

کنترل سطح مخازن با اعمال کنترل کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر مدل مقاوم مبتنی بر بهینه‌سازی ناهمزمان

علیرضا ادهمی*

کارشناس ارشد مهندسی برق - کنترل، شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران، تهران، ایران

دریافت: ۹۳/۴/۹ پذیرش: ۹۴/۴/۱۷

چکیده

در این پژوهش، یک مقوله کاربردی از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل مقاوم به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته در سیستم‌های کنترل عملیات مرتبط با صنایع نفت، گاز و پتروشیمی بررسی می‌شود. به‌طوری‌که کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل تنها روش کنترلی مدرنی است که کاربردی اساسی را در مسائل کنترل صنعتی ایجاد کرده‌است و موفقیت اصلی‌اش به‌علت قابلیت بی‌نظیرش برای به‌کاربردن ساده و مؤثر قیود سخت روی متغیرهای حالت و کنترل است؛ اما کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل دارای چالشی اساسی است؛ به‌طوری‌که نامعینی‌های مدل را نمی‌تواند بررسی کند. بنابراین بهترین راه‌حل، استفاده از روش کنترل پیش-بین مبتنی بر مدل مقاوم است. در این مقاله، محاسبات ناهمزمان با دنباله‌های مجموعه ثابت چندوجهی قوانین کنترل فیدبک حالت با کمینه‌سازی هزینه عملکرد به روش بهینه‌سازی نامساوی‌های ماتریسی خطی را به‌دست می‌آورند. سیستم انتخاب شده غیرخطی، چندمتغیره، دارای قید در ورودی و خروجی و همچنین نامعینی است که با اعمال روش کنترلی پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار متلب پایدار می‌گردد.

کلمات کلیدی: کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل مقاوم، نامعینی، ناهمزمان، چندوجهی، نامساوی‌ماتریسی-خطی.

مقدمه

به همراه تکامل تدریجی فن‌آوری و نیاز صنعت به سیستم‌های خودکار اجرای روش‌های کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل^۱ یا کنترل افق رو به عقب^۲ مورد توجه چشمگیری قرار گرفته‌است. در این تکنیک‌های کنترلی فرمان با کمینه‌سازی شاخص عملکرد مربعی مقید^۳ در افق رو به عقب به‌صورت همزمان با برتری

*alirezaadhami3@gmail.com

¹Model-based predictive control(MPC)

²Receding horizon control(RHC)

³Constrained

مواجهه با قيود ورودی و قيود خروجی تعیین می‌گردند. آگوریتم MPC روش کنترلی مؤثر و مفیدی است که از آن به‌طور گسترده در صنایع فرآیندهای شیمیایی استفاده می‌شود؛ به‌طوریکه در هر لحظه‌ی نمونه-برداری از مدل فرآیند تخمینی برای حل مسئله بهینه‌سازی^۱ [۱] حلقه‌باز ایجاد می‌گردد. هر چند در پیش فرض کنترل بهینه محاسبه می‌شود ولی فقط اولین ورودی محاسبه شده به فرآیند اعمال می‌گردد. مقاوم-سازی قانون‌های MPC در سال‌های اخیر به‌صورت چشمگیری رشد یافته است [۲]. برای فائق آمدن بر نامعینی^۲ یا عدم قطعیت یا نایقینی‌های مدل سیستم (دینامیک‌های مدل نشده، غیرخطی‌نگی^۳ ها، اغتشاشات، نویز و غیره) از راه‌کار استراتژی MPC مقاوم^۴ استفاده می‌گردد؛ اما بار محاسباتی زیاد این تکنیک همزمان^۵ چالش برانگیز است و بعضی اوقات مانع از کاربردهای فیزیکی و عملی آن می‌شود. در RMPC [۳] برای سیستم‌های گسسته چندوجهی (ضابطه‌ای)^۶ نامعین با مجموعه‌های هدف بیضوی ارائه شد تا حالت‌های بعدی با استفاده از دنباله‌های مجموعه بیضوی^۷ پیش‌بینی شود و آشفتگی^۸ روی کنترل ورودی در طراحی کنترل‌کننده به‌منظور شدنی بودن^۹ و پایداریمقاوم^{۱۰} توسعه داده شد. در این مقاله کنترل‌کننده مقاوم برای پایداری سیستم‌های گسسته نامعین با حوزه نامعینی چندوجهی محدب^{۱۱} پیشنهاد می‌گردد. تکنیک RMPC همزمان [۴] با نامعینی ساختاریافته^{۱۲} برای فرآیندهای دینامیکی کند استفاده می‌شود؛ بنابراین RMPC ناهمزمان پیشنهاد خوبی برای سرعت بخشیدن به محاسبات و فرآیندهای سریع محسوب می‌گردد. در روش ناهمزمان بیضوی تقریب‌ها خیلی محافظه‌کارانه عمل می‌کنند و به‌عبارت دیگر ناحیه قابل پایداری^{۱۳} کوچک‌تری نسبت به تکنیک پیشنهادی این مقاله دارند؛ بنابراین مجموعه‌های ثابت چندوجهی در قالب دنباله‌ی قوانین کنترل فیدبک حالت^{۱۴} به‌صورت ناهمزمان محاسبه آن‌گاه کوچک‌ترین مجموعه ثابت چندوجهی شامل حالت اندازه‌گیری شده مشخص و در نهایت فرمان خودکار به فرآیند اعمال می‌گردد.

روش تحقیق: تفاوت تکنیک MPC با تکنیک‌های دیگر در این است که مسئله کنترل بهینه همزمان، خط سیر آینده را برای حالت زمان جاری واحد صنعتی به جای تعیین ناهمزمان روش فیدبک حل می‌کند. معمولاً MPC به‌عنوان MPC مقید معرفی شده و نسبتاً به‌علت عمومیتش در صنعت مورد توجه است و پایه

