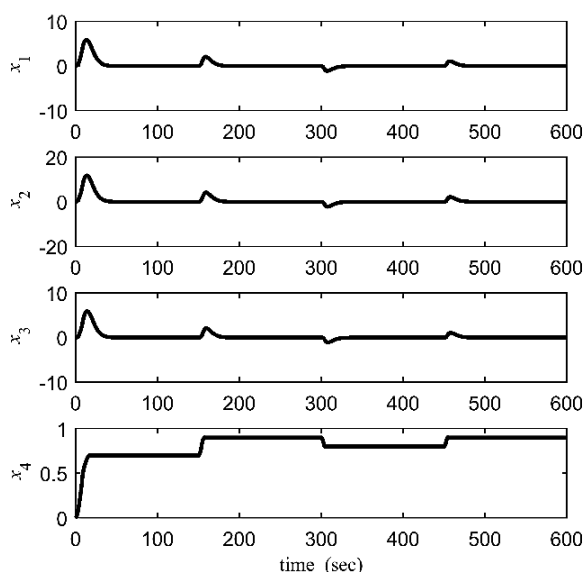


Fig. 7 States of system for the second scenario

شکل 7 حالت های سیستم برای سناریوی دوم

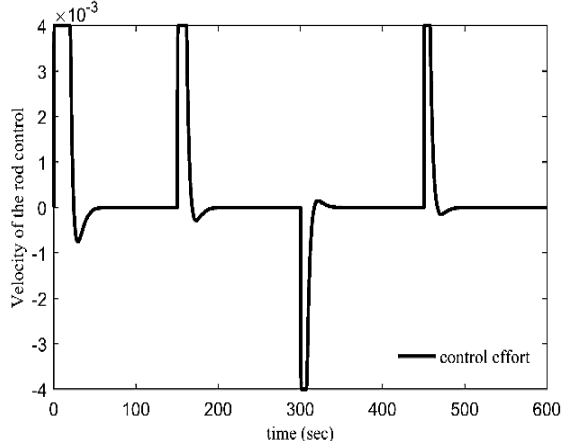


Fig. 8 Effort control signal for the second scenario

شکل 8 سیگنال کنترلی برای سناریوی دوم

کنترل کننده پیش بین تابعی مقید مرتبه کاهش، نمودار حالت های سیستم و فرمان کنترلی مربوطه نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می گردد در "شکل 6" خروجی سیستم به خوبی ورودی مطلوب را دنبال می کند. همچنین با توجه به نمودار "شکل 8"

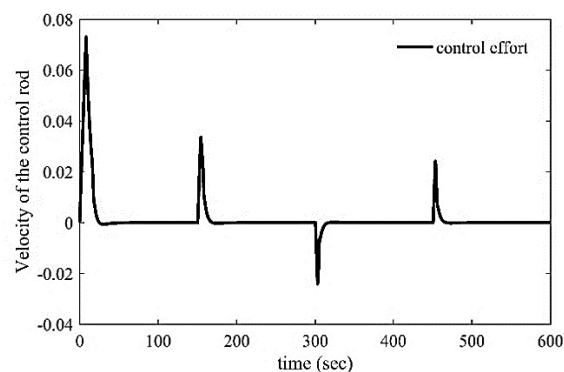


Fig. 4 Effort control signal for the first scenario

شکل 4 سیگنال کنترلی در سناریوی اول

همان طور که مشاهده می شود برای $a = 0.1$ و $N=5$ کنترل کننده پیش بین نامقید مبتنی بر تابع لاگر به خوبی به ردیابی ورودی مرجع پرداخته است.

4-2- سناریوی دوم) طراحی کنترل کننده پیش بین تابعی مقید مرتبه کاهشی

در این بخش ابتدا سیستم مرتبه کامل ارائه شده در قسمت 2 را توسط روش برش متعادل [24] کاهش داده و سپس کنترل کننده پیش بین تابعی مقید طراحی شده است.

برای تعیین مرتبه سیستم مرتبه کاهشی ابتدا نمودار مقادیر تکین هانکل سیستم مرتبه کامل رسم شده است.

