مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۹، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۲۳-۱۳

کنترل نظارتی پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه

مجتبی نوری منظر [۱]، علی خاکی صدیق [۲]

دانشجوی دکترای مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، m.noorimanzar@mail.kntu.ac.ir

[۲] استاد، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sedigh@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۱/۲۳، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۴/۵/۱۰)

چکیده: کنترل ابطال‌ناپذیر یکی از راهبردهای اخیر کنترل تطبیقی مقاوم است که در این مقاله ابتدا مروری بر مفاهیم بنیادی و روش-های آن ارائه شده است. الگوریتم‌های مختلف کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر مورد بررسی قرار گرفته و همچنین کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه به‌عنوان پلی میان کنترل ابطال‌ناپذیر و کنترل مدل چندگانه تشریح شده است. در این مقاله، ایده کنترل پیش‌بین برای کنترل ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه پیشنهاد شده است. استفاده از چندین کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته در کنار یکدیگر و کلیدزنی مناسب میان آن‌ها با کنترل ابطال‌ناپذیر برای یک سیستم نامعین پیشنهاد شده و روابط مورد نیاز تعمیم داده شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر، کنترل پیش‌بین، کنترل نظارتی، کنترل مدل چندگانه.

Multi-Model Unfalsified Predictive Supervisory Control

Mojtaba Nouri Manzar, Ali Khaki Sedigh

Abstract: Unfalsified Adaptive Control (UAC) is a recently proposed robust adaptive control strategy. In this paper, the UAC principles and algorithms are reviewed and Multi-Model UAC is followed as an intermediate between UAC and multiple model control. Different approaches in UAC and MMUAC are studied. Also, Multi-Model Unfalsified Generalized Predictive control (MMUGPC) is proposed, which is a new control design strategy in the UAC framework. For an uncertain system, by utilizing several generalized predictive controllers and discrete switching between them with unfalsified control, a new structure is proposed and appropriate equations are derived. Simulation results show the effectiveness of proposed Multi-Model Unfalsified Generalized Predictive control.

Keywords: Unfalsified Adaptive Control, Predictive Control, Supervisory Control, Multiple Model Control.

۱- مقدمه

ایده کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر[1] (UAC) در فلسفه علم ریشه دارد. فلسفه ابطال‌پذیری[2] توسط کارل ریموند پوپر[3] ارائه شده است. او معتقد است که علم ماهیتی غیر نهایی، غیرقطعی و حدسی دارد و درباره آن تنها می‌توان گفت که فعلاً تجربه مؤید آن است. کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر یک کنترل نظارتی است که تنها با توجه به داده‌های ورودی-خروجی سیستم طبق یک تابع عملکرد، با تضمین پایداری حلقه بسته، کنترل‌کننده مناسب را انتخاب می‌کند.

کنترل تطبیقی مدل چندگانه معمولاً شامل بانک کنترل‌کننده، ناظر و سیستم نامعین است. وظیفه واحد ناظر این است که تخمینی از عملکرد هرکدام از کنترل‌کننده‌ها داشته باشد و بر اساس این اطلاعات کنترل‌کننده با عملکرد مطلوب را انتخاب نماید. عملکرد کنترل‌کننده‌ها در ناظر توسط یک تابع هزینه برآورد می‌شود. مهم‌ترین ویژگی کنترل مدل چندگانه نسبت به کنترل تطبیقی کلاسیک قابلیت کنترل سیستمی با نامعینی بزرگ همراه عملکرد مناسب است. تطبیق سریع و کلیدزنی گسسته میان کنترل‌کننده‌ها وجه تمایز این سیستم‌های کنترل است.

بر اساس تابع هزینه‌ی استفاده شده، ساختارهای کنترل تطبیقی نظارتی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱. ساختار مدل چندگانه
۲. ساختار بدون مدل

در ساختار مدل چندگانه برای سیستم مدل‌های نامی متعدد در نظر گرفته شده و کنترل‌کننده‌هایی برای این مدل‌های نامی طراحی می‌شود. پایداری این سیستم‌ها بر پایه این فرض است که یکی از مدل‌ها به خوبی سیستم را تخمین می‌زند. یکی از ساختارهای مرسوم و مهم مدل چندگانه در مرجع [۱] معرفی شده که در آن ورودی سیستم به مدل‌ها نیز اعمال گردیده و بر اساس خطای خروجی تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد. از روش‌های جدید مدل چندگانه می‌توان به RMMAC[4] در مرجع [۲] اشاره کرد که در آن از شناساگر در ناحیه‌های پارامتری مختلف استفاده شده و با آزمونی نزدیک‌ترین مدل احتمالاتی به سیستم تشخیص داده می‌شود. روش نوین دیگر در مدل چندگانه AMC[5] در مرجع [۳] است که از یک راهبرد ترکیب به همراه تخمین‌گر مقاوم پارامترها استفاده می‌کند.

کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر رایج‌ترین روش در کنترل نظارتی بدون مدل است. این روش در سال ۱۹۹۷ توسط سافانوف[6] معرفی شد [۴]. اصول این روش بر فلسفه ابطال‌پذیری استوار است. طبق فلسفه ابطال‌پذیری حقایقی که در حال حاضر می‌دانیم ممکن است با دانش و یا منابع جدید اطلاعات ابطال شوند. رویکرد به کارگیری فلسفه ابطال-پذیری در کنترل تطبیقی، در چارچوب سیستم‌های کلیدزن است. به این ترتیب که در کنترل تطبیقی کلیدزن چندین کنترل‌کننده برای شرایط کاری مختلف سیستم طراحی شده و برای انتخاب از میان آن‌ها تابع هزینه‌ای در نظر گرفته می شود. اگر این تابع هزینه از مقداری بیشتر شود کنترل‌کننده مربوطه ابطال شده و به بیان دیگر احتمالاً ناپایدار ساز است. البته تابع هزینه و ابطال شرایط خاصی می-خواهد که در ادامه به جزییات آن پرداخته می‌شود. در رویکرد کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر برای پایداری به بررسی بهره شبه خطی نهایی از ورودی مرجع به ورودی و خروجی سیستم در زمان محدود پرداخته شده و این کار با استفاده از حداقل فرضیات لازم (وجود کنترل‌کننده پایدارساز) انجام می‌شود. در کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر نیازی به خطی بودن سیستم نیست و در نتیجه نسبت به غیرخطی بودن سیستم مقاومت وجود دارد. البته توجه کنید که کنترل ابطال‌ناپذیر ممکن است که کنترل‌کننده ناپایدارساز را به حلقه وارد کند ولی درنهایت کنترل پایدارساز در حلقه قرار خواهد گرفت. این ویژگی باعث می‌شود که در زمان گذرا عملکرد نامناسب و حتی رفتار واگرا شونده‌ای در خروجی سیستم دیده شود و تا زمانی که کنترل‌کننده نهایی انتخاب شود این رفتار ادامه خواهد داشت. روش دیگر که از ویژگی‌های هر دو روش کنترل نظارتی مدل چندگانه و بدون مدل استفاده می‌کند تحت عنوان کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه[7] (MMUAC) در مرجع [۵] معرفی شده است. در این رویکرد از چندین مدل برای شناسایی و تخمین سیستم و از کنترل ابطال‌ناپذیر برای انتخاب از میان این مدل‌ها استفاده می‌شود.

از روش‌های نوین در UAC می‌توان به بهبود تابع هزینه در [۶] و تابع هزینه چندهدفه [۷] اشاره کرد. تابع هزینه‌های مختلف MMUAC در [۸] بررسی شده و MMUAC با پنجره زمانی تطبیقی در [۹] پیشنهاد شده است. همچنین از MMUAC برای تضعیف اغتشاش در [۱۰] استفاده شده است.