¹Optimization problem

²Uncertainty

³Nonlinearity

⁴Robust MPC

⁵On-line

⁶Polytopic discrete systems

⁷Ellipsoidal

⁸Perturbation

⁹Feasibility

¹⁰Robust stability

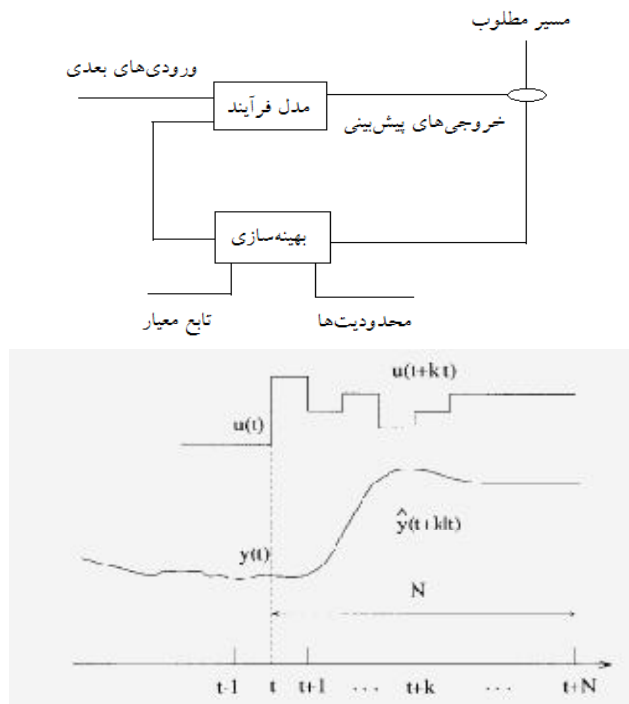
¹¹Convex

¹²Structured

¹³Stabilizable region

¹⁴State feedback control laws sequence

نظری خوش ساختاری برای برآورده شدن پایداری و شدنی بودن تکنیک کنترلی ارائه داده است. این روش از سال ۱۹۷۶ آغاز گردیده است و روش‌های پیشرفته در طراحی آن سیستم‌ها از اواسط سال ۱۹۹۰ توسعه یافته است. راه کار MPC استفاده از یک مدل تخمینی از سیستم جهت پیش‌بینی خروجی آینده فرآیند و کمینه کردن یک تابع هدف مربعی^۱ جهت ایجاد سیگنال کنترل و به دست آوردن سیگنال کنترل بهینه در هر لحظه است. در الگوریتم MPC مسیر مطلوب به اندازه‌ها^۲ پیش‌بین^۲ از قبل مشخص شده استحال بایستی سیگنال‌های کنترلی را به گونه‌ای تنظیم کرد که خروجی پیش‌بینی شده تا حد امکان به مسیر مطلوب نزدیک گردد. در این روش خروجی کنترل‌کننده برای چند نمونه بعدی محاسبه و از اولین مؤلفه برای کنترل عملیات در لحظه نمونه برداری جاری t استفاده می‌گردد؛ آنگاه در لحظه نمونه برداری بعدی $t+1$ کلیه مراحل ذکر شده با استفاده از آخرین اطلاعات اندازه‌گیری شده تکرار می‌گردند. از مزایای دیگر MPC می‌توان برخورد روشمند با قیود و در نظر گرفتن آن‌ها در حین طراحی کنترل‌کننده، ساده و قابل فهم بودن روش، قابلیت تعمیم به حالت چندمتغیره بدون تغییر زیاد، قابل اعمال به دسته وسیعی از فرآیندها مانند سیستم‌های تأخیردار، ناکمینه فاز و ناپایدار و تنظیم ساده پارامترها نام برد. به‌طور خلاصه اساس کار کنترل‌کننده‌های MPC طبق شکل ۱ به دست آوردن مدلی از فرآیند برای پیش‌بینی خروجی‌های بعدی، محاسبه سیگنال‌های کنترل از طریق کمینه‌سازی یک تابع هدف و انتقال افق پیش‌بین به سمت جلو می‌توان بیان کرد.



شکل ۱. ساختار کلی و تکنیک MPC

¹Quadratic objective function

²Prediction horizon

RMPC: کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی جدید و دارای مشخصات و خصوصیات و قابلیت ذاتی و تضمین برای برآورده‌شدن پایداری و حذف اغتشاش را به همراه دارد. یکی از مسائل مهم برای مدل‌سازی^۱ سیستم‌های فیزیکی این است که پارامترهای مورد استفاده در مدل‌ها نمی‌توانند با دقت مطلق تعیین شوند و پارامترهای نادقیق ناشی از فاکتورهای مختلف بسیاری‌اند و مقادیر پارامترها شاید با زمان یا تأثیرات گوناگون تغییر پیدا کنند. این تفاوت‌های مابین مدل سیستم و سیستم واقعی نامعینی نامیده می‌شوند. به طوری که پارامترهای سیستم واقعی در طول عملیات یا سیگنال ورودی در زمانی که خیلی بزرگ شود، مدل خطی قادر به نشان-دادن سیستم واقعی نیست و مشکلات عملی‌ای ایجاد خواهد شد. علی‌هذا سیستم دارای نامعینی‌های متعدد لازم است پایداری‌اش در تمام حوزه‌های نامعینی صدق کند؛ بنابراین محدوده‌ی مقاومی لازم است تا پایداری مقاوم که از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است برآورده گردد [۵].

توصیف مسئله: مدل مورد مطالعه و مورد بررسی سیستم متغیر با زمان خطی با نامعینی چندوجهی ذیل را به همراه دارد.

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) \quad (۱)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (۲)$$

به طوری که $x(k)$ حالت سیستم و $u(k)$ ورودی کنترلی و $y(k)$ خروجی سیستم می‌باشد. فرض می‌کنیم که

$$[A(k), B(k)] \in \Omega \quad , \quad \Omega = Co \{ [A_1, B_1], [A_2, B_2], \dots, [A_L, B_L] \} \quad (۳)$$

به طوری که Ω چندوجهی و Co به بدنه محدب اشاره دارد و $[A_j, B_j]$ رئوس بدنه محدب هستند. هر $[A(k), B(k)]$ درون چندوجهی Ω ترکیب خطی رئوس هستند.

$$[A(k), B(k)] = \sum_{j=1}^L \Lambda_j [A_j, B_j], \quad \sum_{j=1}^L \Lambda_j = 1 \quad , \quad 0 \leq \Lambda_j \leq 1 \quad (۴)$$

هدف یافتن قانون کنترلی فیدبک حالت ذیل است.

$$u(k+i|k) = Kx(k+i|k) \quad (۵)$$

به طوری که سیستم متغیر با زمان خطی مذکور را پایدار کند و به هزینه عملکرد نامی ذیل دست یابد.

$$\min_{u(k+i|k), 0 \leq i} \max J_{n,\infty}(k) \quad (۶)$$

$$J_{n,\infty}(k) = \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} x(k+i|k) \\ u(k+i|k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Theta & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k+i|k) \\ u(k+i|k) \end{bmatrix} \quad (۷)$$

¹Modeling

در $\min_{u(k+i|k), 0 \leq i} \max J_{n,\infty}(k)$ که مسئله کمینه - بیشینه نامیده می‌شود بیشینه روی مجموعه Ω و مرتبط با انتخاب سیستم متغیر با زمان است که اگر به‌عنوان مدلی برای پیش‌بینی‌ها استفاده شود به بزرگ‌ترین مقدار یا بدترین حالت $J_{n,\infty}(k)$ از میان کلیه سیستم‌ها در Ω می‌رود. این مقدار بدترین حالت روی فرمان کنترلی بعدی کمینه می‌شود.

