

راه حلی برای کنترل PID :

آموزشی بر کنترل پیش بینانه فانکشنال

چکیده

PFC (کنترل پیش‌بین فانکشنال^۱) می‌تواند به عنوان یک پلی بین PI(D) و MPC مختلط باشد. کنترل PI(D) می‌تواند مسائلی را به همراه داشته باشد که زمان مرده و قیدها را نیز مورد بررسی قرار دهد. PFC این موارد را اداره کرده و اغلب نسبت به استفاده از یک پیش‌بینی‌کننده اسمیت^۲ بهتر است. PFC یک MPC ساده قابلیت اطمینان تحقق است که بدین نحو از پیش‌بینی و پیش‌نمایشی از متغیرهای کلیدی را مورد استفاده قرار می‌دهد. PFC می‌تواند بوسیله قطعه کد برنامه ساده بکار گرفته شود و از اینرو هزینه‌های لایسنس ارزانی دارد. این آموزش، ایده اولیه PFC و همچنین الگوریتم‌هایی را برای مراحل و فرآیندهای نوعی معرفی می‌نماید. شبیه‌سازی‌ها، تأثیرگذاری نیز مزایای فراوان آن نسبت به پیش‌بینی‌کننده‌های PI(D) و اسمیت را روشن می‌سازد.

1. مقدمه

کنترل PI(D) (تناسبی-انتگرالی-مشتقی^۳) در صنعت به خوبی شناخته شده است، چنانکه اغلب کنترل‌کننده‌ها از این نوع هستند. از طرف دیگر، پارامترهای PID برای سریعترین فرو نشست نامتناوب نمی‌توانند به آسانی تنظیم گردند و استفاده آن توسط زمان‌های مرده محدود می‌گردد. یک توسعه‌ای برای فرآیندهای زمان مرده،

¹ Predictive Function Control

² Smith

³ Proportional-Integral-Derivative

استقرار یک پیش‌بینی‌کننده اسمیت در کنار آن می‌باشد. با این وجود، این مکانیزم نسبت به تغییرات پارامتر حساس است.

ریچالت^۱ [1] PFC (کنترل پیش‌بینانه فانکشنال) را به عنوان یک راه چاره‌ای برای PID جهت فرآیندهایی با زمان مرده معرفی نمود و قادر بود که بر پردازشگرهای در دسترس در سال 1960 بکار گرفته شود! این متغیر تنظیم شونده به صورت دستی (MV^2) به صورت مجموع توابع پایه‌ای وزن‌دار تعریف می‌گردد و با مینیمم‌سازی یک مجموعی از عبارات درجه دوم خطاهای کنترلی در آینده اصطلاحاً نقاط انطباق گفته می‌شود، محاسبه می‌گردد. به جای وزن‌دهی به نمو‌های کنترلی، اختلاف بین یک مسیر مرجع و سیگنال کنترل شده به طور نمایی وزن‌دهی می‌شود. اگر سیگنال مرجع و اختلال تنها به صورت مرحله‌ای تغییر کنند، در آن هنگام تنها یک تابع بنیادین و یک نقطه انطباقی مورد نیاز هستند و MV از طریق یک معادله جبری محاسبه می‌گردد.

مزیت PFC در مقابل کنترل $PI(D)$ ، توانایی نهفته آن است که جهت کنترل فرآیندهای زمان مرده و نیز جهت محدودسازی هم‌سیگنال دستکاری شده و هم کنترل شده می‌باشد. به علاوه، پارامترهای تنظیمی معانی فیزیکی دارند که این امر در عمل به معرفی این الگوریتم کمک می‌کند. یکی از پارامترها نیز میزان قدرت را تنظیم می‌کند.

برای کارخانه‌های بزرگ، همچون پالایشگاه‌ها، فرآیند صنعتی از MPC^3 (کنترل پیش‌بینانه مبتنی بر مدل) استفاده می‌کند که آن هم از یک بهینه‌سازی عددی پیچیده از توالی متغیر حقیقی و آینده که به صورت دستی تنظیم شده است و با احتساب قیود و محدودیت‌های مختلف، استفاده می‌نماید. ضعف اصلی MPC این است که الگوریتمی که قیود را در نظر می‌گیرد، آنقدر پیچیده است که بکارگیری آن به دانش تخصصی نیاز داشته و برنامه‌های تجاری نیز بایستی با پرداخت هزینه بالای لایسنس مطابق با آن، نصب گردند.

از آنجاییکه این عمل تنها جهت بهبود رفتار کنترل‌کننده‌های پایه‌ای و سطح پایین است، PFC در نسخه ساده شده آن به علت سادگی هم در محاسبات و هم در تنظیم و همچنین بکارگیری آسان آن و قابلیت مدیریت محدودیت‌ها و

¹ Richalet

² Manipulating Variable

³ Model Predictive Control

قیود، انتخاب مناسبی است. البته که الگوریتم PFC معرفی شده نمی تواند جایگزین یک MPC چند متغیره، نیرومند، پایدار و مقید شود. هر دو الگوریتم زمینه های کاربردی متفاوت خودشان را دارا هستند.