در این مقاله مروری بر روش‌های موجود کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر انجام شده و روش کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه پیشنهاد شده است. با استفاده از کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه و به کمک کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته[8] (GPC) رویکرد جدیدی معرفی شده است. به دلیل کاربرد وسیع کنترل پیش‌بین در صنعت، استفاده از چندین کنترل پیش‌بین که موجب افزایش عملکرد سیستم در نقاط کاری مختلف می-شود اهمیت ویژه‌ای دارد.

ساماندهی این مقاله به‌صورت زیر است. در بخش ۲ کنترل ابطال‌ناپذیر و روابط مربوط به آن معرفی می‌شود. در بخش ۳ کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه تشریح شده و در بخش ۴ کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه معرفی شده است. شبیه‌سازی‌ها در بخش ۵ و نتیجه‌گیری و پیشنهادها در بخش ۶ آورده شده است.

[1] Unfalsified Adaptive Control
[2] Falsification
[3] Karl Raimund Popper
[4] Robust Multiple Model Adaptive Control
[5] Adaptive Mixing Control
[6] Safonov
[7] Multi-Model ,Unfalsified Adaptive Control
[8] Generalized Predictive Control

۲- مفاهیم اولیه کنترل ابطال‌ناپذیر

در کنترل ابطال‌ناپذیر به‌جای شناسایی مدل ریاضی برای سیستم ، با توجه به داده‌های ورودی خروجی سیستم ناظر آموزش داده می‌شود. اگرچه در خود این روش از مدلی برای سیستم استفاده نمی‌شود، ولی در طراحی بانک کنترل‌کننده‌ها غالباً از مدل برای سیستم استفاده می‌شود که البته طراحی بانک کنترلی به‌صورت مجزا صورت گرفته و برای اطلاعات بیشتر در این زمینه به مرجع [۱۱] مراجعه کنید. با ایده‌ی مشابه‌ای که از مسئله شناسایی جعبه سیاه داریم، تنها با استفاده از داده‌های ورودی خروجی سیستم به دنبال کنترل‌کننده‌ی مناسب از میان کنترل‌کننده‌های موجود در بانک کنترلی هستیم که عملکرد مطلوب را محقق کند.

مطابق شکل (۱) فرض کنید داده‌های ورودی خروجی سیستمی در دسترس باشند. بانک کنترل‌کننده‌های از پیش طراحی شده و ویژگی‌های عملکرد مورد نظر نیز از قبل مشخص است. کنترل‌کننده‌ای را ابطال‌ناپذیر گویند که با توجه به داده‌های سیستم و تابع عملکرد تعریف شده، سیستم را با اطلاعات تا این لحظه ناپایدار نکند. مشخص است که اگر کنترل‌کننده‌ای ابطال شود یعنی با توجه به اطلاعات تا این لحظه از سیستم این کنترل‌کننده پایدارساز نیست و یا عملکرد مطلوب را تأمین نمی‌کند.

در کنترل ابطال‌ناپذیر تابع هزینه باید عملکرد سیستم را بدون هیچ فرضی درباره سیستم و اغتشاشات آن نشان دهد. برای بررسی پایداری در UAC از مفهوم تابع هزینه آشکارپذیر استفاده می‌شود. آشکارپذیری تابع هزینه محدود بودن تابع هزینه و پایداری ورودی خروجی سیستم را به هم مرتبط می‌کند. تابع هزینه‌ای که ویژگی آشکارپذیری را داشته باشد در [۴] به‌صورت زیر معرفی شده است.

$$V(K^i, y_k, u_k, k) = \sup_{x \le k} \frac{\|W_1 (y - \tilde{r}^i)\|_x^2 + \|W_2 u\|_x^2}{\|\tilde{r}^i\|_x^2 + \epsilon} \qquad (۱)$$

در این رابطه تابع هزینه تا زمان k (گسسته) محاسبه شده و u ورودی سیستم، yخروجی سیستم، W_1 و W_2 ضرایب وزنی، ϵ ثابت مثبت و $\tilde{r}^i$ سیگنال مرجع مجازی i ام با کنترل کننده K^i است که در تعریف ۵ معرفی خواهد شد. نماد $\|.\|_x$ به مفهوم نرم برش داده شده است. در این مقاله، تمامی روابط در فضای گسسته زمان نوشته شده و نرم مورد استفاده نرم ۲ است. تابع هزینه از فرم استاندارد حساسیت ترکیبی برگرفته شده است:

$$\left\| \begin{matrix} W_1(1+PK)^{-1} \\ W_2K(1+PK)^{-1} \end{matrix} \right\|_\infty = \left\| \begin{matrix} W_1S \\ W_2KS \end{matrix} \right\|_\infty < 1 \qquad (۲)$$

که P تابع تبدیل سیستم، K تابع تبدیل کنترل‌کننده و S تابع حساسیت را نشان می‌دهد. در ادامه به معرفی تعاریفی که در کنترل ابطال‌ناپذیر استفاده می‌شود، پرداخته شده است.

تعریف ۱- سیستم $\Sigma: L_{2e} \to L_{2e}$ با ورودی v_k و خروجی w_k پایدار است اگر برای هر ورودی $v \in L_{2e}$ پارامترهای $\alpha, \beta \ge 0$ وجود داشته باشد به‌طوری‌که:

$$\|w\|_k < \beta \|v\|_k + \alpha \qquad (۳)$$

در غیر این صورت سیستم ناپایدار است. در حالت کلی α تابع شرایط اولیه سیستم است.

تعریف ۲- سیستم $\Sigma: L_{2e} \to L_{2e}$ پایدار بهره نهایی است اگر حداقل بهره Σ برابر β باشد (کوچک‌ترین β وجود داشته باشد).

تعریف ۳- مسئله کنترل تطبیقی شدنی[1] است اگر در مجموعه‌ی کنترل‌کننده‌های سیستم در هر زمانی حداقل یک کنترل‌کننده پایدارساز وجود داشته باشد.

تعریف ۴ [۴]- پایداری سیستم $\Sigma: v_k \to w_k$ ابطال‌ناپذیر است اگر با توجه به داده‌هایی که از سیستم داریم (ورودی و خروجی) پارامترهای $\alpha, \beta \ge 0$ وجود داشته باشد که در نامعادله (۳) صدق کنند.

برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌هایی که در حلقه قرار ندارند، از مفهومی به نام سیگنال مرجع مجازی استفاده می‌شود.

تعریف ۵ [۱۲]- مطابق شکل (۲) سیگنال مرجع مجازی i ام[2]، سیگنال مرجعی است که با داده‌های موجود از سیستم تا زمان k اگر کنترل‌کننده i ام در حلقه باشد همان ورودی خروجی را تا لحظه k بدهد.

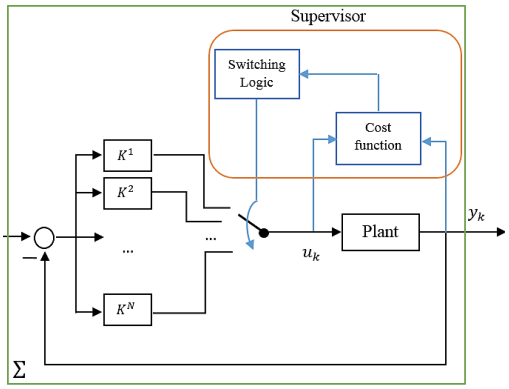
اثبات پایداری سیستم کنترلی ابطال ناپذیر بر اساس آشکارپذیری تابع هزینه انجام می‌شود.

تعریف ۶ [۱۲]- تابع هزینه V با مجموعه کنترل‌کننده $\mathbb{K}$ آشکارپذیر[3] است اگر به ازای هر $\hat{K} \in \mathbb{K}$ با تعداد محدود کلیدزنی، گزینه‌های زیر معادل هم باشند:

- $V(K_f, u_k, y_k, k)$ محدود می‌ماند وقتی $k \to \infty$ و K_f آخرین کنترل‌کننده است.
- پایداری سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده $\hat{K}$ با ورودی خروجی (r_k, u_k, y_k) ابطال‌ناپذیر است.