با توجه به "شکل 5" مشاهده می گردد که مدهای 4 و 5 دارای انرژی بسیار کمی می باشند و در نتیجه تاثیر چندانی روی سیستم ندارند و می توان از آن ها صرف نظر نمود.

بنابراین مرتبه سیستم کاهشی 3 در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش برش متعادل و اعمال آن بر روی مدل توان هسته به مدل مرتبه کاهشی زیر دست می یابیم:

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= \begin{bmatrix} -0.7458 & 0.2566 & 0 \\ -0.2566 & -0.05127 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_r + \begin{bmatrix} -1.193 \\ -0.1549 \\ 17.93 \end{bmatrix} u \\ y &= [-1.193 \quad 0.1549 \quad 0.05657] x_r \end{aligned} \quad (31)$$

با توجه به مدل کاهش مرتبه یافته (31)، کنترل کننده پیش بین برای ردیابی ورودی مرجع برای حالتی که تغییرات سطح توان هسته مطلوب به صورت $0.70\% \leftarrow 0.90\% \leftarrow 0.80\% \leftarrow 0.90\%$ توان نامی هسته باشد، طراحی شده است.

در "شکل 6-8" به ترتیب خروجی سیستم کاهش مرتبه یافته در حضور

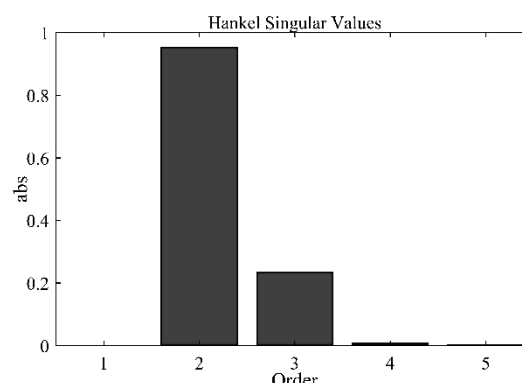


Fig. 5 Hankel Singular values of PWR system

شکل 5 مقادیر تکین هانکل سیستم PWR

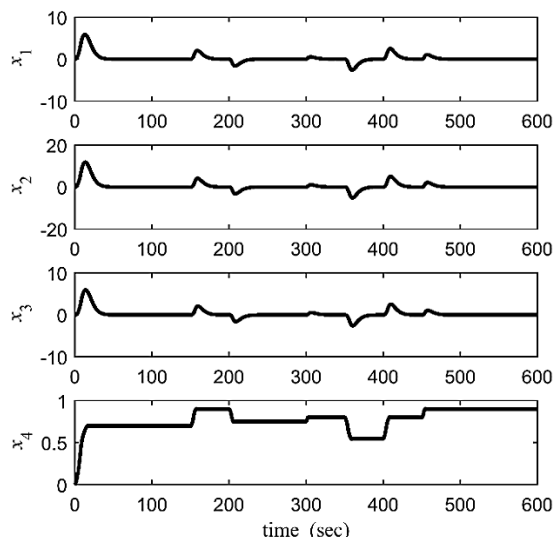


Fig. 11 States of system for the third scenario

شکل 11 حالت های سیستم برای سناریوی سوم

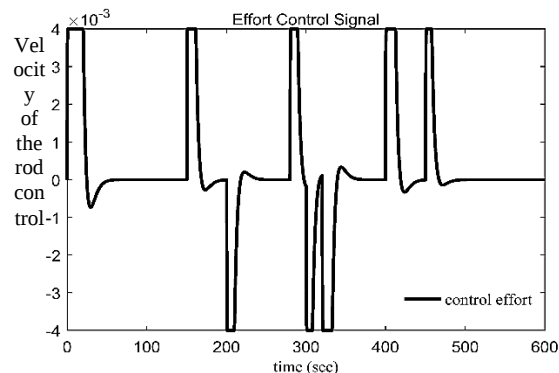


Fig. 12 Effort control signal for the third scenario

شکل 12 سیگنال کنترلی برای سناریوی سوم

5- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده پیش بین تابعی مقید مبتنی بر توابع لاگر، برای کنترل توان هسته سیستم کاهش مرتبه یافته راکتور آب سبک تحت فشار، به منظور ردیابی تغییرات بار، طراحی و شبیه سازی شده است. ردیابی تغییرات بار راکتور آب سبک تحت فشار به علت غیرخطی بودن و مرتبه بالا بودن مدل آن، بسیار سخت و مشکل است. همچنین کنترل پیش بین علی رغم قابلیت بالا در ردیابی سیگنال مرجع، حجم محاسبات بالایی را طلب می کند که با توجه به بُعد بالای مدل سیستم، حجم محاسبات طراحی کنترل کننده پیش بین سنگین تر نیز خواهد شد. کنترل کننده پیش بین تابعی مبتنی بر توابع لاگر حجم محاسبات کمتری