

بررسی روشهای کنترل پیش بین با کاربردهایی در سیستمهای دینامیکی خطی و مقایسه آن با کنترل کننده های کلاسیک PID

سعید قربانی^۱ محمود سموات^۱ محمد علی ولی^۲
Saeed_Ghorbani@graduate.uk.ac.ir msamavat@mail.uk.ac.ir mvali@mail.uk.ac.ir

۱ - بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲ - پژوهشگاه ماهانی، دانشکده ریاضی و کامپیوتر دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

کنترل پیش بین یکی از روشهای کنترل بهینه است که بر پایه تئوری افق دور شونده استوار است. در این روش بردار بهینه کنترل در یک افق محدود با بهینه سازی یک تابع هدف که خطای میان خروجی آینده سیستم را با یک مسیر از پیش تعیین شده بهینه می نماید، حاصل می گردد. بر اساس تئوری افق دور شونده تنها اولین درآیه بردار کنترل به فرآیند اعمال می گردد و این الگوریتم در مرحله بعدی مجدداً تکرار می گردد. در این مقاله به بررسی روشهای مختلف کنترل پیش بین از جمله MAC، DMC، GPC و..... پرداخته و بر مبنای نتایج حاصل از شبیه سازی الگوریتم های کنترل پیش بین در شرایط فرآیندهای خطی با مرتبه و تأخیر زمانی متغیر در محیط MATLAB نشان داده می شود که این روش ها در مقایسه با کنترل کننده های کلاسیک PID از عملکرد مطلوبتری برخوردار می باشند.

کلمات کلیدی: کنترل کننده پیش بین بر مبنای مدل، افق دور شونده

۱- مقدمه

امروزه نحوه کنترل فرآیندهای صنعتی و انتخاب روش مناسب جهت این منظور اهمیت بسزایی دارد. الگوریتم کنترل مورد استفاده در صنعت می بایستی دارای توانایی های مطلوب از جمله سهولت بکار گیری توسط اپراتور و تنظیم ساده آن باشد، که در واقع این خود معیاری برای گسترش کاربرد صنعتی آن خواهد بود. گرچه استفاده از کنترل کننده PID در صنعت رایج می باشد، ولی فرآیندهای صنعتی از نظر دینامیکی طیف وسیعی از رفتار های مختلف را شامل می گردند که کاربرد چنین کنترل کننده ای را محدود می سازد. دلیل گستردگی رفتار های دینامیکی احتمالاً ناشی از عوامل مختلفی چون وجود صفر های خارج ناحیه پایدار، قطب های ناپایدار، تأخیر زیاد که متغیر با زمان و نامشخص باشد و نیز وجود محدودیتهایی بر متغیر های فرآیند می باشد، که این مورد باعث غیر خطی شدن فرآیند خواهد شد. الگوریتم کنترل پیش بین روشی برای مقابله با چنان فرآیندهای پیچیده ای است، که در آن مسیر مینا به اندازه افق پیش بینی، از قبل مشخص می باشد، حال بایستی خروجی کنترل کننده را چنان تعیین نمود تا خروجی پیش بینی شده فرآیند تا حد ممکن به مسیر مینا نزدیک باشد. روشهای نسبتاً زیادی تحت عنوان کنترل پیش بین تا به حال ارائه گردیده که در واقع سیر تکاملی و برخورد بهتر و دقیقتر آن را با مشکلات می رساند. روش کنترل پیش بین توانایی

کنترل سیستم های تک ورودی - تک خروجی (SISO) و چند ورودی - چند خروجی (MIMO) در حالت های پیوسته و گسسته دارا می باشد. مهمترین مدعای این الگوریتم در اعمال آن به فرآیند غیر خطی و توانایی کنترل آنها می باشد. قابلیت کنترل فرآیندهای غیر خطی، که تغییر پذیر با زمان نیز باشند و در شرایطی که محدودیتهای متنوع بر متغیرهای فرآیند مد نظر باشد، این کنترل کننده ها را بصورت یک روش متمایز و برتر از سایر روشها می سازد. در حالت کلی این الگوریتم که متعلق به کنترل کننده های بر اساس مدل (Model Based) می باشد، تعمیمی بر روشهای جایابی قطب (Pole Placement) و کنترل بهینه (Linear quadratic) بوده، ضمن این که نقاط ضعف آنها را تا حد ممکن از بین برده و بعلاوه مقاوم بودن (Robustness)، توانایی بیشتر آن تأیید می شود. بعلاوه در فرآیند های چند متغیره که شرایط دکوپله سازی در آنها برقرار می باشد، با اعمال کنترل کننده پیش بین میتوان مسیر های مبنای متفاوتی را برای هر یک از خروجیها بطور مطلوب دنبال و اغتشاشات ناخواسته را در خروجی حذف نمود. علاوه بر موارد فوق که توانایی های مطلوب این الگوریتم را در کنترل سیستم های پیچیده نشان می دهد، خصوصیات دیگر آن از جمله آسان بودن نحوه تنظیم پارامتر های کنترل کننده، نیز خود عامل مهمی در کاربرد های عملی آن می باشد.