همانطور که PFC از یک الگوریتم آسان استفاده می نماید، هر مهندس می تواند کد برنامه را نوشته و در نتیجه لایسنسی که باید پرداخت گردد، وجود ندارد. به دلیل همه این مزایای PFC، اساساً به عنوان یک کنترلی که به آسانی تنظیم شده و همچنین برای فرآیندهای غیر خطی و زمان مرده که نسبت به PI(D) کنترل کننده ای نیرومندتر می باشد، در این فرآیند صنعتی به طور بسیار رایجی بکار رفته است. کاربردهای PFC در اغلب کشورهای مختلف و با انواعی از فرآیندهای بسیار متفاوت ارائه و نشان داده می شوند. PFC در چندین مدرسه فنی تدریس شده است و در شکل های مختلفی برای سناریوهای مختلفی بکار گرفته می شود.

2. ایده بنیادین PFC

این ایده بنیادین در نخست برای یک فرآیند $^{1}SISO$ (تک ورودی - تک خروجی) مرتبه اول بدون زمان مرده و در هنگامیکه یک تغییر پلکانی از نقطه تنظیم بایستی دنبال گردد، نشان داده می شود. قاعده PFC این است که متغیر کنترل شده y با یک تغییر (یا مینیمم تعدادی از تغییرات) در MV (اینجا با u بر آن دلالت می شود) به مسیر مرجع در نقطه (یا نقاط) هدف دست می یابد. این تغییر مطلوب در متغیر کنترل شده y در هنگام گستره پیش بینی n_p (از زمان واقعی k) از تغییر مطلوب مسیر مرجع و نیز تغییر پیش بینی شده خروجی y_m یک مدل، محاسبه می گردد. این MV می تواند از تغییر مسیر مرجع و تغییر پیش بینی شده Δy از طریق خروجی مدل و در خلال گستره پیش بینی، به آسانی محاسبه گردد، شکل 1 را ببینید. این تغییرات مطلوب در متغیر کنترل شده y در هنگام n_p گام پیش بینی، با فرض اینکه y با مسیر مرجع در نقطه هدف (n_p گام به سوی جلو) تطبیق دارد، می تواند مورد تعریف واقع شوند.

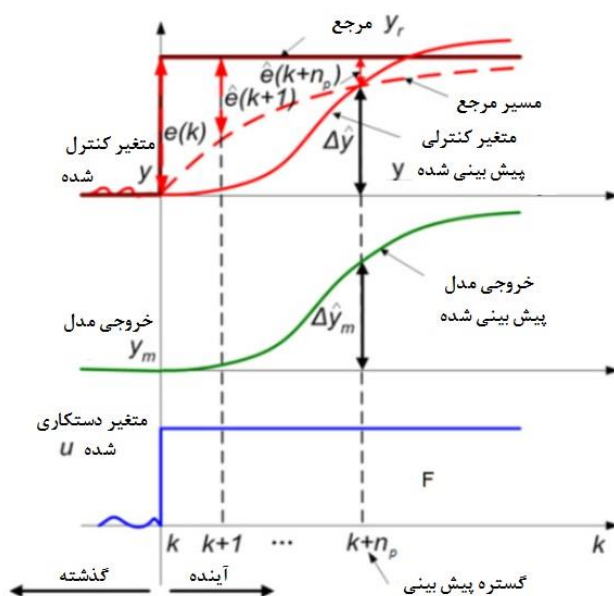
$$\hat{y}(k+n_p | k) - y(k) = e(k) - \hat{e}(k+n_p | k) \quad (1)$$

¹ Single-Input, Single-Output

که در آن $e(k) = y_r - y(k)$ و y_r به عنوان سیگنال مرجع ثابت در نظر گرفته می شود.

این مسیر مرجع برای سادگی به صورت یک تابع نمایی انتخاب می شود. از اینرو خطای ردیابی (مسیر طی شده) به طور یکنواخت کاهش می یابد:

$$\hat{e}(k+1|k) = \lambda_r e(k), \dots, \hat{e}(k+n_p|k) = \lambda_r^{n_p} e(k) \quad (2)$$



شکل 1: قاعده PFC

که در آن $\lambda_r = \exp(-3\Delta t / T_c)$ نرخ کاهش خطای مسیر است. این مسیر برای سیستم کنترل حلقه بسته، اگر $\lambda_r = \exp(-3\Delta t / T_c)$ ، مرجع به زمان نشست مطلوب $t_{95\%} = T_c$ مرتبط می گردد، که در آن Δt زمان نمونه برداری است. از (1) و (2)، تغییر مطلوب در y به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\Delta \hat{y}(k+n_p|k) = (1 - \lambda_r^{n_p}) e(k) = (1 - \lambda_r^{n_p}) [y_r - y(k)] \quad (3)$$

که بایستی برابر با تغییر در خروجی مدل باشد.

$$\Delta \hat{y}_m(k+n_p|k) = \hat{y}_m(k+n_p|k) - y_m(k) \quad (4)$$

توجه 1: با یک تغییر پلکانی در سیگنال مرجع (یا اختلال)، یک MV ثابت می تواند برای آن فرض گردد. با نوع دیگری از سیگنال مرجع (یعنی مجموع توابع چندجمله ای) این MV شامل توابع مشابه اصطلاحاً پایه ای می باشد؛

نام PFC از این بیان بر می خیزد. در این مورد یک تابع هزینه (درجه دوم) بایستی مینیمم شود که شامل جمع مربعات خطاهای کنترلی پیش بینی شده در نقاط متفاوت اصطلاحاً نقاط انطباقی می باشد [2].