با شرط آشکارپذیری تابع هزینه، ناپایداری در سیستم علی‌رغم نامعلوم بودن شرط اولیه سیستم شناسایی می‌شود. بعد از تشکیل تابع هزینه، ناظر به‌کمک یک منطق کلیدزنی از میان کنترل‌کننده‌ها کنترل‌کننده مناسب را انتخاب می‌کند. هیسترزیس رایج‌ترین منطق کلیدزنی در کنترل ابطال‌ناپذیر است. بدین جهت به لم زیر توجه کنید.

[1] Feasible
[2] Fictitious Reference Signal
[3] Cost Detectable



شکل ۱: ساختار کلی کنترل نظارتی UAC

لم هیسترزیس [۱۳] –فرض کنید سیگنال کلیدزنی مطابق الگوریتم ۱ باشد. با فرض محدود ماندن حداقل یکی از تابع‌های هزینه، زمان نهایی t_f وجود دارد به نحوی که بعد از آن دیگر کلیدزنی وجود نخواهد داشت. در ضمن تابع هزینه آخرین کنترل‌کننده حتماً محدود است.

الگوریتم ۱–کنترل ابطال‌ناپذیر

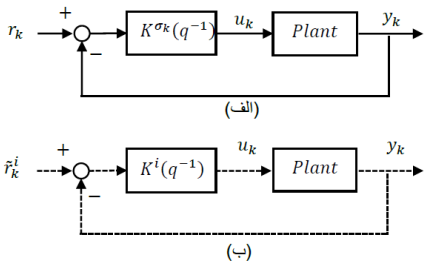
1. $Let\ t=0, k=0, \widehat{K}_0 = K_0\ and\ choose\ h>0$
2. $k+1 \to k$
   $If\ V(\widehat{K}_{k-1}, u_k, y_k, k) > \min_{K} V(K, u_k, y_k, k) + h$
   $\arg\min_{K} V(K, u_k, y_k, k) \to \widehat{K}_k$
   $Else$
   $\widehat{K}_{k-1} \to \widehat{K}_k$
   END
3. Go to 2.

با توجه به الگوریتم ۱ کنترل‌کننده موجود در حلقه در گام بعدی نیز در حلقه می‌ماند اگر تابع هزینه آن از کمینه تابع هزینه کلیه کنترل‌کننده‌ها به اضافه h کمتر باشد. h از تعداد کلیدزنی نامحدود در زمان محدود جلوگیری می‌کند و بنابراین چرخه‌های ناپایدار احتمالی به وجود نمی‌آید.

برای پایدارسازی با کنترل‌کننده‌های ثابت و کلیدزنی در الگوریتم هیسترزیس باید شرط‌های زیر برقرار باشد [۱۲]:

- ✓ تابع هزینه یکنواخت افزایشی در زمان باشد.
- ✓ سیگنال مرجع مجازی برای همه کنترل‌کننده‌ها وجود داشته باشد.
- ✓ تابع هزینه به‌طور یکنواخت محدود باشد اگر کنترل‌کننده K پایدارساز باشد.

شرط کافی وجود سیگنال مجازی مرجع درجه نسبی صفر با صفرهای درون دایره واحد (وجود معکوس علّی و پایدار) برای



شکل ۲: (الف) سیستم حلقه بسته و (ب) سیگنال مرجع مجازی i ام

کنترل‌کننده‌ها است. بدین منظور برای کنترل‌کننده خطی تغییرناپذیر با زمان باید درجه صورت و مخرج همه کنترل‌کننده‌ها یکسان باشد. به‌طور مثال فرض کنید همه کنترل‌کننده‌ها فقط بهره ثابت K_c^i باشند. بنابراین سیگنال مرجع مجازی به‌راحتی توسط روابط زیر به دست می‌آیند

$$(r_k - y_k)\, K_c^{\sigma_k} = u_k \qquad \tilde{r}_k^i = \frac{1}{K_c^i} u_k + y_k \qquad (۴)$$

برای بانک کنترلی با بینهایت عضو نیزکنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر تعمیم یافته است. در مرجع [۱۴] با در نظر گرفتن اینکه اگر مجموعه $\mathbb{K}$ فشرده بوده و حاصل اجتماع تعداد محدود از مجموعه‌های محدب باشد، الگوریتمی برای انتخاب کنترل‌کننده توسعه یافته است.

در [۱۵] پدیده‌ای در UAC گزارش شد که آینده‌ی این کنترل‌کننده را به خطر انداخت. در مثال ساده‌ای که عنوان شده بود سیگنال کنترلی به‌شدت در لحظات گذرا افزایش پیدا می‌کرد. این پدیده را DAL[1] نامیدند. در مثال ذکر شده، طبق رابطه (۵) برای سیستم مورد نظر کنترل‌کننده اول پایدارساز و دومی ناپایدارکننده است. محققان برای تضعیف این پدیده تلاش بسیاری کردند و هنوز مقالاتی در این زمینه به چاپ می‌رسد.

$$G(s) = \frac{1}{s-1} \qquad (۵)$$
$$K_1 = 2, \qquad K_2 = 0.5$$

ایده استفاده از فیلتر در تابع هزینه در سال ۲۰۰۸ در [۱۶] دنبال شده است. در این مقاله سیگنال‌های تابع هزینه مرسوم UAC از N فیلتر عبور می‌کند. هر فیلتر در پهنای باند خاصی جایابی شده و روابط به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$W(K^i, u_k, y_k, k) = \max_j \frac{\|F^j u\|_\varkappa^2 + \|F^j(\tilde{r}^i - y)\|_\varkappa^2}{\|F^j \tilde{r}^i\|_\varkappa^2 + \epsilon} \qquad (۶)$$
$$V(K^i, u_k, y_k, k) = \max_{\varkappa \in [0,k]} W(K^i, u_k, y_k, \varkappa)$$

نشان داده شده که در صورت جایابی مناسب فیلترها، با هزینه افزایش محاسبات، عملکرد سیستم حلقه بسته بهبود می‌یابد.

[1] Dehghani. Anderson and Lanzon

با اصلاح الگوریتم هیسترزیس در [۶] نیز نشان داده شد که عملکرد سیستم کنترلی بهبود پیدا می‌کند. در این الگوریتم جدید یک آستانه برای تابع هزینه در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که اگر تابع هزینه از سطح آستانه بیشتر باشد، در آن صورت مطابق الگوریتم هیسترزیس کلیدزنی انجام خواهد شد و در غیر این صورت کلیدزنی نخواهیم داشت. این الگوریتم THSA[1] نام‌گذاری شده است.

الگوریتم ۲–THSA

$If\ \ V(\hat{K}_{k-1},u_k,y_k,k) > \min V(K,u_k,y_k,k)+\varepsilon$
$\quad and\ V(\hat{K}_{k-1},u_k,y_k,k) > M$

$\arg\min V(K,u_k,y_k,k) \to \hat{K}_{\mathrm{k}}$

$Else$

$\quad \hat{K}_{\mathrm{k}-1} \to \hat{K}_{\mathrm{k}}$

END

تابع هزینه دیگری که در [۶] پیشنهاد شده تغییر هیسترزیس جمعی به حالت ضربی است. این ساختار اولین بار در [۱۷] پیشنهاد شده است و به آن SIHSA[2] می‌گویند. در حالت جمعی مقدار پارامتر هیسترزیس کاملاً وابسته به مقدار تابع هزینه است. با پیشنهاد ضربی کردن هیسترزیس این وابستگی از بین می‌رود.