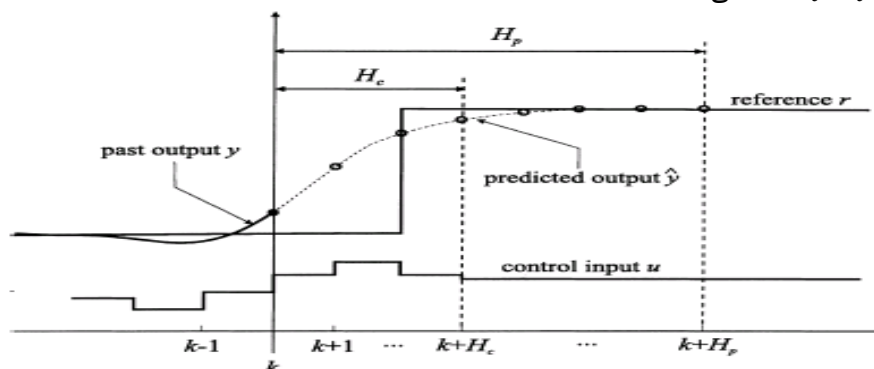
۲- روش طراحی MPC

روش طراحی MPC بر سه مفهوم اصلی بنا شده است که عبارتند از:

- مدل - استفاده از یک مدل برای پیش بینی سیگنالهای خروجی فرآیند.
- تابع هدف - محاسبه یک رشته از سیگنالهای کنترل از روی کمینه کردن یک تابع هدف معین شده.
- روند بهینه سازی - معمولاً از استراتژی افق دور شونده^۱ استفاده می شود، به این معنی که از رشته کنترل بهینه کننده تابع هدف، تنها اولین فرمان کنترلی رشته به فرآیند اعمال می گردد و برای مراحل بعدی مجدداً عملیات بهینه سازی تکرار می شود.

۲-۱ مدل

مدل فرآیند باید بتواند به خوبی رفتار و وضعیت سیگنالهای خروجی آن را تشریح کند. در یک افق پیش بینی H_p ، خروجی های آینده $y(k+i)$ ($i=1,2,\dots,H_p$) با استفاده از مدل فرآیند پیش بینی می شوند. این مقادیر به حالت فعلی فرآیند و سیگنالهای کنترلی آینده $u(k+i)$ ($i=1,2,\dots,H_c-1$) بستگی دارند، که در آن $H_c \leq H_p$ بوده و افق کنترل نامیده می شود (شکل ۱). سیگنالهای کنترل $u(k+i)$ فقط تا افق کنترل محاسبه شده و پس از آن ثابت در نظر گرفته می شوند بعبارت دیگر سیگنال کنترل $u(k+i)$ همان $u(k+H_c-1)$ در زمانهای $i = H_c, H_c+1, \dots, H_p-1$ می باشد.



شکل (۱): روش کنترل پیش بین بر مبنای مدل

^۱ Receding Horizon

۲-۲ تابع هدف

رشته سیگنالهای کنترل آینده $u(k+i)$ ($i = 0, 1, \dots, H_c - 1$) با بهینه سازی یک تابع هدف داده شده محاسبه می شوند. تابع هزینه، هدف فرآیند را از زمان $k+1$ تا $k+H_p$ تعریف می کند. در بسیاری از حالتها، اختلاف بین خروجی های سیستم و یک مسیر مرجع به همراه یک تابع هزینه از سیگنالهای کنترل، جهت بیان تابع هدف مورد استفاده قرار می گیرند. تابع هدف به فرم کلی مربعی به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$\min_{u(t), u(t+1), u(t+2), \dots, u(t+N-1)} J(k) = \left\{ \left\| \sum_{j=d}^N \hat{y}(t+j) - y_r(t+j) \right\|_{Q(j)}^2 + \sum_{j=1}^M \left\| w(z^{-1})u(t+j-1) \right\|_{R(j)}^2 \right\} \quad (1)$$

که در آن P_i و Q_i ماتریسهای وزنی معین مثبت و $\|z\|_{P_i}^2 = z^T P_i z$ می باشد. بخش اول تابع هزینه اختلاف بین مرجع و خروجی سیستم را کمینه نموده درحالی که بخش دوم، جریمه ای بر روی عمل کنترل نمایش می دهد، که در ارتباط با مصرف انرژی بوده و سعی بر هموار نمودن سیگنالهای کنترلی در حد امکان دارد. در ادامه به بررسی انواع الگوریتمهای کنترل پیش بین که از استراتژی فوق استفاده می کنند می پردازیم.

۳- انواع روشهای کنترل پیش بین مدل

انواع الگوریتمهای کنترل پیش بین عبارتند از:

- (۱) Model Algorithmic Control (MAC)
- (۲) Dynamic Matrix Control (DMC)
- (۳) Predictive Control Algorithm (PCA)
- (۴) Extended Horizon Adaptive Control (EHAC)
- (۵) Extended Prediction Self Adaptive Control (EPSAC)
- (۶) Generalized Predictive Control (GPC)
- (۷) Receding Horizon Tracking Control (RHTC)

هر یک از روش های کنترل پیش بین (۱) تا (۷) بر مبنای پارامترهای زیر از همدیگر متمایز می شوند.

- مدل فرآیند
- تابع هزینه
- فرضیات مربوط ورودی های کنترل در آینده
- فرضیات مربوط به سیگنالهای مرجع
- روش پیش بینی

در این مقاله کنترل های پیش بین بر مبنای این پارامترها مورد مطالعه و بررسی قرار داده شده است.