به‌طوریکه $\Theta > 0$ و $R > 0$ ماتریس‌های وزن متقارن در معرض قیود ورودی و خروجی می‌باشند.

$$|u_h(k+i|k)| \leq u_{h,\max}, h = 1, 2, 3, \dots, n_u \quad (۸)$$

$$|y_r(k+i|k)| \leq y_{r,\max}, r = 1, 2, 3, \dots, n_y \quad (۹)$$

آلگوریتم RMPC مقید ناهمزمان چندوجهی بر اساس بهینه‌سازی نامساوی‌های ماتریسی خطی^۱

زمان محاسباتی همزمان با پیش‌محاسبه‌ی ناهمزمان دنباله قوانین کنترلی فیدبک حالت کم‌تر می‌شود و بهره‌های فیدبک حالت محاسبه شده با کمینه‌سازی هزینه عملکرد برای بهبود بخشیدن به عملکرد کنترلی ایجاد می‌گردند. اگر $x(k) \in S$ و $\forall i = 1, 2, \dots, \infty x(k+i) \in S$ باشد آن‌گاه به $S = \{x | Mx \leq d\}$ مجموعه ثابت چندوجهی گفته می‌شود. آلگوریتم RMPC ناهمزمان با استفاده از مجموعه‌های ثابت چندوجهی عبارت است از دنباله بهره‌های فیدبک حالت مربوطه به دنباله مجموعه‌های ثابت بیضوی با کمینه‌سازی هزینه عملکرد محاسبه و بعد از آن دنباله مجموعه‌های ثابت چندوجهی در مرحله دوم ساخته می‌شود [۶]. به‌جای این‌که به‌طور مستقیم در آلگوریتم پیشنهادی از دنباله مجموعه‌های ثابت بیضوی استفاده شود، عملکرد کنترلی با ایجاد دنباله مجموعه‌های ثابت چندوجهی در مرحله دوم ساخته می‌شود.

در این روش به‌جای کمینه‌کردن $J_{n,\infty}(k)$ یک باند بالایی $J_{n,\infty}(k)$ کمینه می‌گردد. این باند بالایی را با قانون کنترل فضای حالت کمینه می‌کنیم آنگاه تحقق قانون کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در ترم حل‌های قابل اجرا برای نامساوی ماتریسی خطی نشان می‌دهیم.

$$\min_{u(k+i|k), 0 \leq i} \max J_{n,\infty}(k) \Rightarrow \min V(x(k)) = x(k)^T P x(k) \leq \lambda \leftrightarrow \min \lambda \quad (۱۰-۱)$$

مرحله ۱: دنباله حالت‌های $\{1, 2, \dots, N\}$ و $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ انتخاب می‌شود. برای هر x_i مسئله بهره فیدبک حالت مربوط به

$$k_i = Y_i Q_i^{-1} \quad (۱۰-۲)$$

^۱Linear matrix inequalities (LMI)

حل می‌شود؛ به‌طوریکه Q_i و Y_i متغیرهای ماتریسی و $\lambda_{n,i}$ باند فوقانی^۱ هزینه عملکرد نامی باشند. حالت-های x_i بایستی طوری انتخاب شوند که فاصله مابین x_{i+1} و مبدأ از فاصله مابین x_i و مبدأ کم‌تر باشد.

$$\text{Min } \lambda_{n,i} \quad (11)$$

$$\lambda_i, Q_i$$

$$\text{s.t.} \begin{bmatrix} 1 & * \\ x_i & Q_i \end{bmatrix} \geq 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} Q_i & * & * & * \\ AQ_i + BY_i & Q_i & * & * \\ \Theta^{0.5} Q_i & 0 & \lambda_{n,i} I & * \\ R^{0.5} Y_i & 0 & 0 & \lambda_{n,i} I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} Q_i & * \\ AQ_i + BY_i & Q_i \end{bmatrix} > 0, \forall j = 1, 2, \dots, L \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} X & * \\ Y_i^T & Q_i \end{bmatrix} \geq 0, X_{hh} \leq u_{h,\max}^2, h = 1, 2, \dots, n_u \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} S & * \\ (AQ_i + BY_i)^T C^T & Q_i \end{bmatrix} \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, L, S_{rr} \leq y_{r,\max}^2, r = 1, 2, \dots, n_y \quad (16)$$

مرحله ۲

دنباله بهره‌های فیدبک حالت $k_i = Y_i Q_i^{-1}$ و $i = 1, 2, \dots, N$ از مرحله ۱ به‌دست می‌آید. جهت هر k_i مجموعه ثابت چندوجهی مربوطه $S_i = \{x | M_i x \leq d_i\}$ با استفاده از مراحل ذیل ساخته می‌شود:

$$M_i = [C^T, -C^T, K_i^T, -K_i^T]^T, d_i = [y_{\max}^T, y_{\min}^T, u_{\max}^T, u_{\min}^T]^T, m = 1 \quad (17)$$

ردیف m را از (M_i, d_i) انتخاب می‌نمائیم و برای هر z چک می‌کنیم که آیا $M_{i,m} (A_j + B_j K_i) x \leq d_{i,m}$ رعایت قیود تعریف شده با (M_i, d_i) به‌واسطه حل کردن مسئله ذیل تکراری است یا نه؟

$$\text{Max } W_{i,m,j} \quad (18)$$

$$x$$

$$\text{s.t. } W_{i,m,j} = M_{i,m} (A_j + B_j K_i) x - d_{i,m} \quad (19)$$

¹Upper band

$$M_i x \leq d_i \quad (20)$$

اگر $W_{i,m,j} > 0$ قید $M_{i,m} (A_j + B_j K_i) x \leq d_{i,m}$ با رعایت (M_i, d_i) غیر تکراری است. بعد از آن قیود غیر تکراری (M_i, d_i) را با تعیین کردن ذیل جمع می‌کنیم.

$$M_i = [M_i^T, (M_{i,m} (A_j + B_j K_i))^T]^T, d_i = [d_i^T, d_{i,m}^T]^T \quad (21)$$

$m = m + 1$ قرار می‌دهیم و به مرحله قبل برمی‌گردیم، اگر m اکیدا بزرگ‌تر از شماره ردیف‌های (M_i, d_i) باشد بعد از آن الگوریتم خاتمه می‌یابد.