نسبت به سایر کنترل کننده های پیش بین دارد، بنابراین اعمال کنترل کننده پیش بین تابعی پیشنهادی بر روی مدل سیستم راکتور آب سبک تحت فشار که با روش برش متعادل کاهش مرتبه یافته، با وجود کارایی بالا حجم محاسبات را کاهش داده است. نتایج شبیه سازی به خوبی کارایی روش پیشنهادی در کنترل توان هسته برای ردیابی تغییرات بار را بر روی مدل کاهش مرتبه یافته با حجم محاسبات کمتر نشان می دهد. همچنین نشان داده شده است که کنترل کننده پیشنهادی در حضور اغتشاش نیز با ارضای اهداف کنترلی و دفع اثر اغتشاش به خوبی به ردیابی بار پرداخته است.

مشاهده می گردد که فرمان کنترلی محدودیت اعمالی را ارضا نموده است. مشاهده می گردد که با وجود این که مدل سیستم کاهش داده شده است ولی خروجی همچنان مانند حالت سیستم مرتبه کامل، ورودی مرجع را دنبال می کند.

4-3- سناریوی سوم) کنترل کننده پیش بین تابعی مقید مرتبه کاهش یافته در حضور اغتشاش

در این قسمت تاثیر کنترل کننده پیش بین تابعی مقید مرتبه کاهش یافته را برای ورودی مرجع $70\% \leftarrow 90\% \leftarrow 80\% \leftarrow 90\%$ مقدار نامی توان هسته و در حضور سیگنال اغتشاش نشان داده شده در "شکل 9"، بررسی شده است. سپس در "شکل های 10-12" به ترتیب نمودار خروجی سیستم، نمودار حالت های سیستم و نمودار فرمان کنترلی نشان داده شده است. در "شکل 10" خروجی سیستم کاهش مرتبه یافته برای کنترل کننده پیش بین تابعی مقید و در حضور اغتشاش نشان داده شده است.

همان طور که در "شکل 10" مشاهده می شود کنترل کننده پیش بین تابعی مقید مرتبه کاهش یافته اغتشاش را به خوبی دفع نموده و مسیر مرجع را دنبال می کند. مشاهده می گردد که با وجود این که مدل سیستم کاهش داده شده است ولی خروجی همچنان مانند حالت سیستم مرتبه کامل، ورودی مرجع را دنبال می کند. در ادامه نمودار حالت های سیستم و فرمان کنترلی سیستم نشان داده شده است.

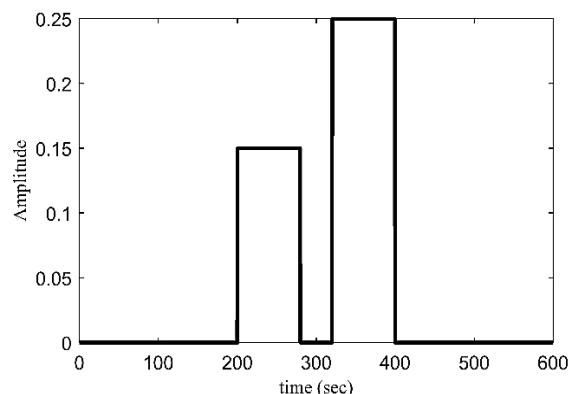


Fig. 9 Disturbance signal applied to the reduced order system

شکل 9 سیگنال اغتشاش اعمال شده به سیستم کاهش مرتبه یافته

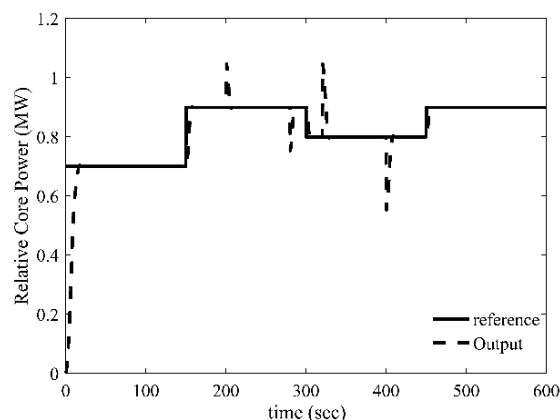


Fig. 10 The relative core power output of proposed control system for the third scenario