الگوریتم ۳–SIHSA

$If\ \ V(\hat{K}_{k-1},u_k,y_k,k) > \min V(K,u_k,y_k,k)(1+h)$

$\quad \arg\min V(K,u_k,y_k,k) \to \hat{K}_k$

$Else$

$\quad \hat{K}_{k-1} \to \hat{K}_k$

END

با شبیه‌سازی نشان داده شده است که پدیده DAL برای الگوریتم‌های THSA و SIHSA کاهش چشمگیری دارد.

وجود تابع هزینه یکنوا افزایشی در الگوریتم‌های قبلی باعث افت عملکرد و محدودیت روش UAC می‌شود. در مرجع [۱۸] با ارائه دو مفهوم خود ابطال‌پذیری[3] و دگر ابطال‌پذیری[4] به رفع محدودیت یکنوا بودن پرداخته می‌شود. تعداد کنترل‌کننده‌ها در این مقاله محدود در نظر گرفته شده است. در قسمت دگر ابطال‌پذیری روند مقایسه توابع هزینه همان روند سابق UAC است. در مسئله خود ابطال‌پذیری تابع هزینه کنترل‌کننده موجود در حلقه با یک دنباله از پیش تعیین شده γ مقایسه می‌شود. در اینجا دیگر از الگوریتم هیسترزیس استفاده نمی‌شود و باید پایداری به‌طور جداگانه بررسی شود. دو الگوریتم پیشنهادی در خود ابطال‌پذیری ICLA[5] و LICLA[6] هستند.

الگوریتم ۴–ICLA

1. $Let\ j \to 1, \eta_1 \to \gamma, 0 \to k,\ K^1 \to \hat{K}_k$
2. $k+1 \to k\ collect\ r,u,y,update\ \tilde{r}_k^i,V$
3. $If\ \ V(\hat{K}_{k-1},u_k,y_k,k) > \gamma$
   $K_{next}(\mathbb{K},u_k,y_k) \to \hat{K}_k$
   $\eta_{j+1} \to \gamma$
   $j+1 \to j$
   Else
   $\hat{K}_{k-1} \to \hat{K}_{\mathrm{k}}$
   END
4. Go to 2

در الگوریتم ۴ $\{n_j\}$ دنباله‌ای است که تابع هزینه با آن مقایسه می‌شود. این دنباله باید صعودی بوده و دارای ویژگی زیر باشد:

$$\lim_{j\to\infty} n_j = \infty \qquad (۷)$$

ایده این روش، همان‌طور که نویسنده نیز ذکر کرده، از مرجع [۱۹] آمده که در آن از جایگذاری کنترل‌کننده‌ها پشت سر هم استفاده می‌شود. مشکل اصلی الگوریتم خود ابطال‌پذیری در تعیین دنباله $\{n_j\}$ است.

الگوریتم LICLA از الگوریتم قبلی هوشمندتر عمل کرده و در جایگزینی کنترل‌کننده بعدی از کمینه سایر توابع هزینه استفاده می‌کند. در واقع این الگوریتم ترکیبی از کارهای قبلی سافانوف با الگوریتم ICLA است.

الگوریتم ۵–LICLA

1. $Let\ \eta_0 > 0, \Delta\eta > 0, \eta_0 \to \gamma, 0 \to k,\ \{\mathrm{K}^1,..,\mathrm{K}^{\mathrm{N}}\} \to \mathbb{K}$
2. $k+1 \to k\ collect\ r,u,y,update\ \tilde{r}_k^i,V$
3. $If\ \ V(\hat{K}_{k-1},u_k,y_k,k) > \gamma$
   $\mathbb{K}\backslash\hat{K}_{k-1} \to \mathbb{K}$
   $If\ \mathbb{K} = \emptyset$
   $\{\mathrm{K}^1,..,\mathrm{K}^{\mathrm{N}}\} \to \mathbb{K}$
   END
   $arg\ min\ V(K,u_k,y_k,k) \to \hat{K}_{\mathrm{k}}, \gamma + \Delta\eta \to \gamma$
   Else
   $\hat{K}_{k-1} \to \hat{K}_{\mathrm{k}}$
   END
4. Go to 2

[1] Threshold Hysteresis Algorithm
[2] Scale-Independent Hysteresis Algorithm
[3] Self-Falsification
[4] Inter-Falsification
[5] Increasing Cost Level Algorithm
[6] Linear Increasing Cost Level Algorithm

با شبیه‌سازی نشان داده شده که خود ابطال‌پذیری احتمال و شدت وقوع پدیده DAL را کاهش می‌دهد.

۳- کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه

روش MMUAC در سال ۲۰۱۰ توسط Baldi در [۵] معرفی شده است. در این روش هم از مدل برای سیستم و هم از الگوریتم ابطال‌پذیری برای کنترل‌کننده‌ها استفاده کرده است. در رویکرد MMUAC نشان داده شده وقتی که اطلاعات اولیه‌ای در مورد نامعینی وجود داشته باشد، پاسخ گذرای بهتری نسبت به کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر دارد. در این روش برای سیستم خطی نامعین چندین مدل نامی در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌های نامی کنترل‌کننده خطی طراحی می‌شود که ضمن پایداری عملکرد مطلوب را داشته باشد. با همان ساختار کنترل نظارتی شکل (۱) کنترل تطبیقی کلیدزنی طبق رابطه زیر توصیف می‌شود.

$$\begin{aligned} y_k &= P(u_k)(k) \\ u_k &= K^{\sigma_k}(r_k - y_k)(k) \end{aligned} \qquad (۸)$$

که در آن $k \in \mathbb{Z}_+$ و $P: u_k \to y_k$ سیستم نامعین غیرخطی است. بالانویس σ_k مشخص می‌کند که کدام کنترل‌کننده در زمان k در حلقه کنترلی سیستم قرار می‌گیرد. معادله سیستم خطی را به‌صورت زیر در نظر بگیرید.

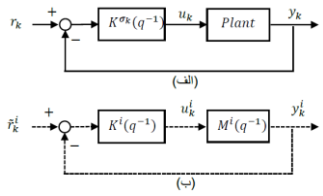
$$P: A(q^{-1})y_k = B(q^{-1})u_k \qquad (۹)$$

در این معادله y_k خروجی سیستم، u_k ورودی سیستم است. A, B نسبت به هم اول و q^{-1} اپراتور یک واحد تأخیر است. M^i مدل‌های نامی و K^i کنترل‌کننده متناظر آن‌ها است که عملکرد مطلوب را دارند. به این ترتیب حلقه‌های کاندید کنترلی با M_i ها و C_i ها مطابق شکل (۳) هستند.

$$\begin{aligned} &\text{Models} \quad A^i(q^{-1})y_k = B^i(q^{-1})u_k \\ &\text{Controllers} \quad K^i(q^{-1}) = S^i(q^{-1})/R^i(q^{-1}) \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

هدف این است که $K^{\sigma(.)}$ طوری انتخاب شود که رفتار سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده $K^{\sigma(.)}$ شبیه یکی از حلقه‌های کاندید کنترلی شود. در واقع رفتار ایده ال ناظر کلیدزن برای سیستم نامعین که با مجموعه P نشان داده شده است، آن است که σ ویژگی‌های زیر را به همراه داشته باشد:

- سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده $K^{\sigma(.)}$ پایدار باشد.
- رفتار سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده $K^{\sigma(.)}$ و ورودی r شبیه یکی از حلقه‌های کاندید کنترلی با ورودی $\bar{r}^i$ باشد.



شکل۳: (الف)سیستم حلقه بسته و (ب) حلقه های کاندید کنترلی

اگر $V(K^\sigma)$ تابع هزینه باشد، فرض‌های زیر را برای سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده $K^{\sigma(.)}$ نظر بگیرید:

- برای هر σ, i ، $V(K^i, y_k, u_k, k)$ حد داشته باشد حتی در بی‌نهایت $k \to \infty$.
- برای هر σ ، μ وجود دارد به‌طوری‌که V^μ محدود باشد.