نتایج و بحث

سیستم کنترل سطح مایع در مخازن برای سیستم‌ها و فرآیندهای مرتبط با نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع شیمیائی و صنایع تولید کاغذ قابل‌تعمیم و قابل بهره‌برداری است و از نتایج عملی آن، در مخازن ذخیره-سازی مواد نفتی در شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران^۱ بهره‌برداری می‌گردد. سیستم دو مخزن^۲ و چهار مخزن^۳ که مانند مدلی از سیستم‌های فرآیند شیمیائی یا مخلوط کردن سیالات ظاهر می‌شوند جهت ارزیابی عملکرد RMPC پیشنهادی تحت شرایط متعدد و مختلف مورد استفاده واقع می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در مثال عددی‌ای^۴ که پاسخ مشابه برای سیستم واقعی دارد، به‌دست آمده و هدف تنظیم h_2 به مبدأ توسط u است. روش پیشنهادی به سیستم دو مخزن با معادلات ذیل، اعمال می‌شود [۷].

$$\rho * S_1 * \frac{dh_1}{dt} = -\rho * A_1 * \sqrt{2 * g * h_1} + u \quad (22)$$

$$\rho * S_2 * \frac{dh_2}{dt} = \rho * A_1 * \sqrt{2 * g * h_1} - \rho * A_2 * \sqrt{2 * g * h_2} \quad (23)$$

مدل گسسته با گسسته‌سازی معادلات فوق با زمان نمونه‌برداری یک دهم ثانیه به‌دست می‌آید. h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع سیال در مخزن شماره ۱ و شماره ۲ می‌باشد و Area1 و Area2 سطح مقطع مخازن فرکانس $N=f/d_t$ ، $f=120$ ، افق پیش‌بین $x = \begin{bmatrix} -10 \\ -39 \end{bmatrix}$ ، حالت اولیه $i_t = 0$ ، زمان اولیه $g = 980$ ، Area1=9، Area2=4، $S_1=2500$ $S_2=1600$ ، پارامتر تنظیم، $QQ = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ، $R = [0.01]$ ، $\rho = 0.001$ ، $h_{1min}=14-13$ ، $h_{1max}=14+13$ ، $h_{2min}=70-50$ ، $h_{2max}=70+50$.

¹National Iranian Oil Refining and Products Distribution Company

²Two -tank system

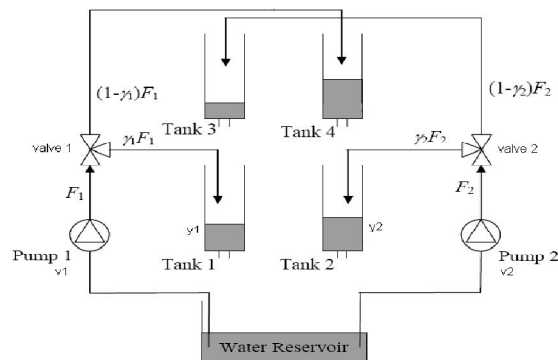
³Quadruple-tank process

⁴Numerical example

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -\rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1min}/(\rho \cdot S1) & 0 \\ \rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1min}/(\rho \cdot S2) & -\rho \cdot \text{Area2} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h2min}/(\rho \cdot S2) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} 0.9841 & 0 \\ 0.2490 & 0.9975 \end{bmatrix} = A_1 \\ & \begin{bmatrix} -\rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1max}/(\rho \cdot S1) & 0 \\ \rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1max}/(\rho \cdot S2) & -\rho \cdot \text{Area2} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h2min}/(\rho \cdot S2) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} 0.9969 & 0 \\ 0.0048 & 0.9975 \end{bmatrix} = A_2 \\ & \begin{bmatrix} -\rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1min}/(\rho \cdot S1) & 0 \\ \rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1min}/(\rho \cdot S2) & -\rho \cdot \text{Area2} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h2max}/(\rho \cdot S2) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} 0.9841 & 0 \\ 0.2490 & 0.9990 \end{bmatrix} = A_3 \\ & \begin{bmatrix} -\rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1max}/(\rho \cdot S1) & 0 \\ \rho \cdot \text{Area1} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h1max}/(\rho \cdot S2) & -\rho \cdot \text{Area2} \cdot \sqrt{2 \cdot g/h2max}/(\rho \cdot S1) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} 0.9969 & 0 \\ 0.0048 & 0.9994 \end{bmatrix} = A_4, B = \begin{bmatrix} dt \cdot 1/(\rho \cdot S1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.04 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

و A_1 و A_2 و A_3 و A_4 نامعینی‌های مدل تعیین گردیده است.

اغلب مسایل کنترل در صنعت غیرخطیو دارای چند متغیر کنترلی می‌باشند که همگی آن‌ها دارای خواص و صفات مشترک جهت مدل‌های عملیات‌های صنعتی هستند و دارای نامعینی‌های اساسی و مهم، تداخل قوی و رفتار غیرکمیینه فاز دارند؛ از این‌رو برای مهندسین سیستم‌های کنترل و فرآیند انجام آزمایش‌هایی با دستگاه‌های آزمایشگاهی خوب و مناسب مهم و حیاتی است [۸]. سیستم چهارمخزن سیستمی چندمتغیره شامل چهارمخزن به هم متصل آب و دو پمپ است؛ به‌طوری‌که دینامیک‌های خطی‌شده سیستم دارای صفر چندمتغیره‌ای است که با جابه‌جایی در طول محور حقیقی توسط تغییردادن شیر ایجاد می‌گردد. ورودی‌های این سیستم ولتاژهای دو پمپ و خروجی‌ها سطوح آب در دو مخزن پائینی می‌باشند. این سیستم دستگاه آزمایشگاهی چندمتغیره مخازن به هم متصل با دینامیک‌های غیرخطی و در معرض قیود حالت و قیود ورودی است [۹]. سطوح آب در مخزن شماره ۱ و مخزن شماره ۲ توسط پمپ‌ها کنترل می‌شوند و موقعیت-های شیرهای کنترلی محل صفر چندمتغیره برای مدل خطی‌شده را تعیین می‌کنند. هدف کنترل سطح در دو مخزن پایینی با استفاده از دو پمپ است و ورودی‌های فرآیند v_1 و v_2 (ولتاژهای ورودی پمپ‌ها) و خروجی‌ها y_1 و y_2 می‌باشند (ولتاژهای تجهیزات اندازه‌گیری سطح).