۳-۱- انواع مدل های مورد استفاده در کنترل پیش بین

به جهت نقش مهم و ضروری مدل در این روش طراحی، در برخی موارد کنترل پیش بین را کنترل بر مبنای مدل نیز می نامند. کنترل های پیش بین ابتدایی نظیر MAC و PCA بر مبنای مدل های پاسخ ضربه و DMC بر مبنای مدل پاسخ پله می باشند. رابطه بین ضرایب پاسخ ضربه $\{h_i\}$ و ضرایب پاسخ پله $\{s_i\}$ عبارتست از:

$$s_K = \sum_{i=1}^K h_i \quad K=1, 2, \dots \quad (2)$$

و

$$h_K = s_K - s_{K-1} \quad (3)$$

عدم نیاز به اطلاعات اولیه در مورد فرآیند، ساده سازی شناسایی سیستم، توصیف ساده پروسه های پیچیده نظیر پروسه های غیر مینیمم فاز و تأخیر دار از جمله مزایا و ویژگیهای این نوع مدل ها می باشند در حالی که زیاد بودن تعداد پارامتر های لازم جهت شناسایی و شرط پایدار بودن فرآیند تحت بررسی از معایب و محدودیتهای این مدل ها محسوب می شوند.

هر گاه درباره ساختار سیستم دانش ابتدایی و وجود نداشته باشد و یا این که مرتبه حالت های فرآیند خیلی زیاد باشد، طوری که استفاده از مدل های فضای حالت که غالباً جهت طراحی سیستم های کنترل مورد استفاده قرار می گیرند، امکان پذیر نباشد، می بایست از مدل های ورودی/ خروجی پارامتریزه شده جهت شناسایی ساده فرآیند استفاده شود.

روش های کنترل پیش بین EHAC و ESPAC از مدل های ARMAX برای توصیف فرآیند استفاده می کنند.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})e(t) + d(t) \quad (4)$$

که (q^{-1}) عملگر واحد شیفت به عقب و A, B, C چند جمله ای های تعریف شده به شکل زیر می باشند.

$$A(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i q^{-i}, \quad B(q^{-1}) = \sum_{i=0}^m b_i q^{-i}, \quad C(q^{-1}) = \sum_{i=0}^n c_i q^{-i} \quad (5)$$

$e(t)$ یک دنباله تصادفی ناهمبسته با متوسط صفر و $d(t)$ متغیر اغتشاش بار می باشند. همچنان که در [۱۰] نشان داده شده است، مدل های ARMAX توانایی حذف آفست ناشی از اغتشاش بار $d(t)$ را، به ویژه زمانی که $d(t)$ دارای تغییرات سریع باشد دارا نمی باشند.

کنترل پیش بین GPC از مدل های CARIMA، که مناسب جهت حذف آفست می باشند، استفاده می کند. مدل CARIMA به شکل زیر بیان می گردد.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})e(t)/\Delta, \quad \Delta = 1 - q^{-1} \quad (6)$$

اگر چنانچه ساختار داخلی فرآیند مشخص باشد استفاده از مدل های فضای حالت مناسب تر می باشد. البته باید توجه داشت که چنانچه حالات سیستم در دسترس نباشند می بایست از یک تخمینگر حالات استفاده کرد.

۳-۲ سیگنال فرمان، عمل کنترل، تابع هزینه

قوانین کنترل پیش بین، از کمینه سازی تابع هزینه عمومی به فرم زیر محاسبه می گردند.

$$\min_{u(t), u(t+1), u(t+2), \dots, u(t+N-1)} J(k) = \left\{ \left\| \sum_{j=d}^N \hat{y}(t+j) - y_r(t+j) \right\|_{Q(j)}^2 + \sum_{j=1}^M \left\| w(z^{-1})u(t+j-1) \right\|_{R(j)}^2 \right\} \quad (7)$$

که $\|X\|_q^2$ به معنی $X^T q X$ می باشد و پارامتر های قابل انتخاب عبارتند از:

ماکزیمم افق پیش بینی N	مینیمم افق پیش بینی d
ماتریس های وزنی $Q(j), R(j)$	تابع هزینه برای $u(t) = w(q^{-1})$
مسیر مرجع y_r	افق کنترل M

۳-۳-۱ افق های پیش بینی

در کنترل های پیش بین، افق پیش بینی N طوری انتخاب می گردد که قسمت با اهمیت پاسخ پله فرآیند را شامل گردد. به طور معمول مقدار N را برابر زمان خیز فرآیند انتخاب می کنند و مقدار این اثر زیادی بر روی خواص پایداری دارد. چنانچه مقدار N بزرگتر از دو برابر مرتبه سیستم انتخاب گردد، تأثیری بر عملکرد سیستم نخواهد گذاشت. [۴]

مینیمم افق پیش بینی d ، در اکثر کنترل های پیش بین برابر واحد انتخاب می گردد، اما اگر زمان مرده فرآیند (K) از قبل مشخص باشد، مقدار d را بزرگتر مساوی آن انتخاب می کنند. در کنترل پیش بین GPC برای حالت $d \neq 1$ ، می توان قانون کنترل را تعیین کرد. در روش DMC اگر زمان مرده وجود داشته باشد، مسئله منفرد بودن ماتریس دینامیکی افزایش پیدا می کند، با معرفی مینیمم افق پیش بینی می توان بر مسئله منفرد بودن غلبه کرد، چراکه عناصر دنباله پاسخ پله $\{s_i\}$ قبل از زمان مرده، همگی صفر می باشند، و در ماتریس دینامیکی ظاهر نمی شوند.