این فرض‌ها با توجه به آشکارپذیری تابع هزینه در نظرگرفته شده است.

مرجع [۸] با ارزیابی توابع هزینه مختلف برای MMUAC، رابطه (۱۱) را به‌عنوان تابع هزینه برتر انتخاب کرده است. در حالتی که اغتشاشی وجود نداشته باشد، صورت تابع هزینه رابطه (۱۱) با کوچک شدن فاصله P, M کاهش پیدا می‌کند. با کوچک شدن فاصله میان $A - A_i$ و $B - B_i$ تابع هزینه به صفر میل می‌کند که به این پدیده تطابق مدل و سیستم ([۲۲] و [۲۳]) گویند. نرمال‌سازی فوق با y_k^i و u_k^i به این دلیل است که در وجود نامعینی زیاد در سیستم، تابع هزینه متفاوتی با توجه به هر ورودی خواهیم داشت. برای هر کنترل‌کننده سیگنال ورودی مرجع مجازی را حساب کرده، سپس برای مدل آن y_k^i و u_k^i را محاسبه می‌کنیم.

$$V(K^i, y_k, u_k, k) = \max_{\varkappa \le k} \frac{\left(\| y - y^i \|_\varkappa^2 + \| u - u^i \|_\varkappa^2 \right)^{1/2}}{(\|y^i\|_\varkappa^2 + \| u^i\|_\varkappa^2)^{1/2} + \epsilon} \qquad (۱۱)$$

بدین ترتیب الگوریتم کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

الگوریتم ۶-MMUAC

۱- محاسبه سیگنال مرجع مجازی.

۲- محاسبه u_k^i و y_k^i ها.

۳- محاسبه توابع هزینه.

۴- کلیدزنی بر اساس منطق هیسترزیس (الگوریتم۱).

۴- کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه

در این بخش کلیدزنی میان چند کنترل پیش‌بین با ناظر ابطال‌ناپذیر مطابق شکل (۴) ارائه می‌شود. استفاده از مدل‌های متعدد برای سیستم و در نتیجه کنترل پیش‌بین متعدد این قابلیت را ایجاد می‌کند که برای نواحی مختلف کاری و یا سیستم با نامعینی وسیع کنترل‌کننده با عملکرد مطلوب طراحی شود. از همان مدل‌هایی که در کنترل پیش‌بین به کار

رفته است در ناظر کنترل ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه نیز استفاده می‌شود. تابع هزینه کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

$$J = \min_{u_k} \sum_{k=N_1}^{N_2} (y_k - w_k) + \lambda \sum_{k=1}^{N_u} \Delta u_k \qquad (۱۲)$$

که در آن y_k ، w_k و u_k به ترتیب خروجی، ورودی مرجع و سیگنال کنترل است. پارامترهای N_1 ، N_2 ، N_u و λ به ترتیب حد پایین افق پیش‌بینی، حد بالای افق پیش‌بینی، افق کنترل و ضریب وزنی و $\Delta = 1 - q^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود. معمولاً حد پایین افق پیش‌بینی برابر تأخیر و حد بالا در بازه زمان نشت انتخاب می‌شود. وجود انتگرال گیر باعث ردیابی ورودی پله و همچنین حذف اغتشاش پله می‌شود. در مرجع [۲۲] با استفاده از مدل سیستم نشان داده شده است که رابطه (۱۳) برقرار است.

$$Y = G\,U + f$$
$$Y = \begin{bmatrix} \hat{y}_{k+d+1|k} \\ \hat{y}_{k+d+2|k} \\ \cdots \\ \hat{y}_{k+d+N_p|k} \end{bmatrix},\quad U = \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \cdots \\ \Delta u_{k+N_u-1} \end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه ماتریس G را می‌توان از پاسخ پله سیستم حلقه باز و یا روابط بازگشتی موجود در مرجع [۲۲] از روی مدل سیستم محاسبه کرد. همچنین f پاسخ آزاد سیستم است و با استفاده از روابط بازگشتی مرجع [۲۲] محاسبه می‌شود. با جایگذاری این رابطه در تابع هزینه بهینه‌سازی زیر به دست می‌آید.

$$J = \min_{U} \frac{1}{2} U^T H\,U + b^T\,U + f_0 \qquad (۱۴)$$

که در آن پارامترها به‌صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود. برای جزییات روابط به مرجع [۲۲] مراجعه کنید.

$$H = 2(G^T G + \lambda\, I) \qquad ,b^T = 2(f - W)^T G$$
$$f_0 = (f - W)^T (f - W)$$
$$W = [w_{k+d+1|k},\ \ w_{k+d+2|k},\ \ \cdots,\ \ w_{k+d+N_p|k}]^T \qquad (۱۵)$$

حل این مسئله در حالتی که قید فعال نباشد به‌صورت تحلیلی امکان‌پذیر است.

$$U = (\,G^T G + \lambda\, I\,)^{-1} G^T (W - f) \qquad (۱۶)$$

طبق قاعده RHC[1] فقط اولین u به دست آمده طبق رابطه (۱۷) به سیستم اعمال می‌شود.

$$R(q^{-1})\Delta u_k = T(q^{-1}) w_k - S(q^{-1}) y_k \qquad (۱۷)$$

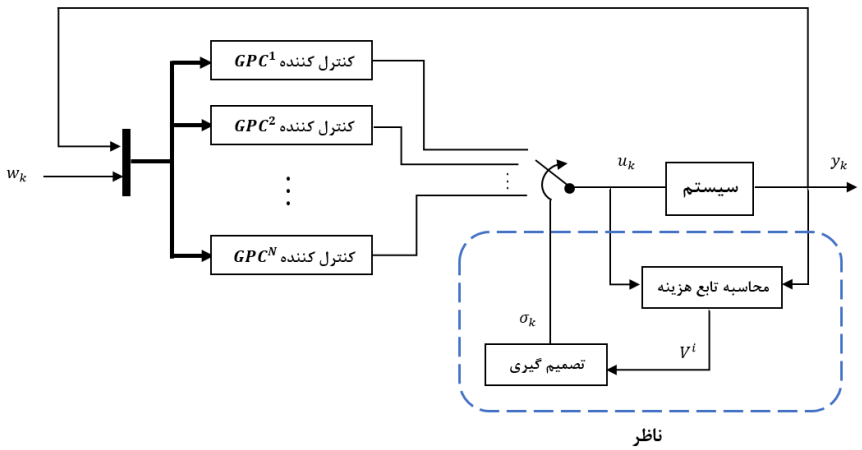
چند جمله‌ای های S،T و R در رابطه (۱۷) بطور مستقیم از رابطه (۱۶) برای اولین سیگنال کنترلی محاسبه می‌شود. برای حل مسئله کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه فرض فعال نبودن قید در نظر گفته می‌شود. برای هر GPC می‌توان R^i ، T^i و S^i $i = 1, \ldots, N$ را محاسبه کرد.

۴-۱- سیگنال مجازی مرجع در MMUGPC

در این بخش سیگنال مجازی مرجع برای MMUGPC تعیین می‌شود. مطابق تعریف ۵ و همانند رابطه (۴) می‌توان سیگنال مجازی مرجع را برای MMUGPC به دست آورد. با استفاده از رابطه (۱۷) برای هر کنترل‌کننده GPC سیگنال مجازی مرجع به‌صورت قابل محاسبه است.

$$\tilde{r}_k^i = \frac{R^i(q^{-1})}{T^i(q^{-1})}\,\Delta u_k + \frac{S^i(q^{-1})}{T^i(q^{-1})} y_k \qquad (۱۸)$$

حال با این ورودی مرجع به محاسبه حلقه‌های کاندید کنترلی در رابطه (۱۹) پرداخته شده است. با توجه به این روابط دیده می‌شود که سیگنال مجازی مرجع قابل حذف از معادلات است و می‌توان y_k^i و u_k^i را به‌طور مستقیم از y و u مطابق رابطه (۲۰) محاسبه کرد.