شکل ۲. دیاگرام سیستم چهارمخزن

طبق قانون موازنه جرم و برنولی چهار معادله غیرخطی بدست می‌آیند:

$$\frac{d_{h1}}{d_t} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} v_1 \quad (24)$$

$$\frac{d_{h2}}{d_t} = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} v_2 \quad (25)$$

$$\frac{d_{h3}}{d_t} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} v_2 \quad (26)$$

$$\frac{d_{h4}}{d_t} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} v_1 \quad (27)$$

به طوری که A_i سطح مقطع مخزن i و a_i سطح مقطع مجرای خروجی و h_i سطح آب می‌باشند و ولتاژ اعمالی به پمپ i ، v_i و جریان مربوطه $k_i v_i$ تعیین گردیده است. پارامترهای $\gamma_1, \gamma_2 \in (0,1)$ از چگونگی تنظیم شیرهای کنترلی جهت آزمایش حکایت دارد و جریان مخزن شماره ۱، $\gamma_1 k_1 v_1$ و جریان مخزن شماره ۴، $(1-\gamma_1)k_1 v_1$ و به طور مشابه جهت مخزن شماره ۲ و مخزن شماره ۳ جریان‌ها تعیین می‌گردند. شتاب گرانش با g نمایش داده می‌شود و سیگنال‌های سطح اندازه‌گیری شده، $k_c h_1$ و $k_c h_2$ می‌باشند. نقاط کار انتخابی برابر مقادیر پارامتری طبق ذیل انتخاب می‌شوند:

$$x_i := h_i - h_i^0 \quad \text{سیستم غیر کمینه‌فاز} \quad 0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1 \quad \text{سیستم کمینه‌فاز} \quad 1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$$

و $v_i := v_i - v_i^0$ را معرفی می‌نماییم.

$$\frac{d_x}{d_t} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{k_{d1}}{A_3} & 0 \\ 0 & -\frac{k_{d2}}{A_4} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$y = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (29)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \text{ و } \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} \text{ و } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

سیستم خطی شده فوق، جهت سیستم چهارمخزن نامعینی با تغییر وضعیت شیر کنترلی γ_1 یا γ_2 بررسی می‌گردد و حوزه نامعینی توسط سه نقطه کار ذیل در نواحی کمینه‌فاز و غیر کمینه‌فاز مشخص می‌شود [۱۰].

در ناحیه کمینه‌فاز $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$: در ناحیه غیر کمینه‌فاز $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$:

مقادیر عددی پارامترهای فرآیند آزمایشگاهی سیستم چهارمخزن شامل ماتریس‌های B_1 و B_2 و B_3 و A و C و D در ناحیه غیر کمینه‌فاز به صورت ذیل انتخاب می‌گردد:

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0.0012 \\ 0.0006 & 0.0028 \\ 0 & 0.0250 \\ 0.0264 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0.0076 & 0.0012 \\ 0.0005 & 0.0028 \\ 0 & 0.0250 \\ 0.0205 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0.0009 \\ 0.0006 & 0.0084 \\ 0 & 0.0195 \\ 0.0264 & 0 \end{bmatrix} \quad D = 0$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0.8541 & 0 & 0.0856 & 0 \\ 0 & 0.9100 & 0 & 0.0456 \\ 0 & 0 & 0.8883 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9473 \end{bmatrix}$$

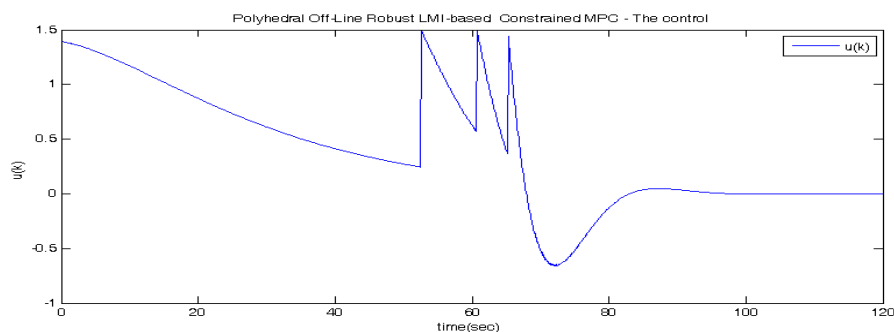
و مقادیر عددی ماتریس‌های B_1 و B_2 و B_3 و A و C و D سیستم چهار مخزن در ناحیه کمینه‌فاز به صورت ذیل است:

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0.0202 & 0.0003 \\ 0.0001 & 0.0225 \\ 0 & 0.0056 \\ 0.0059 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0.0101 & 0.0003 \\ 0.0004 & 0.0225 \\ 0 & 0.0056 \\ 0.0176 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0.0202 & 0.0008 \\ 0.0001 & 0.0113 \\ 0 & 0.0167 \\ 0.0059 & 0 \end{bmatrix}$$

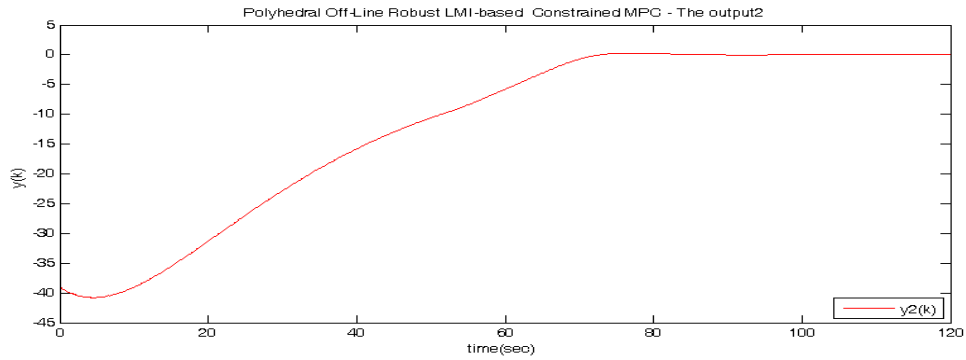
$$D = 0 \quad C = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0.8541 & 0 & 0.0856 & 0 \\ 0 & 0.9100 & 0 & 0.0456 \\ 0 & 0 & 0.8883 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9473 \end{bmatrix}$$