شکل 10 خروجی توان نسبی هسته سیستم کنترل پیشنهادی در سناریوی سوم

6- فهرست علائم

a	ضریب مقیاس بندی چندجمله ای لاگر
f_f	کسری از توان راکتور که در سوخت باقی مانده
G_r	مجموع واکنش پذیری میله کنترل
M	ظرفیت گرمایی دبی جرمی خنک کننده آب
N	تعداد ترم های چندجمله ای لاگر
n_r	چگالی نوترون نسبت به شرایط نامی
$P_a(t)$	توان واقعی هسته
P_0	توان نامی هسته
T_f	میانگین دمای سوخت
T_i	دمای مجرای خروجی خنک کننده آب
T_e	دمای ورودی خنک کننده آب
Z_r	سرعت میله کنترل
علائم یونانی	
α_c	ضریب واکنش پذیری خنک کننده آب
α_f	ضریب واکنش پذیری دمای سوخت
β	شکست نوترون های تاخیری موثر
λ	چگالی موثر ماده تشکیل شده جدید
μ_c	ظرفیت گرمایی خنک کننده آب
μ_f	ظرفیت گرمایی سوخت
ρ_r	واکنش پذیری
$\delta\rho_r$	واکنش پذیری تولید شده توسط حرکت میله کنترل
Λ	طول عمر نوترون های برانگیخته شده
Ω	ضریب انتقال حرارت میان سوخت و خنک کننده آب
ψ	ماتریس ضرایب چندجمله ای لاگر
Γ	چندجمله ای لاگر زمان گسسته
بالانویس ها	
T	تران هاده ماتریس
$*$	عملگر مزدوج مختلط
Δt	بازه نمونه برداری سیستم زمان گسسته