شکل ۴: ساختار کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه

[1] Receding Horizon Control

$$u_k^i = \frac{T^i(q^{-1})}{R^i(q^{-1})\Delta}\,\tilde{r}_k^i - \frac{S^i(q^{-1})}{R^i(q^{-1})\Delta}\,y_k^i$$
$$y_k^i = \frac{B^i(q^{-1})}{A^i(q^{-1})}u_k^i \qquad (۱۹)$$
$$\tilde{r}_k^i = \frac{A^i(q^{-1})R^i(q^{-1})\Delta + B^i(q^{-1})S^i(q^{-1})}{A^i(q^{-1})T^i(q^{-1})}u_k^i$$

$$\begin{aligned}&\left(A^i(q^{-1})R^i(q^{-1})\Delta + B^i(q^{-1})S^i(q^{-1})\right)u_k^i = \\ &= A^i(q^{-1})R^i(q^{-1})\Delta\,u_k + A^i(q^{-1})S^i(q^{-1})\,y_k \\ &\left(A^i(q^{-1})R^i(q^{-1})\Delta + B^i(q^{-1})S^i(q^{-1})\right)y_k^i = \\ &= B^i(q^{-1})R^i(q^{-1})\Delta\,u_k + B^i(q^{-1})S^i(q^{-1})\,y_k\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

به این ترتیب با توجه به این رابطه الگوریتم پیشنهادی برای MMUGPC به‌صورت الگوریتم ۷ خلاصه می‌شود.

الگوریتم ۷–MMUGPC

1. $Let\ t = 0, k = 0, \hat{K}_0 = K_0\ and\ choose\ h > 0$
2. $k + 1 \to k$
3. Collect u_k , y_k and update u_k^i , y_k^i eq. (20)
4. Calculate $V(K^i)$ eq. (11)
   $If\ \ V(\hat{K}_{k-1}, u_k, y_k, k) > \min_K V(K, u_k, y_k, k) + h$
   $\arg\min_K V(K, u_k, y_k, k) \to \hat{K}_k$
   $Else$
   $\hat{K}_{k-1} \to \hat{K}_k$
   END
5. Go to 2.

در ادامه قضیه‌ای برای اثبات پایداری الگوریتم ۷ ارائه می‌شود.

قضیه– برای سیستم با رابطه (۹) تحت کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه با تابع هزینه (۱۱) و رابطه (۲۰) به شرط پایداری تمام حلقه‌های کاندید کنترلی و وجود کنترل‌کننده پایدارساز در هر زمان، گزاره‌های زیر برقرار است:

- کلیدزنی در زمان محدود متوقف می‌شود.
- پایداری سیستم حلقه بسته ابطال‌ناپذیر است.
- زمان k_0 وجود دارد به‌طوری که بعد از آن هیچ کنترل‌کننده ناپایدارساز وارد حلقه نمی‌شود. همچنین اگر h به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود هر کنترل‌کننده حداکثر یک‌بار در حلقه وارد می‌شود و اگر کنترل‌کننده پایدارساز انتخاب شود، در حلقه می‌ماند.

اثبات– اثبات پایداری در اینجا مشابه [۵] و [۸] است. اساس اثبات بر این است که کلیدزنی در زمان محدود متوقف شده و آخرین کنترل‌کننده پایدارساز است. وجود یک کنترل‌کننده پایدارساز و شرط آشکارپذیری تابع هزینه باعث می‌شود که آخرین کنترل‌کننده پایدارساز و تابع هزینه آن محدود باشد. رابطه (۲۰) را می‌توان به‌صورت زیر هم نمایش داد:

$$\begin{pmatrix}u_k^i\\ y_k^i\end{pmatrix} = \frac{1}{A^iR^i\Delta + B^iS^i}\begin{bmatrix}A^iR^i\Delta & A^iS^i\Delta\\ B^iR^i & B^iS^i\end{bmatrix}\begin{pmatrix}u_k\\ y_k\end{pmatrix} \qquad (۲۱)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۲۲) تابع هزینه به‌صورت رابطه (۲۳) قابل نمایش است.

$$\mathcal{H}^i = \frac{1}{A^iR^i\Delta + B^iS^i}\begin{bmatrix}A^iR^i\Delta & A^iS^i\Delta\\ B^iR^i & B^iS^i\end{bmatrix} \qquad (۲۲)$$

$$V(K^i) = \max_k \frac{\|(I - \mathcal{H}^i)\begin{pmatrix}u_k\\ y_k\end{pmatrix}\|}{\left\|\mathcal{H}^i\begin{pmatrix}u_k\\ y_k\end{pmatrix}\right\| + \epsilon} \qquad (۲۳)$$

به این ترتیب β ای وجود دارد که در رابطه زیر صدق می‌کند.

$$\begin{aligned}\left\|\begin{pmatrix}u_k\\ y_k\end{pmatrix}\right\| - \left\|\begin{pmatrix}u_k^i\\ y_k^i\end{pmatrix}\right\| &\le \left\|\begin{pmatrix}u_k - u_k^i\\ y_k - y_k^i\end{pmatrix}\right\| \\ &\le \beta\left(\left\|\begin{pmatrix}u_k^i\\ y_k^i\end{pmatrix}\right\| + \|\tilde{r}_k^i\|\right)\end{aligned} \qquad (۲۴)$$

با ساده‌سازی به پایداری ورودی خروجی می‌رسیم.

$$\left\|\begin{pmatrix}u_k\\ y_k\end{pmatrix}\right\| \le (\beta + 1)\left\|\begin{pmatrix}u_k^i\\ y_k^i\end{pmatrix}\right\| + \beta\|\tilde{r}_k^i\| \qquad (۲۵)$$

همچنین حد بالای تعداد کلیدزنی N_{ul} از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$N_{ul} \le N\left\lfloor\frac{\beta}{h}\right\rfloor \qquad (۲۶)$$

به این ترتیب اثبات قضیه کامل می‌گردد.□

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت در مثال ۱ برای یک سیستم ناپایدار با تأخیر نامعین و در مثال ۲ برای سیستم راکتور تانک همزن پیوسته(CSTR)[1] کنترل نظارتی پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه طراحی شده است.

مثال ۱: فرض کنید سیستمی نامعین با رابطه زیر داریم:

$$G = \frac{e^{-(0.95+\delta)s}}{s-2} \quad |\delta| \le 0.05$$

برای این سیستم نامعین، سه مدل نامی به‌صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$G_1 = \frac{e^{-0.9s}}{s-2}, \qquad G_2 = \frac{e^{-0.95s}}{s-2}, \qquad G_3 = \frac{e^{-s}}{s-2}$$

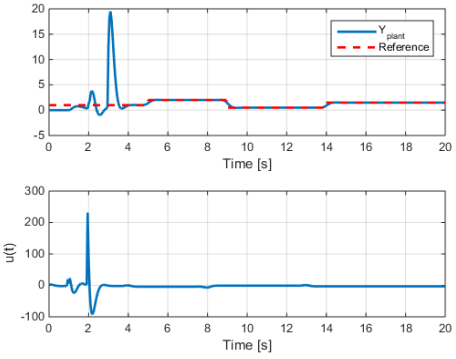
پارامترهای GPC برای هر سه مدل به‌صورت جدول ۱ انتخاب می‌شود.