3. الگوریتم PFC برای فرآیندهای SISO

A. فرآیند مرتبه اول بدون زمان مرده

معادله تفاضلی از یک مدل مرتبه اول عبارتست از

$$y_m(k) = -a_m y_m(k-1) + K_m(1+a_m)u(k-1) \quad (5)$$

که در آن y_m خروجی مدل می باشد، u ورودی مدل، a_m پارامتر مدل زمان گسسته بوده و K_m بهره استاتیک مدل می باشد. با فرض آنکه سیگنال ورودی واقعی u در طول مدت گستره پیش بینی ثابت نگه داشته می شود، با این وجود، خروجی پیش بینی شده مدل پس از n_p گام عبارتست از :

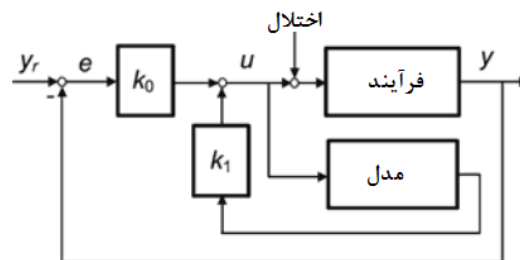
$$y_m(k+n_p | k) = (-a_m)^{n_p} y_m(k) + K_m[1 - (-a_m)^{n_p}]u(k) \quad (6)$$

تضمین برابری بین تغییر پیش بینی شده از مسیر مرجع در (3) و تغییر پیش بینی شده y_m در (4) در متغیر تنظیم شونده به صورت دستی (یا قانون کنترل) نتیجه می دهد :

$$u(k) = k_0[y_r - y(k)] + k_1 y_m(k) \quad (7a)$$

$$k_0 = \frac{1 - \lambda_q^{n_p}}{K_m[1 - (-a_m)^{n_p}]}, \quad k_1 = \frac{1}{K_m} \quad (7b)$$

شکل 2 طرح کنترلی را نشان می دهد.



شکل 2 : طرح PFC از فرآیند مرتبه اول بدون زمان مرده.

B. فرآیند مرتبه اول با زمان مرده

در مورد زمان مرده d_m ، $y(k)$ بایستی با $\hat{y}(k+d_m|k)$ در معادله (7a) جایگزین گردد. اختلاف بین خروجی فرآیند کنونی و تأخیر یافته توسط اختلاف بین مقادیر خروجی مدل کنونی و مقادیری که پیش تر تأخیر یافته اند تقریب زده می شود.

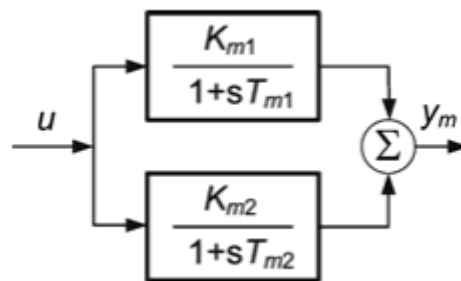
$$\hat{y}(k+d_m|k) - y(k) \approx y_m(k) - y_m(k-d_m) \quad (8)$$

این تقریب به رابطه زیر منجر می شود

$$\hat{y}(k+d_m|k) = y(k) + [y_m(k) - y_m(k-d_m)] \quad (9)$$

B. فرآیند نامتناوب مرتبه دوم

یک فرآیند نامتناوب مرتبه دوم مرتبه دوم می تواند توسط یک اتصال موازی از دو فرآیند مرتبه اول با ثابت های زمانی متفاوت توصیف گردد، همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3: اتصال موازی دو مدل مرتبه اول

معادله تفاضلی 1 امین زیر مدل عبارتست از:

$$y_{m,i}(k) = -a_{m,i}y_{m,i}(k-1) + K_{m,i}(1+a_{m,i})u(k-1) \quad (10)$$

بهره های این زیر مدل می توانند توسط تجزیه به کسرهای جزئی محاسبه گردند:

$$\frac{K_m}{(1+sT_{m1})(1+sT_{m2})} = \frac{K_{m1}}{(1+sT_{m1})} + \frac{K_{m2}}{(1+sT_{m2})} \quad (11)$$

اگر این فرآیند چندین قطب مختلف داشته باشد، لیکن قطب‌های بسیار مشابه استفاده می‌گردند). با جایگزاری پیش‌بینی‌هایی از (10) در (7a)، قانون کنترل PFC به صورت زیر می‌شود :

$$u(k) = k_0[y_r - y(k)] + k_1 y_{m1}(k) + k_2 y_{m2}(k) \quad (12)$$

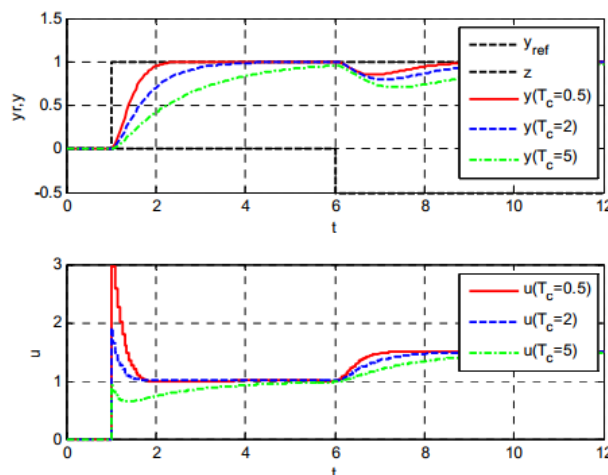
$$k_0 = \frac{1 - \lambda^{n_p}}{K_{m1}[1 - (-a_{m1})^{n_p}] + K_{m2}[1 - (-a_{m2})^{n_p}]},$$

$$k_1 = \frac{1 - (-a_{m1})^{n_p}}{K_{m1}[1 - (-a_{m1})^{n_p}] + K_{m2}[1 - (-a_{m2})^{n_p}]}, \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{1 - (-a_{m2})^{n_p}}{K_{m1}[1 - (-a_{m1})^{n_p}] + K_{m2}[1 - (-a_{m2})^{n_p}]}$$