7- مراجع

- Conference Intelligent Systems, Slovenia, pp. 27-30, 2007.
- [8] M. Boroushaki, M. B. Ghofrani, C. Lucas, M. J. Yazdanpanah, N. Sadati, Axial offset control of PWR nuclear reactor using intelligent techniques, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 227, No. 3, pp. 285-300, 2004.
- [9] C. Lin, H. W. Lin, Application of fuzzy logic controller to load-follow operations in pressurized water reactors, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 31, No. 5, pp. 407-419, 1994.
- [10] H. L. Akin, V. Altin, Rule-based fuzzy logic controller for a PWR-type nuclear power plant, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol. 38, No. 2, pp. 883-890, 1991.
- [11] Z. Dong, Adaptive PD power-level control for pressurized water reactors, *Proceedings of the 19th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, Cape Town, South Africa, August 24-29, 2014.
- [12] M. N. Khajavi, M. B. Menhaj, A.A. Suratgar, A neural network controller for load following operation of nuclear reactors, *Annals Nuclear Energy*, Vol. 29, No. 6, pp. 751-760, 2002.
- [13] H. Eliasi, M. B. Menhaj, H. Davilu, Robust nonlinear model predictive control for nuclear power plants in load following operations with bounded xenon oscillations, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, No. 2, pp. 533-543, 2011.
- [14] G. Wang, J. Wu, B. Zeng, Z. Xu, W. Wu, X. Ma, State-space model predictive control method for core power control in pressurized water reactor nuclear power stations, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 49, No. 2, pp. 1-7, 2016.
- [15] M. A. F. Martins, D. Odloak, A robustly stabilizing model predictive control strategy of stable and unstable processes, *Automatica*, Vol. 67, No. 1, pp. 132-143, 2016.
- [16] M. Ghorbani, S. K. Hosseini Sani, Nonlinear model predictive control of Stewart platform 6 dof, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 41-50, 2016. (in Persian)
- [17] M. Shabbazzadeh, S. J. Sadati Rostami, S. Minagar, Designing model predictive control for trajectory tracking of a wheeled mobile robot using laguerre functions and exponential data weighting, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 20-28, 2017. (in Persian)
- [18] M. Alizadeh, M. Ebrahimi Dormiyani, M. Noori Dabir, Model predictive and adaptive controller design of Tri-Tilt rotor VTOL UAV by using multi-body modeling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 179-189, 2017. (in Persian)
- [19] N. bigdeli, The design of non-minimal state space fractional-order predictive functional controller for fractional systems of arbitrary order, *Journal of Process Control*, Vol. 29, No. 1, pp. 45-56, 2015.
- [20] E. J. Davison, A method for simplifying linear dynamic systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 11, No. 1, pp. 93-101, 1966.
- [21] G. Obinata, B. D. O. Anderson, *Model Reduction for Control System Design*, pp. 1-60, London, Springer Verlag, 2001.
- [22] H. Nasiri Soloklo, R. Haj Mohammadi, M. M. Farsangi, Model order reduction based on moment matching using legendre wavelet and harmony search algorithm, *Iranian Journal of Science and Technology*, Vol. 39, No. 1, pp. 39-54, 2015.
- [23] H. Nasiri Soloklo, M. M. Farsangi, Chebyshev rational functions approximation for model order reduction using harmony search, *Scintia Iranica*, Vol. 20, No. 3, pp. 771-777, 2013.
- [24] B. C. Moore, Principal component analysis in linear systems: controllability, observability and model reduction, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 26, No.1, pp. 17-32, 1981.
- [25] Z. Dong, A neural-network-based nonlinear adaptive state-observer for pressurized water reactors, *Chinese Automation Congress*, Chengsha, China, November 7-8, 2013.
- [26] M. A. Schultz, *Control of Nuclear Reactors and Power Plants*, Second Edition, pp. 124-186, New York: McGraw-Hill, 1955.
- [27] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB*, pp. 85-147, London: Springer, 2009.
- [28] B. Kouvaritakis, M. Cannon, *Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic*, pp. 13-64, Switzerland: Springer, 2015.
- [29] B. Wahlberg, System identification using laguerre models, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 36, No. 5, pp. 551-562, 1991.
- [30] N. L. Ricker, Model predictive control: state of the art, *Proceedings of the Fourth International. Conference Chemical Process Control*, Padre Island, TX, pp. 271-296, 1991.
- [31] L. Wang, Discrete model predictive controller design using laguerre functions, *Process Control*, Vol. 14, No. 2, pp.131-142, 2004.
- [32] F. Borrelli, A. Bemporad, M. Morari, *Predictive Control for Linear and Hybrid Systems*, pp. 29-32, United Kingdom: Cambridge University Press, 2017.
- [33] S. Boyd, N. Vandenberghe, *Convex Optimization*, pp. 241-249, New York: Cambridge University Press, 2004.
- [1] P. Elkmann, *Emergency Planning for Nuclear Power Plants*, pp. 1-17, Baton Rouge: CRC Press, 2017.
- [2] S. H. Qaiser, A. I. Bhatti, M. Iqbal, R. Samar, J. Qadir, Model validation and higher order sliding mode controller design for a research reactor, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 36, No. 1, pp. 37-45, 2008.
- [3] G. R. Ansarifar, S. Saadatzi, Nonlinear control for core power of pressurized water nuclear reactors using constant axial offset strategy, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 7, pp. 838-848, 2015.
- [4] G. Li, Modeling and LQR/LTR control for power and axial power difference of load follow PWR core, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 68, No. 1, pp. 193-203, 2014.
- [5] G. R. Ansarifar, H. R. Akhavan, Sliding mode control design for a PWR nuclear reactor using sliding mode observer during operation, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 75, No. 1, pp. 611-619, 2015.
- [6] G. R. Ansarifar, M. Rafiei, Second-order sliding-mode control for a pressurized water nuclear reactor considering the xenon concentration feedback, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 94-101, 2015.
- [7] S. S. Khoramabadi, M. Boroushaki, Intelligent control of nuclear reactors using emotional learning, *Proceedings of the 10th Information Society*