۲-۳-۲ ماتریس های وزنی و تابع هزینه

در اولین نسخه های روشهای MAC، DMC و ESPAC فقط بخش خطای خروجی در تابع هزینه در نظر گرفته می شد، بنابراین مقادیر $R(j)$ برابر صفر و $Q(j)$ برابر واحد انتخاب می گردید.

در اولین روش کنترل پیش بین MAC، هیچ نوع محدودیتی بر روی سیگنال کنترل اعمال نمی شود و تابع هزینه به صورت $(y(t+1) - y_r(t+1))^2$ تعریف می شود، که این انتخاب منجر به طراحی یک کنترل کننده ناپایدار برای فرآیند های غیر مینیمم فاز می شود.

برای اولین بار ایده افق کنترل، در کنترل پیش بین DMC، معرفی شد. [۶] پس از مدتی $R(j) = r$ و $w(q^{-1}) = \Delta = 1 - q^{-1}$ در $[8, 10, 11]$ جهت حل مسئله منفرد بودن ماتریس دینامیکی که در روش کنترل پیش بین DMC ابتدایی وجود داشت، معرفی گردید.

کنترل پیش بین PCA کاملاً شبیه MAC می باشد، با این فرض که $R(j) = r$ و $Q(j) = 1$ انتخاب می گردند. در کنترل پیش بین ESPAC، دو حالت مختلف برای ورودی کنترل امکان پذیر است.

$$(1) : u(t) = u(t+1) = u(t+2) = \dots u(t+N-1) \quad (8)$$

$$(2) : u(t+1) = u(t+2) = \dots u(t+N-1) = 0 \quad (9)$$

همواره می بایست توجه داشت که قرار دادن وزن بینهایت بر روی خطای خروجی $(y(t+1) - y_r(t+1))$ ، معادل با قراردادن قید $y(t+1) = y_r(t+1)$ می باشد.

کنترل پیش بین EHAC، بر مبنای تابع هزینه $J = \sum_{j=1}^N u^2(t+1)$ می باشد که معادل با قراردادن

$$Q(j) = 0 \text{ for } 0 < j < N, \quad Q(N) = \infty \text{ or } y(t+N) = y_r(t+N) \text{ و } R(j) = 1 \quad (10)$$

این روش، توسعه روش Dead Beat می باشد، که اجازه می دهد فرآیندها با زمانی طولانی تر از زمان مرده، به نقطه هدف با مینیمم تلاشهای کنترلی برسند. اخیراً در روش EHAC [۱۳] دو امکان دیگر برای ورودی های کنترل شبیه روابط (۸) و (۹) مورد بررسی قرار گرفته است.

در کنترل پیش بین GPC، ماتریس وزنی $Q(j)$ برابر واحد و $R(j)$ به شکل دلخواه، انتخاب می گردند. این روش در مقایسه با سایر روشهای کنترل پیش بین بر مبنای مدل ورودی / خروجی عملکرد مطلوبتری از خود نشان داده است. در کنترل پیش بین RHTC، ماتریس های وزنی $Q(j)$ ، $R(j)$ آزادانه انتخاب می گردند. تابع هزینه $w(q^{-1})$ ، معمولاً برابر واحد و یا عملگر دیفرانسیل $\Delta = 1 - q^{-1}$ انتخاب می گردد، که q عملگر شیفت می باشد. برای کنترل های پیش بینی نظیر MAC، DMC و EPSAC، از آنجا که ورودی کنترل ورزن داده شده در تابع هزینه وجود ندارد، نمی توان تابع هزینه $w(q^{-1})$ را تعریف کرد. اخیراً در [۸، ۱۱] تابع هزینه $w(q^{-1}) = \Delta$ برای کنترل پیش بین DMC تعریف شده است.

در کنترل پیش بین GPC، $w(q^{-1}) = \Delta$ ، در حالی که در RHTC $w(q^{-1}) = \Delta$ و یا $w(q^{-1}) = 1$ انتخاب می گردد. در PCA، برای حذف مسائل مطرح شده در روش MAC نظیر ناپایداری فرآیند های غیر مینیمم فاز و یا مسئله منفرد

بودن در حالت زمان مرده ، $w(q^{-1}) = q^{j-1} - q^{-1}$ انتخاب می گردد. در روش EHAC ، $w(q^{-1})$ برابر واحد انتخاب می گردد. [۱۲]

در روش های [۱۵] GPC و [۱۸] RHTC با $w(q^{-1}) = \Delta$ ، حذف آفست برای ورودی های فرمان ثابت تضمین می شود حتی زمانی که Δu در تابع هزینه در نظر گرفته نمی شود، یک ورودی کنترل به شکل Δu ، با کمک معادلات پیش بینی می توان بدست آورد. با استفاده از این روش در الگوریتم های [۶] DMC ، [۱۳] EHAC و [۲۰] ESPAC قوانین کنترل را می توان به شکل Δu ، بدون این که تابع هزینه تغییرات کنترل (Δu) را دارا باشد ، بدست آورد .