جدول ۱. مقادیر عددی پارامترهای سیستم چهارمخزن

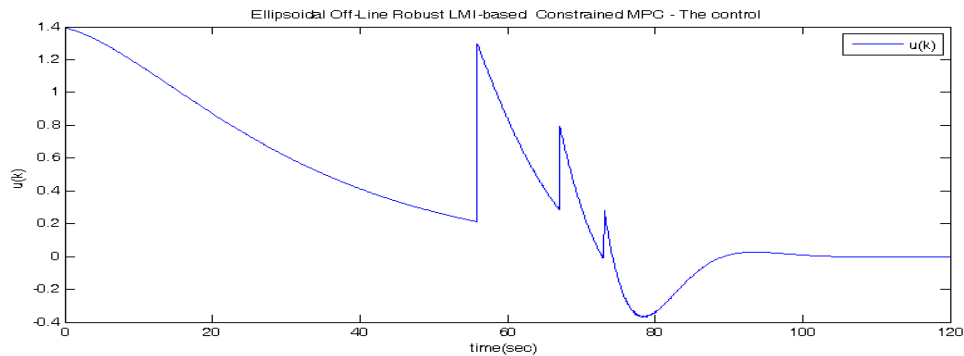
$a_1 = 2.3\text{cm}^2$ $a_2 = 2.3\text{cm}^2$ $a_3 = 2.3\text{cm}^2$ $a_4 = 2.3\text{cm}^2$ a_i سطح مقطع مجرای خروجی	$k_1 = 398.9 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ $k_2 = 356.964 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$	شتاب گرانش با g $g = 981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ $k_c = 0.5 \frac{\text{v}}{\text{cm}}$	$v_1(0) = 0.6$ $v_2(0) = 0.6$ ولتاژ اعمالی به پمپ i v_i
$A_1 = 730\text{cm}^2$ $A_2 = 730\text{cm}^2$ $A_3 = 605.17\text{cm}^2$ $A_4 = 661.672\text{cm}^2$ A_i سطح مقطع مخزن i	$QQ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $R = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 \end{bmatrix}$ Tuning parameter	$T_1 = 0.317\text{sec}$ $T_2 = 0.53\text{sec}$ $T_3 = 0.422\text{sec}$ $T_4 = 0.9235\text{sec}$	$h_1(0) = -5\text{cm}$ $h_2(0) = -20\text{cm}$ $h_3(0) = -10\text{cm}$ $h_4(0) = -39\text{cm}$ Initial states h_i سطح آب
In nonminimum phase region $\gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.3 : \text{WP}_1$ $\gamma_1 = 0.3, \gamma_2 = 0.1 : \text{WP}_2$ $\gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.1 : \text{WP}_3$	In minimum phase region $\gamma_1 = 0.4, \gamma_2 = 0.8 : \text{WP}_1$ $\gamma_1 = 0.8, \gamma_2 = 0.4 : \text{WP}_2$ $\gamma_1 = 0.8, \gamma_2 = 0.8 : \text{WP}_3$	$f = 60\text{Hz}$ Prediction horizontal = 1200 $it=0$ (Initial time)	$T_s = 0.05\text{sec}$



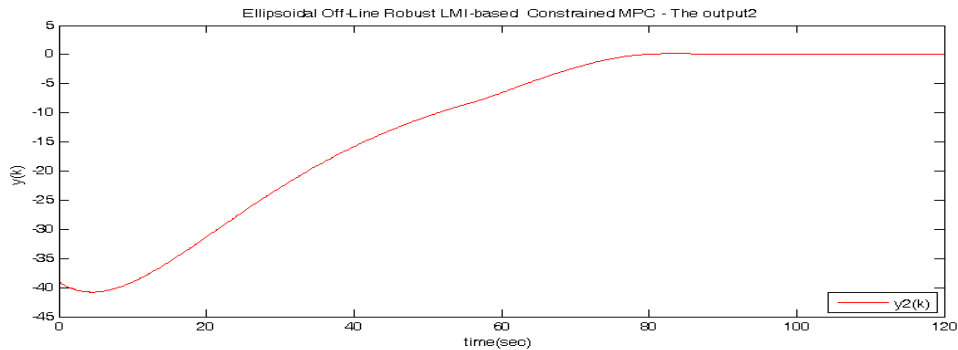
شکل ۳. کنترل کننده ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی-خطی - سیگنال کنترل - سیستم دو مخزن



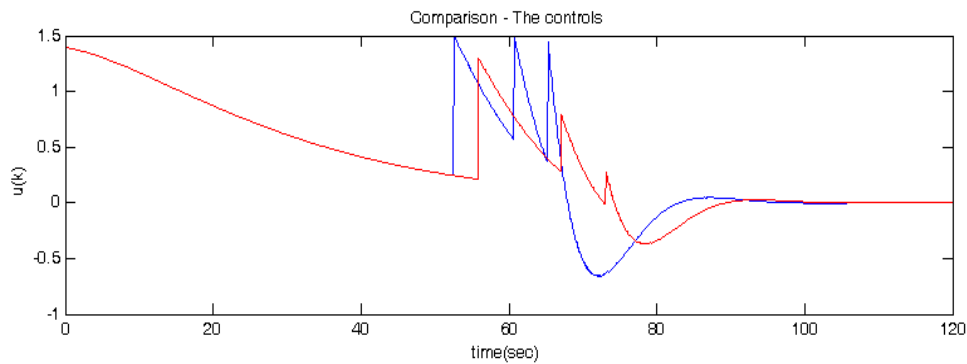
شکل ۴. کنترل کننده ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی - خطی - سیگنال خروجی ۲- سیستم دو مخزن



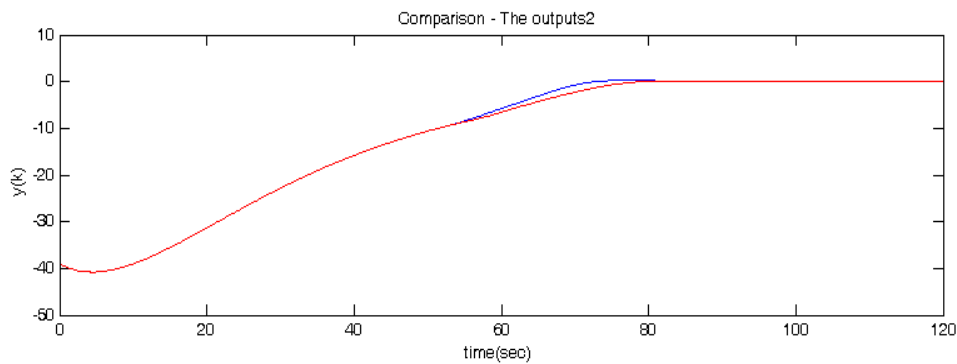
شکل ۵. کنترل کننده ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم بیضوی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - سیگنال کنترل - سیستم دو مخزن