شکل 4 کنترل یک فرآیند مرتبه دوم با پارامترهای فرآیند/مدل $T_{m1} = 1/3s$ ، $T_{m2} = 2/3s$ ، بدون زمان مرده، $\Delta t = 0.05s, n_p = 10$ و با زمان‌های نشست مطلوب متفاوت را نشان می‌دهد. روشن است که این کنترل نامتناوب است، کنترل سریعتر در MV اولیه بزرگ نتیجه می‌دهد و همانطور که انتظار می‌رود، زمان نشست پارامتر کنترل کننده T_c را تقریب می‌زند.

توجه 2: در مورد یک فرآیند با میرایی پایین تابع تبدیل می‌تواند همانند فرآیندهای نامتناوب در یک روش مشابهی تجزیه گردد، اما ثابت‌های زمانی و بهره‌های این زیر مدل، جفت‌های مزدوج مختلف هستند. می‌تواند نشان داد که الگوریتم کنترل (13) هنوز معتبر است و برخی از پارامترها مختلف هستند. (البته حقیقی است).



شکل 4 : PFC از یک فرآیند نامتناوب مرتبه دوم

C. فرآیندهای مرتبه بالاتر از جمله زمان مرده

کارخانه‌های شیمیایی، گرمایی، تهویه و مطلوب‌سازی هوا اغلب توسط یک فرآیند نامتناوب از مرتبه بالاتر توصیف می‌گردند. تکنیک یکسانی همانند با فرآیندهای مرتبه دوم می‌تواند به کار برده شود [3]. همچنین زمان مرده همانند (9) می‌تواند در نظر گرفته شود.

4. تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده

مسیر متغیر کنترل شده به موارد زیر بستگی دارد :

- n_p : گستره پیش بینی
- λ_r : نرخ کاهش خطاهای کنترلی پی در پی

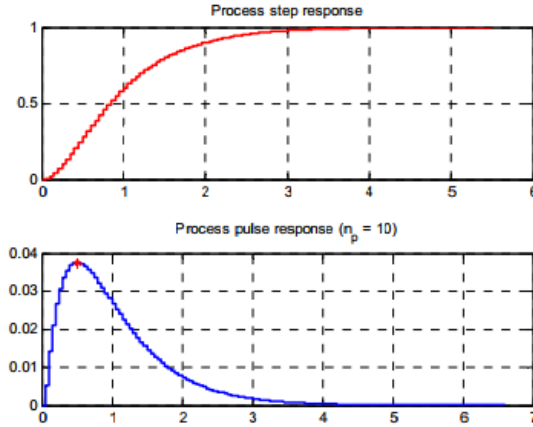
ریچالت [2] انتخاب گستره (افق) پیش بینی را بدین صورت پیشنهاد می‌کند :

برای فرآیندهای مرتبه اول $n_p = 1$

نقطه گسسته زمان نقطه خمیدگی پاسخ پله برای فرآیندهای نامتناوب از مرتبه بالاتر

شکل 5 انتخاب $n_p = 10$ گام، از پاسخ های پله و ضربه فرآیند مرتبه دوم شبیه سازی شده را نشان می‌دهد (نقطه خمیدگی در $10\Delta t = 0.05s = 0.5s$).

توجه 3 : این پیشنهاد مربوط به تنظیم پارامتر برای فرآیندهای مرتبه اول و همچنین فرآیندهای نامتناوب به خوبی کار می‌کند، لیکن در هنگامیکه برای برخی از فرآیندها بکار می‌رود، از قبیل همراه با شرایط میرایی ضعیف، می‌تواند سبب فراجش‌های بزرگ یا حتی ناپایداری گردد. در [4] چندین مثال از این مسئله نشان داده می‌شوند. خوشبختانه بسیاری از فرآیندهای صنعتی همانند گرم کردن و خنک سازی و غیره، نامتناوب هستند.

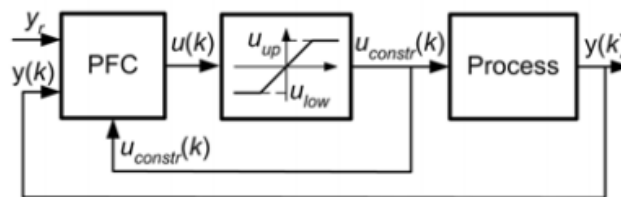


شکل 5 : انتخاب طول پیش بینی برای فرآیند مرتبه دوم

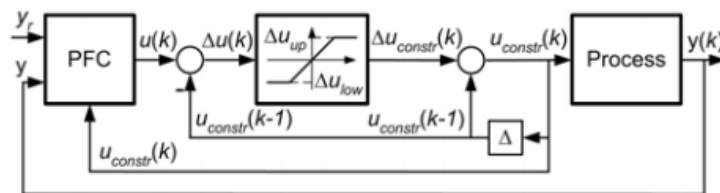
5. مدیریت قیود

A. قیود و محدودیت هایی بر متغیرهای تنظیم شده به صورت دستی

هم MV و هم رشد آن می توانند به آسانی محدود گردند. مهم است که مدل فرآیند توسط MV محدود شده تغذیه گردد. این نوع از محدودسازی MV نسبت به تکنیک عدم پایان دهی با کنترل PI ، بسیار آسانتر می باشد. شکل 6 محدودکننده سطح و سرعت را نشان می دهد [5].