[1] Continuous stirred-tank reactor

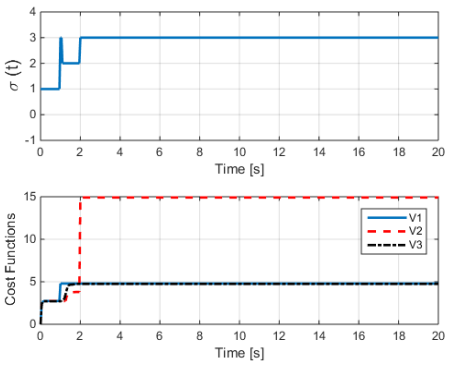
برای شبیه‌سازی اگر سیستم را همان G_3 و یا $\delta = 0.05$ قرار دهیم، بنابراین GPC^3 برای این سیستم پایدارساز ولی GPC^1 و GPC^2 ناپایدارساز است. همچنین فرض می‌کنیم در ابتدا GPC^1 در حلقه قرار بگیرد. ابتدا نتایج برای الگوریتم UAC و سپس برای الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. پارامترهای UAC و MMUGPC مطابق جدول ۱ انتخاب می‌شود. پاسخ سیستم به ورودی پله‌ای به‌صورت شکل (۵) و (۷) است. توجه کنید که در شبیه‌سازی فرض شده است که آینده سیگنال مرجع در دسترس نیست بنابراین در خروجی تأخیر سیستم دیده می‌شود. خروجی و سیگنال کنترلی در شکل (۵) و (۷) و سیگنال کلیدزنی و توابع هزینه مربوط به هر کنترل‌کننده در شکل (۶) و(۸) نشان داده شده است. با مقایسه MMUGPC و UAC مشخص است که روش پیشنهادی عملکرد بهتری دارد. در الگوریتم UAC بدلیل اینکه کنترل‌کننده پایدار ساز دیرتر در حلقه قرار می‌گیرد، سیگنال کنترل و خروجی به نسبت بزرگتر هستند.

جدول ۱- پارامترهای MMUGPC و UAC برای مثال ۱

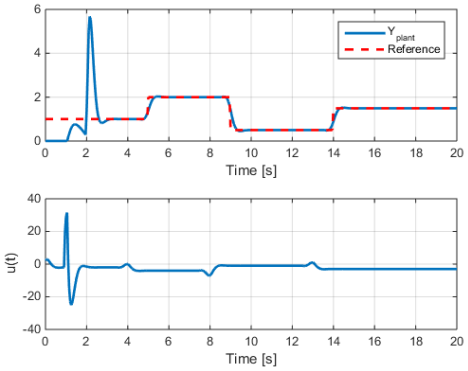
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
T_s	۰/۰۵ ثانیه	N_1	تأخیر
λ	۰/۱	N_2	۳۰
h	۰/۱	N_u	۳۰
ϵ	۰/۱		



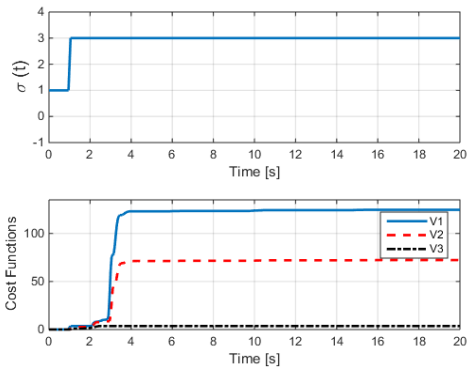
شکل ۵: خروجی و سیگنال کنترل برای UAC



شکل ۶: سیگنال کلیدزنی و توابع هزینه برای UAC



شکل ۷: خروجی و سیگنال کنترل برای MMUGPC



شکل ۸: سیگنال کلیدزنی و توابع هزینه برای MMUGPC

در الگوریتم MMUGPC در شکل (۸) در ابتدا توابع هزینه نزدیک به یکدیگر هستند ولی به محض اینکه تابع هزینه اول به اندازه h از سومی بزرگ‌تر شده است، کنترل‌کننده سوم در حلقه قرار گرفته است. تقریباً ۱ ثانیه کنترل‌کننده ناپایدار ساز GPC^1 در حلقه می‌ماند و سپس ناظر کنترل‌کننده پایدارساز GPC^3 را انتخاب می‌کند.

مثال۲: CSTR یک سیستم پرکاربرد در صنعت است. این سیستم سه ورودی دو خروجی دارد که مدل دینامیکی غیرخطی آن در مرجع [۲۳] مطابق زیر در نظر گرفته شده است.

$$\dot{C_A} = \frac{F}{V} \times (C_{Ai} - C_A) - k_0 \times e^{-\frac{E}{RT}} \times C_A$$

$$\dot{T} = \frac{F}{V} \times (T_F - T) - \left(\frac{H}{HD}\right) \times k_0 \times e^{-\frac{E}{RT}} \times C_A - \left(\frac{HA}{HD \times V}\right) \times (T - T_C)$$

که در آن C_{Ai}، T_F، T_c، C_A و T به ترتیب غلظت ماده ورودی، دمای ماده ورودی، دمای ماده سردکننده، غلظت ماده خروجی و دمای ماده خروجی است. بقیه پارامترها و ثابت‌ها در جدول ۲ معرفی شده‌اند. C_{Ai}، T_F و T_c ورودی‌ها و C_A و T خروجی های این سیستم هستند. در اینجا برای سادگی، ورودی‌های C_{Ai} و T_F ثابت و به ترتیب برابر ۱۰ و ۲۹۸ در نظر گرفته شده و سیستم از ورودی T_c به خروجی T کنترل می‌شود و کنترلی برای C_A بصورت جداگانه نداریم. برای طراحی کنترل کننده پیش بین تعمیم یافته دو مدل خطی در دونقطه کار متفاوت برای این سیستم در نظر گرفته و سپس برای این مدل‌های خطی GPC طراحی می-

کنیم. نقطه کار اول ($y = ۲۹۰، u = ۲۴۷/۷۵$) و نقطه کار دیگر ($y = ۳۱۰، u = ۲۹۶/۷$) معرفی می‌شود. مدل خطی سیستم در این دو نقطه کار بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$M_1 = \frac{0.29169}{13.765\,s + 1}, \qquad M_2(s) = \frac{0.61061}{21.937\,s + 1}$$

مطابق جدول ۳ برای این دو نقطه کار دو GPC طراحی می‌شود. برای اعمال هر دو GPC بروی سیستم غیرخطی کنترل‌کننده‌ها برای نقاط کاری مربوطه بایاس می‌شوند. در شبیه‌سازی خروجی مطابق شکل ۹ و تابع هزینه و سیگنال کلیدزنی مطابق شکل ۱۰ است. ابتدا ورودی مرجع برابر ۲۹۰ و بعد از ۱۵۰۰ ثانیه ورودی مرجع به ۳۰۰ تغییر می‌کند. در نیمه اول شبیه‌سازی کنترل‌کننده اول و در نیمه دوم کنترل‌کننده دوم عملکرد مناسبی دارد. در شبیه‌سازی MMUGPC در ثانیه‌های اولیه به‌درستی کنترل‌کننده اول انتخاب شده و تا ۱۷۷۰ ثانیه در حلقه می‌ماند. وقتی ورودی مرجع به ۳۱۰ تغییر می‌کند ۲۷۰ ثانیه طول می‌کشد تا کنترل‌کننده دوم انتخاب شود. به‌محض اینکه کنترل‌کننده اول در قسمت دوم از خود حالت ناپایداری نشان می‌دهد یا به بیانی تابع هزینه کنترل‌کننده اول از دومی بزرگ‌تر می‌شود، این کنترل‌کننده کنار گذاشته شده و دیگری جایگزین می‌شود.