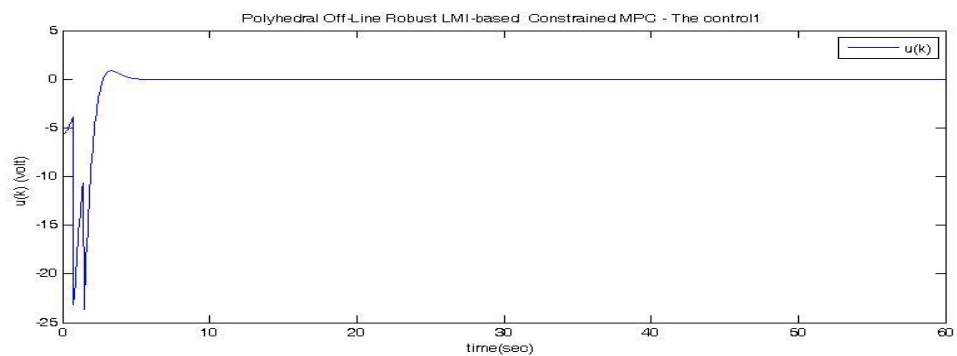
شکل ۶. کنترل کننده ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم بیضوی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - سیگنال خروجی ۲- سیستم دو مخزن



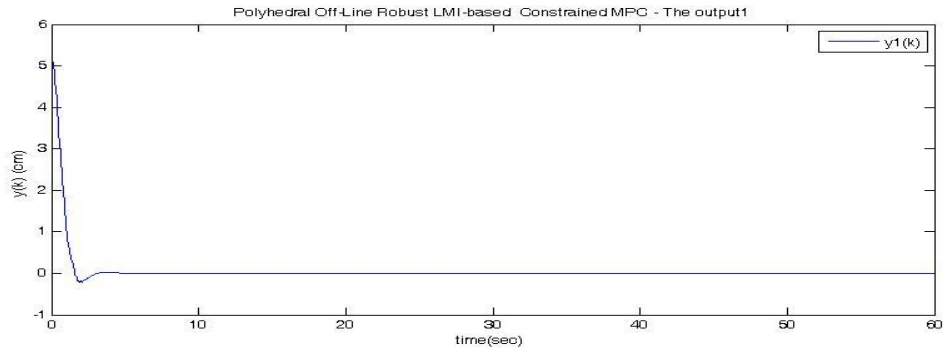
شکل ۷. مقایسه کنترل کننده‌های ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی و بیضوی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - سیگنال‌های کنترل - سیستم دو مخزن



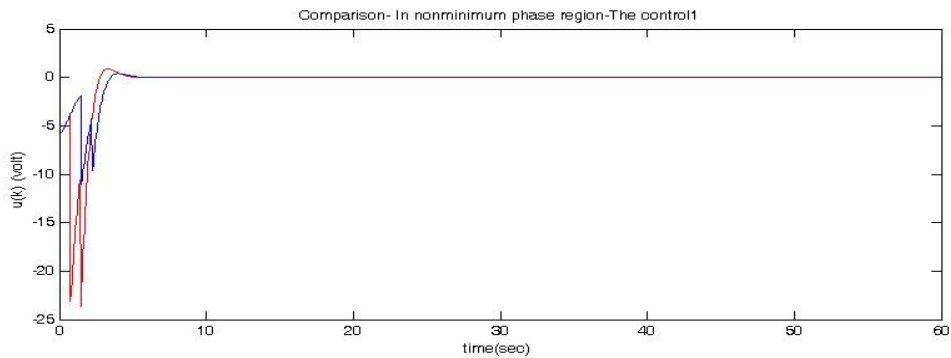
شکل ۸. مقایسه کنترل کننده‌های ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی و بیضوی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - سیگنال‌های خروجی ۲ - سیستم دو مخزن



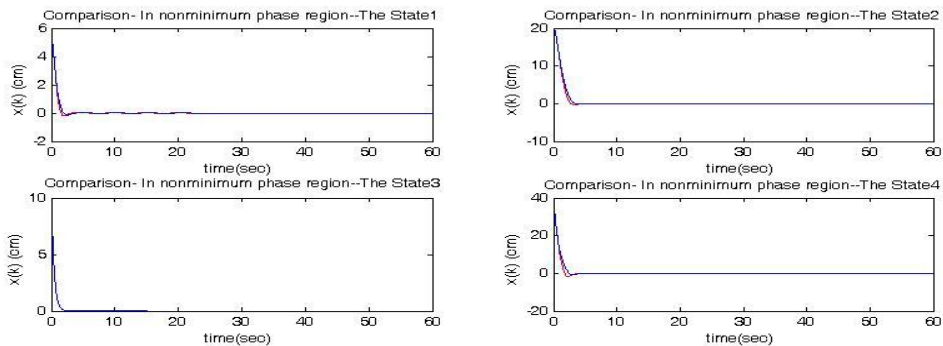
شکل ۹. کنترل ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - کنترل ۱ - ناحیه غیرکمینه‌فاز - سیستم چهار مخزن



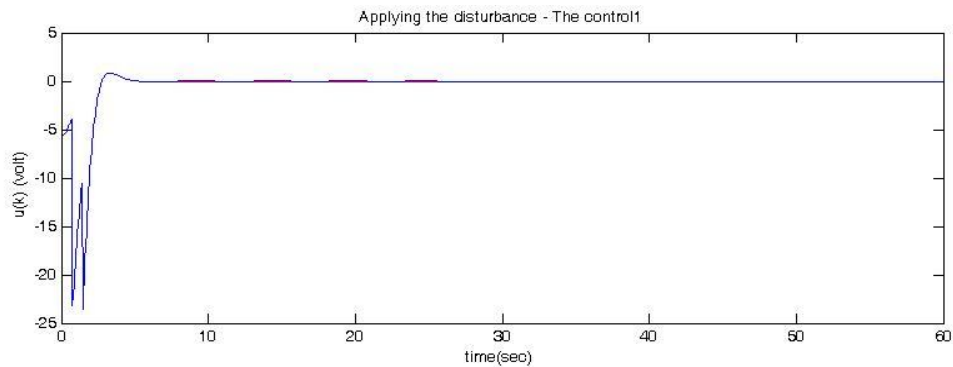
شکل ۱۰. کنترل ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - خروجی ۱- ناحیه غیر کمینه‌فاز - سیستم چهار مخزن