۲-۴-۳ افق کنترل

افق کنترل M ، به معنای این است که M ورودی کنترل آینده از لحظه جاری آزاد می باشند، اما بعد از M فاصله زمانی ، تغییرات کنترل مجاز نمی باشد. به عبارت دیگر : $\Delta u(t+j-1) = 0$ for $j > M$ این ایده در ابتدا در کنترل پیش بین [۶،۷] DMC ، مطرح شد و بعد از آن در روشهای [۱۳] EHAC ، [۱۴،۱۵] ESPAC و [۱۹،۲۰] GPC نیز مورد استفاده قرار گرفت. افق کنترل باعث می شود که ورودی کنترل برای M های بزرگ فعال شود و برای مقادیر کوچک M کند و کم تحرک شود. این نتیجه را می توان با تنظیم ماتریس وزنی $R(j)$ ، نیز بدست آورد. افق کنترل M را می توان به معنی قرار دادن وزن بینهایت بر روی حرکت های کنترل ($\Delta u(t+j-1)$ for $j > M$) تفسیر نمود علاوه بر این ایده افق کنترل ، باعث کاهش محاسبات قانون کنترل می شود. در کنترل های پیش بین MAC و PCA ، افق کنترل در تابع هزینه وجود ندارد و این بدین معنی است که افق کنترل M برابر با افق پیش بینی N می باشد.

اثر افق کنترل در [۱۵] به خوبی توضیح داده شده است، که حالت $M=1$ برای اکثر فرآیندهای معمولی پیشنهاد می شود. روش های [۱۳] EHAC و [۱۹،۲۰] ESPAC فقط حالت $M=1$ را مورد استفاده قرار می دهند در [۸] اثر M برای DMC به ویژه حالت $M=1$ مورد بررسی کامل قرار گرفته است.

۲-۴-۳ مسیر مرجع

در اکثر کنترل های پیش بین فرض بر این است که سیگنال فرمان آینده تحت افق پیش بینی از قبل مشخص است در غالب سیستم های کنترل فرآیند ، سیگنال فرمان آینده $y_r(t+j)$ ، ثابت و معادل سیگنال فرمان جاری $y_r(t)$ است در حالی که در برخی سیستم های دیگر ، سیگنال فرمان متغیر و نحوه تغییرات آن مشخص می باشد . در کنترل پیش بین MAC یک مسیر نمایی مرتبه اول ساده ، به عنوان سیگنال فرمان آینده استفاده می شود.

$$y_r(t+j) = \alpha^j y(t) + (1 - \alpha^j) C \quad (11)$$

$$j = 1, 2, \dots, |\alpha| < 1$$

که C یک نقطه تنظیم ثابت و $y(t)$ خروجی واقعی فرآیند در لحظه جاری می باشد . در سایر روشهای کنترل پیش بین فرضیات خاصی بر روی سیگنال فرمان وجود ندارد و سیگنال فرمان (۱۱) را می توان برای این روشها نیز تعریف کرد. اثر α بر روی پایداری سیستم حلقه بسته در [۳،۴] به شکل کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است . جدول زیر اختلافات بین روشهای مختلف کنترل پیش بین را به شکل خلاصه بیان می کند. همچنان که قبلا اشاره شد برخی از این روش ها به منظور شامل شدن ویژگیهای که در نسخه های ابتدایی وجود نداشت، توسعه یافته اند. جدول (۱) بر مبنای محتویات مراجع ابتدایی این روشها تنظیم شده است.

جدول (۱): خلاصه ای از کنترل های پیش بین

X: not included in the cost

	MAC	DMC	PCA	EHAC	ESPAC	GPC	RHTC
plant model	IMPULSE	STEP	IMPULSE	ARMAX	ARMAX	CARIMA	STATE SPACE
prediction horizon N	N	N	N	N	N	N	N
minimum horizon d	۱	۱	۱	۱	۱	d	۱
costing function w	X	X	$q^{j-1}-q^{-1}$	۱	X	$1-q^{-1}$	$1, 1-q^{-1}$
error weighting Q	۱	۱	Q	$0, Q(N)=\infty$	۱	Q	Q
control weighting R	.	.	R	۱	.	R	R
control horizon M	N	M	N	N	۱	M	N

۴- ساختار کنترلر

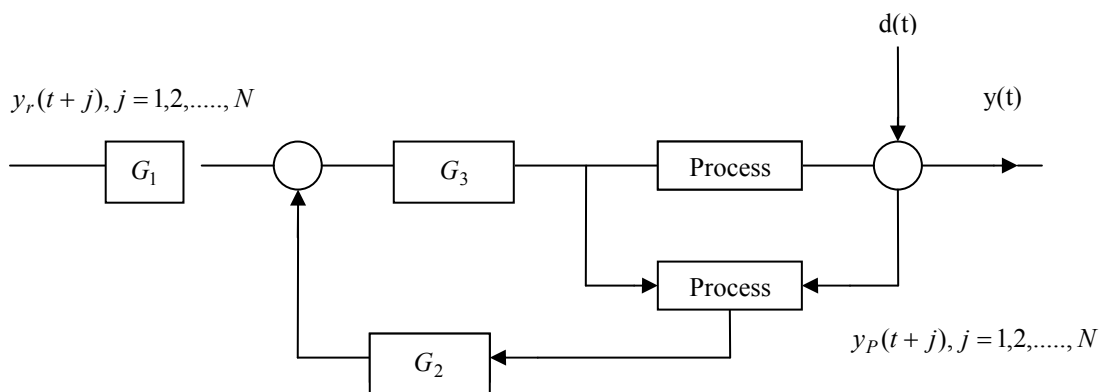
در این مرحله به بررسی ساختار سیستم حلقه بسته می پردازیم در کنترل های پیش بینی که بر مبنای مدل ورودی/خروجی می باشند به طور معمول از خروجی پیش بینی شده $\hat{y}(t+j)$ به جای $y(t+j)$ در تابع هزینه استفاده می کنند. خروجی پیش بینی شده $\hat{y}(t+j)$ ، عبارتست از:

$$\hat{y}(t+j) = y_p(t+j) + y_f(t+j) \quad (12)$$

که $y_p(t+j)$ ، کمیت وابسته به ورودی و خروجی های اندازه گیری شده در گذشته می باشد، و $y_f(t+j)$ وابسته به سیگنال کنترل آینده می باشد.

در روش RHTC که بر مبنای مدل فضای حالت می باشد، خروجی پیش بینی شده $\hat{y}(t+j)$ در تابع هزینه مورد استفاده قرار نمی گیرد. در این روش قانون کنترل از روش های معروف حل مسائل کنترل بهینه خطی بدست می آید. در این حالت یک قانون کنترل به صورت فیدبک حالت وبا حل معادله ریکاتی بدست می آید.

مطابق با پارامترهای طراحی انتخاب شده برای تابع هزینه J و روشهای مینیمم سازی، الگوریتم های کنترل پیش بین اندکی تفاوت دارند، اما همگی دارای ساختاری مشابه شکل (۲) می باشند.



شکل (۲) ساختار حلقه بسته کنترل پیش بین

سیگنال های فرمان آینده $y_r(t+1), y_r(t+2), \dots, y_r(t+N)$ در هر لحظه از زمان t برای ساختن سیگنال ورودی کنترل در تمام الگوریتم های کنترل پیش بین باستثناء روش EHAC می بایست، مشخص باشند و در حالت EHAC فقط $y_r(t+N)$ ، به دلیل این که بر روی خطای خروجی $(y(t+1) - y_r(t+1))$ برای $0 \leq j \leq N-1$ وزنی وجود ندارد، مورد استفاده قرار می گیرد.

بلوک G_1 همانند یک پیش فیلتر بر روی سیگنال مرجع $y_r(t+j)$ عمل می کند و باعث بهبود پاسخ گذرا می شود. برای تمام الگوریتم های کنترل پیش بین بر مبنای مدل ورودی/خروجی باستثناء EHAC، پیش بین گر موجود در شکل (۲) می بایست بردار خروجی پیش بینی شده $y_p(t+1), y_p(t+2), \dots, y_p(t+N)$ را تولید کند در حالی

که در EHAC، فقط مقدار $y_p(t+N)$ مورد نیاز است. در RHTC پیش بین گر به فرم شکل (۲) ارائه نمی شود زیرا قانون کنترل در این حالت به فرم فیدبک حالت می باشد و چنانچه حالات به طور مستقیم در دسترس نباشند، از یک مشاهده گر حالت به جای پیش بین گر استفاده می شود.

برای همه کنترل های پیش بین بر مبنای مدل ورودی / خروجی بلوک G_1 برابر بلوک G_2 و بلوک G_3 برابر واحد می باشد. این نوع ساختار توانایی دنبال کردن فرمان و حذف اغتشاش را به طور همزمان دارا نمی باشد. این حقیقت با توجه به این که کنترل های پیش بین عملکرد بهتری برای دنبال کردن فرمان نسبت به حذف اغتشاش بار از خود نشان می دهند، مطابقت دارد. [۱۰] و این تاحدی به خاطر این است که به منظور بدست آوردن ساده تر قانون کنترل در طراحی پیش بین گر از مدلهای ساده برای مدلسازی نویز و اغتشاش استفاده می شود، و در صورتی که از مدلهای دقیق تر نویز و اغتشاش در طراحی پیش بین گر استفاده شود، پاسخ به اغتشاشات بار بهبود خواهد یافت. همانطور که در [۲۰] بیان شده، یکی از دلایل اصلی موفقیت کنترل های پیش بین در صنعت توانایی این روش ها در کنترل قیود و محدودیتها می باشد. گزارشات متعددی درباره موفقیت این روش ها در کنترل قیود پروسه های مختلف در [۹،۱۷] آورده شده است.

۶- نتایج شبیه سازی

در این قسمت با ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی در محیط MATLAB نشان داده می شود که چگونه یک کنترل پیش بین مدل می تواند یک فرآیند که دارای مرتبه، زمان مرده و پارامترهای متغیر با زمان می باشد، را کنترل کند و عملکرد مطلوب تری در مقایسه با یک تنظیم کننده کلاسیک PID از خود نشان دهد.