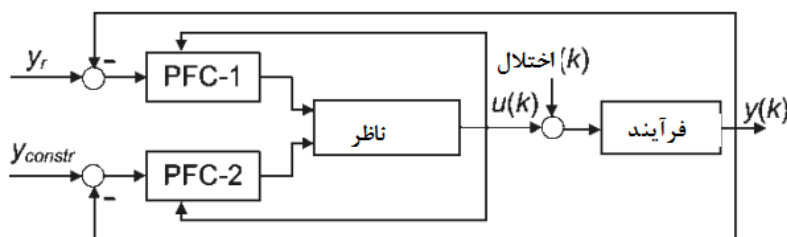
شکل 6a : محدودکننده سطح متغیر تنظیم شده به صورت دستی.



شکل 6b : محدودکننده سرعت متغیر تنظیم شده به صورت دستی.

B. قیودی بر متغیر کنترل شده

قیودی بر CV^1 (متغیر کنترلی یا کنترل شده) می تواند با استفاده از دو کنترل کننده PFC که به صورت موازی عمل نموده و همچنین از یک ناظر منطقی که جهت انتخاب کنترل کننده فعال استفاده می کند، اجرا گردد [2]، شکل 7 را ببینید. نخستین کنترل کننده PFC-1، MV آتی را جهت ارضای سیگنال مرجع محاسبه می کند و این در حالی است که در مورد همه قیود اعمال شده بر متغیر تنظیم شده به صورت دستی در این حلقه وجود دارد. مورد دوم، کنترل کننده سریع (بالقوه) PFC-2 سیگنال خروجی فرآیند پیش بینی شده مقیدی را به عنوان سیگنال مرجع داراست. ناظر منطقی² سیگنال کنترلی کنترل کننده نخست را انتخاب می کند و این در صورتی است که اگر سیگنال خروجی پیش بینی شده از فرآیند قیود خود را رعایت نماید، مگر آنکه، سیگنال کنترلی کنترل کننده دوم توسط ناظر انتخاب گردد. متغیر انتخابی که به صورت دستی تنظیم شده است جهت فرآیند و مدل های درونی کنترل کننده بکار برده می شود. این وظیفه ناظر منطقی، به پیش بینی سیگنالهایی نیاز دارد که نمی توانند در مورد کنترل کننده های PI(D) بکار روند.



شکل 7: قیود بکار رفته بر سیگنال کنترلی.

6. کد برنامه الگوریتم PFC

این لیست نمونه هایی از کد Matlab محاسباتی بلادرنگ را بر اساس یک فرآیند مرتبه دوم با زمان مرده و با اتخاذ قیود MV ارزانی می دارد.

¹ Controlled Variable

² logical supervisor

```

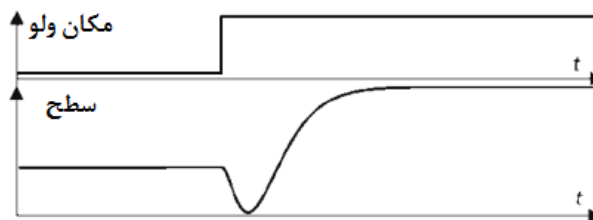
ym1(k)=-am1*ym1(k-1)+Km1*bm1*u(k-1);
%PT1 sub-model-1 output; bm1=1+am1
ym2(k)=-am2*ym2(k-1)+Km2*bm2*u(k-1);
%PT1 sub-model-2 output; bm2=1+am2
ym(k)=ym1(k)+ym2(k); % PT2 model output
u(k)=(yref(k)-(y(k)+(ym(k)-ym(k-dm))))
*k0+ym1(k)*k1+ym2(k)*k2; % MV
if u(k)> umax, u(k)=umax; end; %MV-max
if u(k)< umin, u(k)=umin; end; %MV-min
if u(k)>u(k-1)+ dumax,
    u(k)=u(k-1)+ dumax; %MV-incr-max
else if u(k)<u(k-1)+ dumin,
    u(k)=u(k-1)+ dumin; %MV-incr-min
end; end;

```

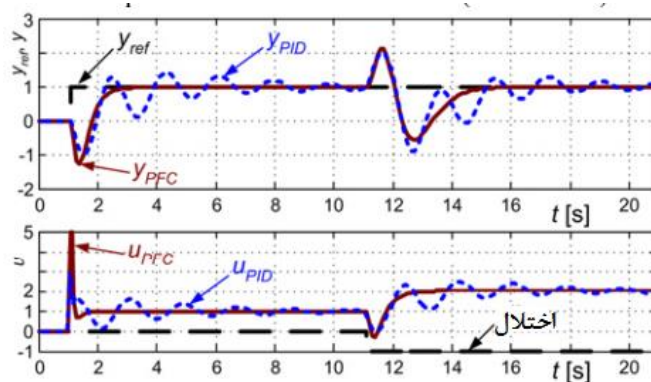
مشاهده می گردد که این کد جهت بکارگیری یک قانون کنترل PFC ساده است و محاسبات بی پایان نیاز نیست.