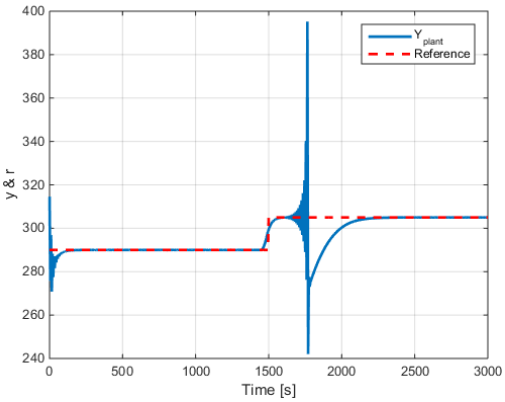
۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله نخست سیستم‌های کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر بررسی و نقد شده‌اند. سپس کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه تشریح شده است. ایده اصلی در کنترل ابطال‌ناپذیر تشخیص کنترل‌کننده‌های ناپایدارساز تنها با داده‌ی ورودی خروجی از سیستم است. این روش‌ها از جمله روش‌های کنترل تطبیقی مقاوم ناوابسته به مدل سیستم هستند. تنها شرط اجرای الگوریتم‌ها وجود یک کنترل‌کننده پایدارساز در مخزن کنترلی است که پیش‌تر طراحی شده است. اثبات پایداری این روش‌ها موجود است و نیاز به مدل‌سازی‌های متداول ندارد.

در این مقاله، کنترل پیش‌بین ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه برای نخستین بار پیشنهاد شده است که ترکیبی از مزایای کنترل تطبیقی ابطال‌ناپذیر و کنترل پیش‌بین را دارد. در این روش از کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته همراه کنترل ابطال‌ناپذیر مدل چندگانه استفاده شده است. کنترل پیش‌بین در حالتی که قید فعال نیست در نظر گرفته شده است و حالت مقید آن از زمینه‌های پژوهشی آینده است. با عملیات جبری نشان داده شد که در ساختار معرفی شده نیازی به محاسبه سیگنال مجازی مرجع نیست. در واقع روابط مستقیم میان ورودی-خروجی سیستم و تابع هزینه استخراج شده است. سرانجام عملکرد مناسب روش پیشنهادی با اجرای شبیه‌سازی نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای MMUGPC برای CSTR

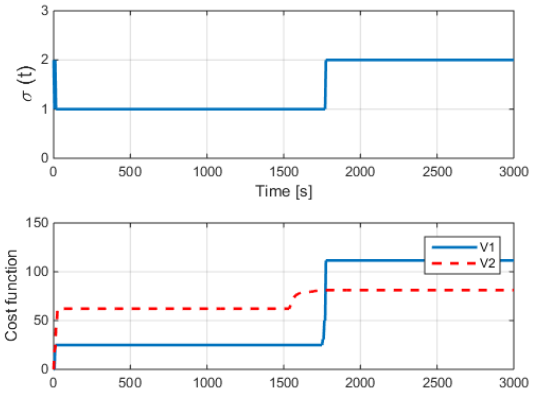
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
T_s	۵ ثانیه	h	۰/۱
λ_{GPC1}	۱/۱	N_1	۱
λ_{GPC2}	۸	N_2	۱۰
ϵ	۰/۱	N_u	۱۰



شکل ۹: خروجی CSTR

جدول ۲- پارامترها و ثابت‌های CSTR

پارامتر	مقدار	توضیحات	واحد
F	۱	نرخ جریان حجم	$[m^3/h]$
V	۱	حجم راکتور	$[m^3]$
K_0	۳/۵×۱۰^{۷}	فاکتور غیرحرارتی نمایی	$[1/h]$
E	۱۱۸۵۰	انرژی فعال سازی	$[kcal/kgmol]$
R	۱/۹۸۵۸۹	ثابت بولتزمن گازها	$[kcal/(kgmol \times K)]$
H	-۵۹۶۰	گرمای واکنش	$[kcal/kgmol]$
HD	۴۸۰	ظرفیت گرمایی ضرب در چگالی	$[kcal/(m^3 \times K)]$
HA	۱۴۵	ضریب انتقال حرارت کلی ضرب در سطح	$[kcal/(K \times h)]$



شکل ۱۰: سیگنال کلیدزنی و توابع هزینه برای CSTR

مراجع

[1] K. Narendra and J. Balakrishnan, 1997, "Adaptive control using multiple models," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 42, no. 2, pp. 171–187.

[2] S. Fekri Asl, M. Athans and A. Pascoal, 2006, "Issues, progress and new results in robust adaptive control," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 20, pp. 519–579.

[3] S. Baldi, P. A. Ioannou and E. B. Kosmatopoulos, 2012, "Adaptive mixing control with multiple estimators," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 26, no. 8, pp. 800-820.

[4] M. Safonov and T. Tsao, 1997, "The unfalsified control concept and learning," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 42, no. 6, pp. 843–847.

[5] S. Baldi, G. Battistelli, E. Mosca and P. Tesi, 2010, "Multi-model unfalsified adaptive switching supervisory control," Automatica, vol. 46, no. 2, pp. 249–259.

[6] H. Jin, H. B. Siahaan, M. W. Chang and M. G. Safonov, 2014, "Improving the Transient Performance of Unfalsified Adaptive Control with Modified Hysteresis Algorithms," in IFAC, South Africa.

[7] K.S. Sajjanshetty, M.G. Safonov, 2014, "Unfalsified Adaptive Control: Multi-objective cost-detectable cost functions," in IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control (CDC), Los Angeles, USA.

[8] S. Baldi, G. Battistelli, E. Mosca and P. Tesi, 2011, "Multi-model unfalsified adaptive switching control: Test functionals for stability and performance.," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 25, no. 7, pp. 593-612.

[9] G. Battistelli, E. Mosca and P. Tesi, 2014, "Adaptive memory in multi-model switching control of uncertain plants," Automatica, vol. 50, no. 3, pp. 874-882.

[10] G. Battistelli, D. Mari, D. Selvi, A. Tesi and P. Tesi, 2014, "Adaptive disturbance attenuation via logic-based switching," Systems & Control Letters, vol. 73, pp. 48-57.

[11] A.S. Morse, 1996, "Supervisory control of families of linear set-point controllers — Part I: exact matching," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 41, no. 10, pp. 1413–1431.

[12] R. Wang, A. Paul, M. Stefanovic and M. G. Safonov, 2007, “Cost detectability and stability of adaptive control systems,” International Journal of Robust Nonlinear Control, vol. 17, pp. 549–561.

[13] A.S. Morse, D. Mayne and G. Goodwin, 1992, "Applications of hysteresis switching in parameter adaptive control," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 37, no. 9, pp. 1343–1354.

[14] M. Stefanovic and M.G. Safonov, 2008, "Safe adaptive switching control: Stability and convergence," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, no. 9, pp. 2012-2021.

[15] B.D.O. Anderson and A. Dehghani, 2008, "Challenges of adaptive control–past, permanent and future," Annual reviews in control, vol. 32, no. 2, pp. 123-135.

[16] M. Chang and M. G. Safonov, 2008, "Unfalsified Adaptive Control: The Benefit of Bandpass Filters," in AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, USA.

[17] J. Hespanha, D. Liberzon and A.S. Morse, 2003, "Hysteresis-based switching algorithms for supervisory control of uncertain systems," Automatica, vol. 39, no. 2, pp. 263–272.

[18] H. Jin and M.G. Safonov, 2012, "Unfalsified adaptive control: Controller switching algorithms for nonmonotone cost functions," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 26, no. 8, pp. 692-704.

[19] P. Rosa, J. S. Shamma, C. Silvestre and M. Athans, 2011, "Stability overlay for adaptive control laws," Automatica, vol. 47, no. 5, pp. 1007-1014.

[20] B.D.O. Anderson, T.S. Brinsmead, F. De Bruye, J.P. Hespanha, D. Liberzon and A.S. Morse, 2001, " Multiple model adaptive control, part 2: switching," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 11, no. 5, pp. 479–496.

[21] A.S. Morse, 1995, "Trends in control: a European perspective," in Control using logic-based switching, London, Springer, pp. 69–113.

[22] E. F. Camacho and C.B. Alba, 2013, Model predictive control, Springer Science & Business Media.

[23] D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, F. J. Doyle III, 2010, Process dynamics and control, John Wiley & Sons.