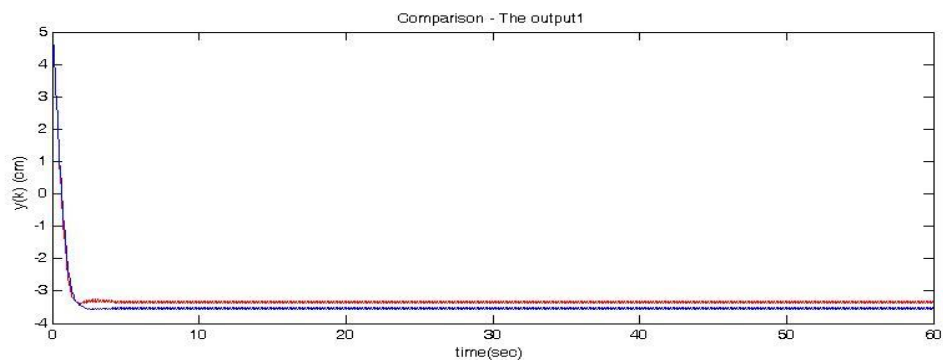
شکل ۱۱. مقایسه کنترل ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی و بیضوی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - کنترل‌های ۱- ناحیه غیر کمینه‌فاز - سیستم چهار مخزن



شکل ۱۲. مقایسه کنترل ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی و بیضوی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - حالت‌ها - ناحیه غیر کمینه‌فاز - سیستم چهار مخزن



شکل ۱۳. کنترل ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - کنترل ۱- ناحیه غیر کمینه‌فاز - با اعمال اغتشاش - سیستم چهار مخزن



شکل ۱۴. مقایسه کنترل ناهمزمان پیش‌بین مبتنی بر مدل مقید مقاوم چندوجهی و بیضوی بر اساس نامساوی‌های ماتریسی خطی - خروجی‌های ۱- ناحیه غیر کمینه‌فاز - با اعمال نویز - سیستم چهار مخزن

نتیجه‌گیری

تکنیک کنترلی MPC برای واحد صنعتی با فرمان اجرایی خیلی کند مناسب است. یکی از مزیت‌های مهم دیگر تسلط بر قيود سخت روی حالت‌ها و سیگنال‌های کنترل است؛ بنابراین در صنایع پتروشیمی و صنایع وابسته، وقتی که ارضای قيود مهم است به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. راه‌کار MPC استفاده از یک مدل تخمینی از سیستم برای پیش‌بینی خروجی آینده فرآیند و کمینه‌کردن یک تابع هدف مربعی جهت ایجاد سیگنال کنترل و به‌دست آوردن سیگنال کنترل بهینه در هر لحظه است. در الگوریتم MPC مسیر مطلوب به اندازه افق پیش‌بین از قبل مشخص شده است. حال بایستی سیگنال‌های کنترلی را به‌گونه‌ای تنظیم کرد که خروجی پیش‌بینی شده تا حد امکان به‌مسیر مطلوب نزدیک‌گردد. یکی از اشکالات اصلی MPC دشواری مواجهه با نامعینی مدل می‌باشد. به این علت، روش‌های تحلیل RMPC به‌طور گسترده مورد تحقیق واقع گردیده است. در این پژوهش تکنیک RMPC ناهمزمان با استفاده از مجموعه‌های ثابت چندوجهی مورد بررسی قرار گرفت و زمان محاسباتی همزمان با محاسبه‌ی ناهمزمان دنباله قوانین کنترلی فیدبک حالت مربوط به دنباله مجموعه‌های ثابت چندوجهی کاهش یافت. همچنین الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم

RMPC ناهمزمان (از جنس خودش) بیضوی مقایسه شد و نتایج به دست آمده نشان داد که آگوریتیم پیشنهادی می تواند عملکرد کنترلی بهتری کسب نماید، به عبارت دیگر به طور قابل توجهی ناحیه قابل پایداری افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین RMPC پیشنهادی در برابر اغتشاش بار و تغییرات ناگهانی در مشخصه های سیستم مقاوم است. تکنیک کنترلی RMPC بسیار جذاب و توانمند برای اعمال به سیستم های مقیاس بزرگ و فرآیندهای سریع به حساب می آید؛ بنابراین استفاده از آن در صنایع مهم و مختلف از جمله هوا فضا و نفت و پتروشیمی و غیره انکارناپذیر است. متد پیشنهادی روش نامساوی های ماتریسی خطی را به مدل فضای حالت خطی شده با نامعینی های چندوجهی اعمال می کند. طراحی کنترل کننده پیشنهادی به تفصیل برای سیستم های دو مخزن و چهار مخزن به تصویر کشیده گردید و عملی بودن آن اثبات شد. روش مورد بررسی قابل اعمال به سیستم های با درجه آزادی بالا نیز می باشد و به عنوان پیشنهاد به محققین عزیز دیگری که تمایل به ادامه کار اینجانب را دارند، استفاده از روش تطبیقی در کنترل ناهمزمان RMPC مقید برای سیستم های هایبرید یا مرکب مانند نیروگاه های تولید برق بسیار جذاب و مناسب است.

منابع

1. Boyd, S., L. El Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan (1994). Linear matrix inequalities in system and control theory. SIAM Publications, Philadelphia.
2. Cheng and D. Jia, Robust Stability Constrained Model Predictive Control. In Proceedings of the 2004 American Control Conference, volumes 2X pages 3–8.
3. B. Pluymers, J. A. Rossiter, J. A. K. Suykens, and B. D. Moor, "The efficient computation of polyhedral invariant sets for linear systems with polytopic uncertainty," in Proceedings of the American Control Conference, Portland, 2005, pp. 804-809.
4. Kothare, M.V., V. Balakrishnan and M. Morari (1996), robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. Automatica, 32(10), pp. 1361-1379.
5. Wan, Z and M. Kothare (2003), an efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities. Automatica, 39(5), pp 837-846.
6. Wan and Kothare (2003) paper presents an off-line approach faster than on-line Linear Matrix Inequality-based Model Predictive Control Technique, which determines a sequence of control laws corresponding to a sequence asymptotically stable invariant ellipsoids. Model predictive control.
7. Alireza Adhami, Saeed Mohammadhoseinitoroghi paper presents Designing Robust Adaptive Model Predictive Controller for Level control of two-tank system, 1st Conference on Oil & Gas Storage Tanks, Oct, 22-23, 2013, Shahid Beheshti Conference Center, Tehran.
8. Ademu Victor Okpanachi, Developing Advanced Control strategies for a 4-Tank Laboratory process, Master's Thesis report 2010 Faculty of Technology Telemark University College.
9. K.H. Johansson, The quadruple-tank process, IEEE Transactions on Control System Technics 8 (2000) 456–465.
10. Edward P. Gatzke, Edward S. Meadows, Chung Wang, Model Based Control of a Four Tank System, Francis J. Doyle III, Department of Chemical Engineering University of Delaware Newark, DE 19716.