7. مقایسه با کنترل PI(D)

در یک بویلر افزایش آب سرد به طور موقت منجر به یک کاهش در سطح آن می گردد و این چنانست که حبابها در آب جوشان ترکیده می شوند. اگر آب تغذیه گرم تر شود، این سطح افزایش می یابد و به مقدار حالت ماندگار جدید و بالاتر خود دست می یابد. این قبیل فرآیند، تکرار معکوس یا غیر مینیمم فاز نامیده می شود، شکل 8 را ببینید. شکل 9 به ترتیب کنترل PID و PFC را نشان می دهد. در هر دو مورد قوانین میزان سازی استاندارد استفاده گردیده اند. روشن است که PFC بهتر عمل می کند. جدول 1 PFC را با PI(D) مقایسه می کند.



شکل 8: پاسخ پله سطح یک بویلر



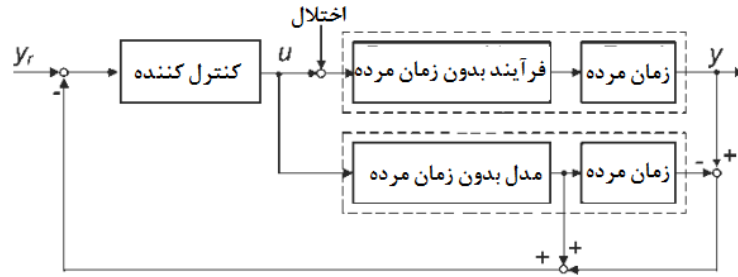
شکل 9: کنترل سطح PFC در مقابل PID از یک بویلر

8. مقایسه با پیش‌بینی کننده اسمیت

فرآیندهایی با زمان مرده می‌توانند با استفاده از پیش‌بینی کننده اسمیت کنترل گردند، شکل 10 را ببینید. اگر مدل فرآیند، معادل با فرآیند باشد و اختلالی هم وجود نداشته باشد، سپس کنترل کننده مدل را تنها بدون زمان مرده می‌بیند. این کنترل کننده می‌تواند برای فرآیندهای عاری از زمان مرده طراحی گردد و خروجی کنترل شده توسط زمان مرده تأخیر می‌یابد. مشکل یک پیش‌بینی کننده اسمیت آنست که، نسبت به فرآیند و عدم تطابق مدل بسیار حساس می‌باشد. (جدول 2 را ببینید)

جدول 1: PFC در مقابل PI(D)

ویژگی	PI(D)	PFC
زمان مرده	نمی‌تواند به کار ببرد	می‌تواند به کار ببرد
محدودیت MV	الگوریتم ضد پایان دهی	برش ساده
تنظیم کنترل کننده	قواعد تنظیم کننده رایج مناسب نیستند	زمان نشست مطلوب پارامتر کنترلی می‌باشد.
محدودیت CV	ممکن نیست	استفاده از پیش‌بینی کننده CV
نیرومندی	الگوریتم پایه ای جواب نمی‌دهد	بله، از طریق زمان نشست
پیش‌بینی نقطه تنظیم	خیر	ممکن است



شکل 10 : پیش بینی کننده اسمیت

با یک تغییر پلکانی سیگنال مرجع، می توان نشان داده که PFC برای فرآیندهایی با زمان مرده، فرمی از یک پیش‌بینی‌کننده اسمیت را داراست. این موضوع در اینجا برای یک سیستم مرتبه اول نشان داده می شود، (7) و (9) را ببینید :

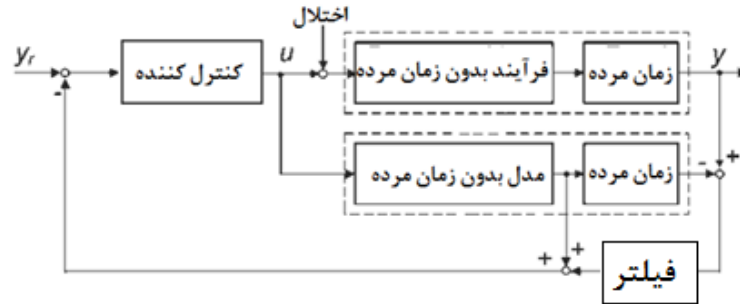
$$u(k) = k_0[y_r - \hat{y}(k + d_m | k)] + k_1 y_m(k) \quad (14)$$

9 PFC نیرومند

پیش بینی کننده اسمیت در [6] جهت برای فراهم آوردن نیرومندی در جهت خطاهای زمان مرده، با یک فیلتر پایین گذر گسترش یافته است (شکل 11). به طور مشابه PFC می تواند با بکارگیری یک فیلتر اضافی جهت فیلتر نمودن مسیر مرجع به طور نیرومندتری ساخته شود. بنابراین، البته PI(D) پیش بینی کننده اسمیت با PFC جایگزین می گردد.