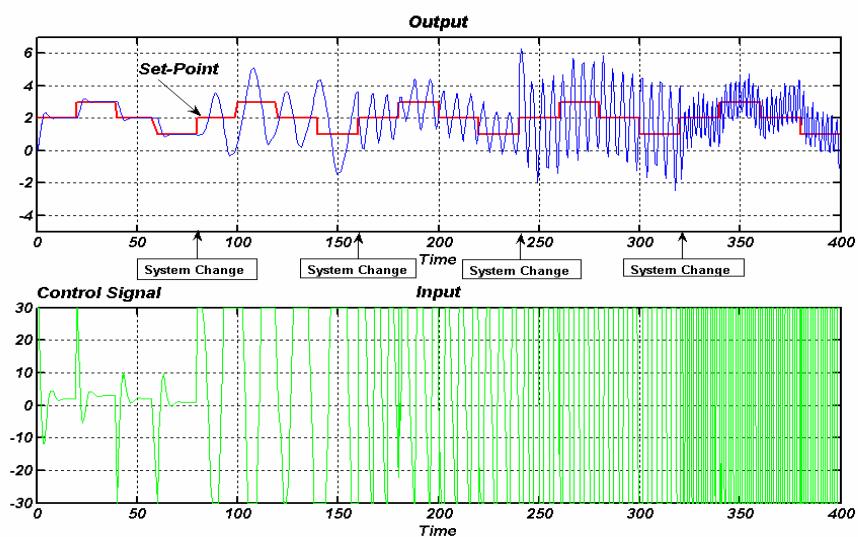
هر شبیه سازی متشکل از مراحل زیر است:

- زمان کل شبیه سازی ۴۰۰ نمونه زمانی (زمان نمونه برداری برابر یک ثانیه می باشد).
- یک دنباله از تغییرات نقطه تنظیم با سه سطح متفاوت (۱،۲،۳) در هر ۲۰ نمونه زمانی.
- بعد از هر ۸۰ نمونه زمانی مدل زمان پیوسته فرآیند مطابق جدول (۲) تغییر می کند.

با وجود این که میزان تغییرات دینامیک فرآیند خیلی زیاد می باشد و حتی تصور این که یک فرآیند واقعی به این میزان تغییرات داشته باشد، مشکل است، اما برای نشان دادن مقاومت نسبی کنترل های پیش بین، این شبیه سازی انجام شده است.

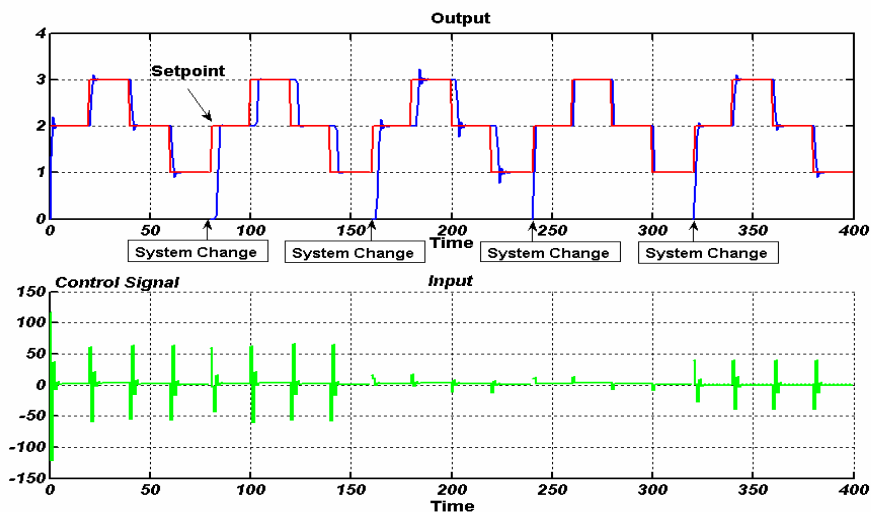
جدول (۲) توابع تبدیل مدل های شبیه سازی شده

Number	Samples	Model
۱	۱-۷۹	$\frac{1}{1+10s+40s^2}$
۲	۸۰-۱۵۹	$\frac{e^{-2.7s}}{1+10s+40s^2}$
۳	۱۶۰-۲۳۹	$\frac{e^{-2.7s}}{1+10s}$
۴	۲۴۰-۳۱۹	$\frac{1}{1+10s}$
۵	۳۲۰-۴۰۰	$\frac{1}{10s(1+2.5s)}$



شکل (۳) پاسخ سیستم نمونه به کنترل کننده PID

شکل (۳) رفتار یک کنترلر PID ثابت را که جهت عملکرد مطلوب فرآیند ابتدایی انتخاب شده است، نشان می دهد. کنترلر طراحی شده به فرم $\frac{25s^2 + 10s + 1}{s}$ می باشد و برای مدل اولیه پاسخ سیستم حلقه بسته، مطلوب می باشد، در حالی که برای سایر مدلها پاسخ سیستم نوسانی می شود.



شکل (۴) پاسخ سیستم نمونه به کنترل کننده پیش بین

مقادیر پیش فرض جهت طراحی کنترل کننده پیش بین عبارتند از: $N_1 = 1, N_2 = 10, N_U = 3$ ، همچنان که مشاهده می شود، در مقایسه با کنترل کننده PID، رفتار کنترل کننده پیش بین به مراتب بهتر و مقاوم تر می باشد. نکته مهم تر این که، مشکلات ناپایداری سیستم حلقه بسته با وجود تغییر دینامیک سیستم در این روش وجود ندارد.

نتیجه گیری

الگوریتم های کنترل پیش بین را می توان به عنوان یک الگوریتم همه منظوره جهت کنترل و پایدار سازی فرآیند های فیزیکی مطرح کرد. زیرا در ارتباط با کنترل فرآیند های خطی ، برای آن که روشی همه منظوره به حساب آید باید بتوان با موفقیت به فرآیندهای زیرقابل اعمال باشد .

۲- فرآیند های حلقه باز ناپایدار

۱- فرآیند های غیر مینیم فاز

۴- فرآیند های با مرتبه نامعین

۳- فرآیند های با تأخیر زمانی متغیر و یا نامعین

کنترل پیش بین تعمیم یافته GPC تمام خواص مطلوب فوق را در قالب یک الگوریتم واحد دارد در حالی که سایر روشها برخی از خواص فوق را دارا می باشند. در این مقاله بررسی اصول طراحی در کنترل های پیش بین و ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم نمونه با استفاده از روش GPC و مقایسه عملکرد آن با کنترل کننده کلاسیک PID مورد بحث قرار گرفته است .

مراجع

- [۱] James B. Rawlings, " Tutorial Overview of Model Predictive Control", IEEE Control System Magazine, pp. ۳۸-۵۲, June ۲۰۰۰.
- [۲] Morari, M. and J.H. Lee "Model Predictive Control: Past, Present and Future," Comp. Chem. Engng., ۲۳, ۶۶۷-۶۸۴ (۱۹۹۹).
- [۳] R. Rouhani and R.K. Mehra, and J.G. Reid, "Model Algorithm Control :Basic Theoretical Properties", Automatica, Vol. ۱۸, no ۴, pp. ۴۰۱-۴۱۴, ۱۹۸۲.
- [۴] R.K. Mehra and R. Rouhani "Theoretical Considerations on Model Algorithmic Control for Nonminimum Phase System ", Proc. JACC, FA ۸=B, ۱۹۸۰.
- [۵] J.G. Reid, D.E. Chaffin and J.T. Silverthorn, "Output Predictive Algorithmic Control :Precision Tracking with Application to Terrain Following ", J. Guidance and Control, Vol. ۴, no ۵, ۱۹۹۹.
- [۶] C.R. Cutler and B.L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control –A Computer Control Algorithm ", Proc. JACC San Francisco, ۱۹۸۰.
- [۷] C.R. Cutler and B.L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control of Imbalanced Systems", ISA Trans. Vol. ۲۱, no ۱, ۱۹۸۲.
- [۸] P.R. Maurach, D.A. Mellichamp, and D.E. Seborg, "Predictive Controller Design for SISO Systems" Proc. ACC, FP ۴, pp. ۱۵۴۶-۱۵۵۲, ۱۹۸۵.
- [۹] A.M. Morshedi, C.R. Cutler, and T.A. Skrovanek, "Optimal Solution of Dynamic Matrix Control with Linear Programming Techniques (LDMC)", Proc. ACC, WA ۸, pp. ۱۹۵-۲۰۸, ۱۹۸۵.
- [۱۰] Pu Yuan and D.E. Seborg, "Predictive Control Using an Observer for Load Estimation ", Proc. ACC, TA ۱, pp. ۶۶۵-۶۷۵, ۱۹۸۶.
- [۱۱] P.R. Maurath, D.E. Seborg, and D.A. Mellichamp, "Predictive Controller Design by Principal Components Analysis ", Proc. ACC, TP ۷, pp. ۱۰۵۹-۱۰۶۵, ۱۹۸۵.
- [۱۲] B.E. Ydstie, "Extended Horizon Adaptive Control", Proc. IFAC World Congress, Budapest, Hungary, ۱۹۸۴.
- [۱۳] B.E. Ydstie, L.S. Kershenbaum, and R.W.H. Sargent, "Theory and Application of and Extended Horizon Self Tuning Controller ", AIChE J. Vol. ۳۱, no ۱۱, pp. ۱۷۷۱-۱۷۸۰, ۱۹۸۵.
- [۱۴] C. Mohtadi and D.W. Clarke, "Generalized Predictive Control, LQ, or Pole-Placement : A Unified Approach ", Proc. ۲۵th Conf. on Decision and Control, FA-۴, pp. ۱۵۳۶-۱۵۴۱, Dec. ۱۹۸۶.
- [۱۵] D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.S. Tuffs, "Generalized Predictive Control –Part ۱. Basic Algorithm ", Automatica, Vol. ۲۳, no ۴, pp. ۱۳۷-۱۴۸, ۱۹۸۷.
- [۱۶] D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.S. Tuffs, "Generalized Predictive Control –Part ۲, Extensions and Interpretations ", Automatica, Vol. ۲۳, no ۲, pp. ۱۴۹-۱۶۰, ۱۹۸۷.
- [۱۷] J.M. Dion, L. Dugard, and N.M. Tri, "Multivariable Adaptive Control with Input –Output Constraints " Proc. CDC, TP ۱, pp. ۱۲۳۳-۱۲۳۸, ۱۹۸۷.
- [۱۸] W.H. Kwon and D.G. Byun, "Receding Horizon Tracking Control as a Predictive Control and Its Stability Results", in Intr. J. Control.
- [۱۹] R.M.C. De Keyser and A.V. Cauwenberghe, "Toward Robust Adaptive Control with Extended Predictive Control ", Proc. CDC, FA ۴, pp. ۱۵۴۸-۱۵۴۹, Dec. ۱۹۸۶.
- [۲۰] A.R.V. Cauwenberghe and R.M.C. De Keyser. "Self Adaptive Long Range Predictive Control ", Proc. ACC, TP ۱۰, pp. ۱۱۵۵-۱۱۶۰, ۱۹۸۵.