جدول 2 : PFC در مقابل پیش بینی کننده اسمیت با PI(D)

ویژگی	پیش‌بینیکننده اسمیت با PI(D)	PFC
زمان مرده	می تواند به کار ببرد	می تواند به کار ببرد
محدودیت MV	الگوریتم ضد پایان دهی	برش ساده
تنظیم کنترل کننده	بدون معنی فیزیکی	شامل زمان نشست مطلوب
محدودیت CV	ممکن نیست	استفاده از پیش بینی کننده CV
نیرومندی	مستقیماً شامل نمی شود	از طریق فیلتر مسیر مرجع
پیش بینی نقطه تنظیم	ممکن نیست	ممکن است



شکل 11 : PFC با یک پیش بینی کننده اسمیت فیلتر شده

10. کنترل فید فوروارد اختلال

A. کنترل فید فوروارد اختلال اندازه گیری شده

یک اختلال خروجی اضافی فرض نمایید. جبران سازی آن ممکن است اگر زمان مرده فرآیند اختلال بزرگتر (یا مساوی) با زمان مرده فرآیند باشد. برای سادگی حالتی با مدل مرتبه اول (1) را با زمان مرده d و مدل اختلال با زمان مرده $d_v \geq d$ در نظر بگیرید.

$$y_{vm}(k) = -a_{vm}y_{vm}(k-1) + K_{vm}(1+a_{vm})v_m(k-1) \quad (15)$$

MV می تواند با k_0 ، k_1 از (7b) محاسبه گردد و

$$u(k) = k_0[y_r - \{y(k) + [y_m(k) - y_m(k-d)] + [y_{vm}(k-(d_v-d)) - y_{vm}(k-d_v)]\}] + k_1y_m(k) + k_{1v}v_m(k-(d_v-d)) + k_{2v}y_{vm}(k-(d_v-d)) \quad (16)$$

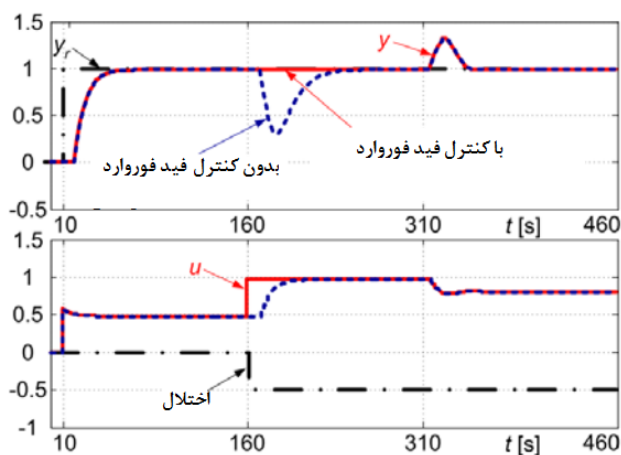
$$k_{1v} = -\frac{K_{vm}[1-(-a_{vm})^{n_p}]}{K_m[1-(-a_m)^{n_p}]}; \quad k_{2v} = \frac{1-(-a_{vm})^{n_p}}{K_m[1-(-a_m)^{n_p}]} \quad (17)$$

شکل 12 شبیه سازی PFC، با تغذیه به طرف آن بر اساس اختلال اندازه گیری شده را نشان می دهد. یک مدل مرتبه اول تأخیر یافته از این فرآیندها در الگوریتم PFC با $K_m = 2, T_m = 10s$ و $T_{dm} = 10s$ فرض می گردد. پارامترهای کنترل کننده $T_c = 25s$ و $n_p = 1$ هستند. سناریو کنترلی در شکل 12 و سپس در شکل 14 بدین صورت است :

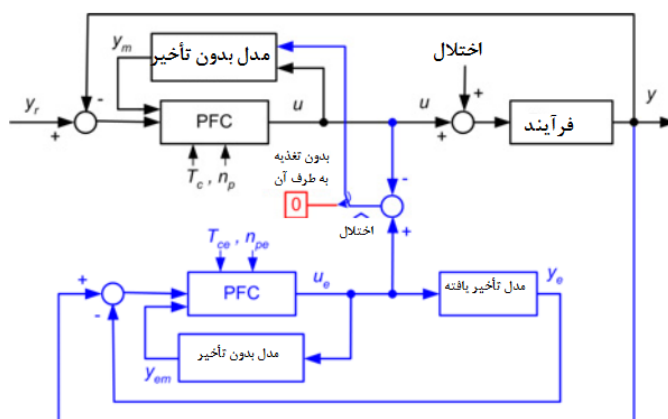
- زمان نمونه برداری $\Delta t = 1s$ و زمان شبیه سازی 460 ثانیه است،
- در $t = 10s$ افزایش پلکانی (مرحله‌ای) y_r از 0 به 1
- در $t = 160s$ اختلال خارجی پلکانی از 0 به -0.5
- در $t = 310s$ افزایش پلکانی بهره فرآیند با 50 %

B. کنترل همراه با تغذیه اختلال تخمینی به طرف آن

ریچالت [2] مشاهده‌گر اختلال را معرفی نمود (شکل 13) مزیت اصلی این طرح آنست که ابزارهای مشابهی همانطور که پیش از این در PFC نصب گردیده، استفاده می‌نماید، که از اینرو می‌تواند به آسانی بکار گرفته شود. یک مدل فرآیند شبیه سازی شده با یک PFC سریع در تخمین‌گر کنترل می‌گردد. هم کنترل‌کننده "حقیقی" و هم کنترل-کننده تخمین‌گر مدل فرآیند مشابهی را بدون زمان مرده استفاده می‌کنند. متغیر کنترل شده y به عنوان سیگنال مرجع تخمین‌گر PFC بکار می‌رود. با وجود آنکه حلقه کنترلی تخمین‌گر دچار اختلال نشده است، اختلاف بین هر دو سیگنالهای تنظیم شده به طور دستی / کنترلی برابر با اختلال خارجی عمل‌کننده بر ورودی فرآیند است و این در صورتی است که مدل فرآیند و کنترل‌کننده‌ها کامل و صحیح باشند. در نتیجه این اختلاف، اختلاف تخمینی عمل‌کننده بر ورودی فرآیند است. یک توصیف مفصلی از تخمین‌گر اختلاف در [2] و [7] داده می‌شود. به دلیل سه حلقه فیدبک در کنترل کامل، برخی از فیلترها بایستی جهت اجتناب از ناپایداری مورد استفاده قرار گیرند. شکل 14 کنترل را با اختلال تخمین یافته نشان می‌دهد. پارامترهای تخمین‌گر برای فرآیند مرتبه اول: $T_{ce} = 1s$ و $n_{pe} = 1$ هستند. اختلالات ساختاری و خارجی تخمین یافته در حالت فرآیند مرتبه اول جبران‌سازی می‌گردند و چنانکه در این حالت پارامترهای کنترل‌کننده به طور بهینه تنظیم نشده‌اند، با اختلالات ساختاری نوسانات شدیدی آغاز می‌شوند.



شکل 12 : PFC با کنترل فید فوروارد اختلال اندازه گیری شده



شکل 13 : PFC همراه با مشاهده گر اختلال

11. کنترل فاکشنال پیش‌بینانه TITO

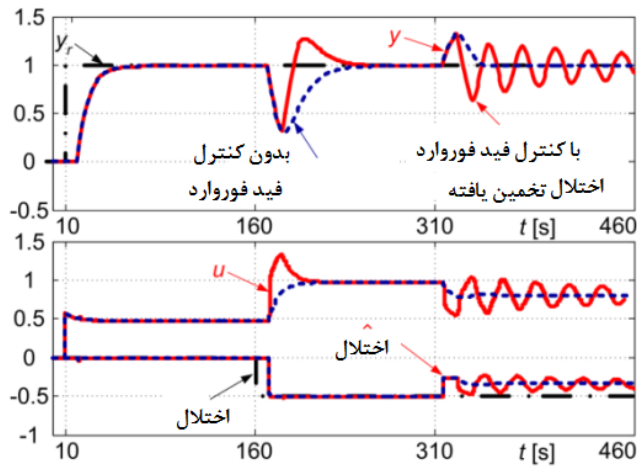
دیگرام بلوکی از یک فرآیند $TITO^1$ (دو ورودی - دو خروجی) در شکل 15 نشان داده می‌شود. PFC از فرآیند

SISO می‌تواند برای فرآیند TITO نیز جهت دستیابی به هدف کنترل نمودن هر دو سیگنالهای خروجی y_1 و y_2

توسعه یابد (برای $i=1,2$):

$$(1 - \lambda_{ri}^{n_{pi}})[y_{ri} - \hat{y}_i(k + d_{mi}|k)] = \hat{y}_{mi}(k + n_{pi}|k) - \hat{y}_{mi}(k) \quad (18)$$

¹ Two-Input, Two-Output



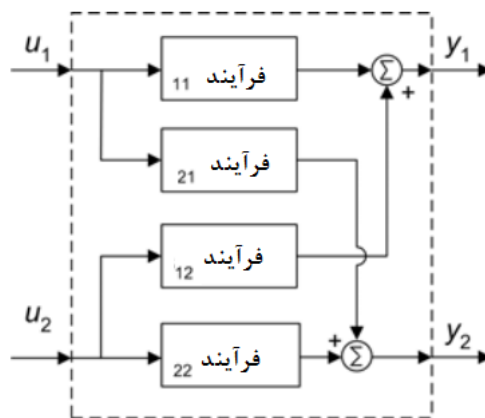
شکل 14 : PFC با فید فوروارد اختلال تخمین یافته

در حالیکه برای i امین سیگنال کنترلی: y_{ri} سیگنال مرجع، \hat{y}_i سیگنال کنترل و پیش بینی شده، \hat{y}_{mi} خروجی مدل بدون تأخیر پیش بینی شده، $d_{mi} = \max(d_{mi1}, d_{mi2})$ زمان مرده فرضی است، λ_{ri} نرخ کاهش خطای کنترلی i ام است. پارامترهای تنظیم کننده: زمان نشست حلقه بسته $T_{ci} = -3\Delta t / \log(\lambda_{ri})$ و گستره های پیش بینی n_{pi} هستند. می توان

مشاهده نمود که دو MV با مینیمم سازی تابع کناری مرتبه دوم محاسبه می گردند [2]:

$$\mathfrak{J} = \sum_{i=1}^2 [\chi_i - \alpha_{i1}u_1(k) - \alpha_{i2}u_2(k)]^2 \Rightarrow \text{MIN}_{u_1, u_2} \quad (19)$$

جواب های (19) در هر گام کنترلی محاسبه می گردند (اگر وجود داشته باشند)، در غیر اینصورت (هنگامیکه راه حل هایی وجود نداشته باشند) پارامترهای تنظیم کننده اصلاح می گردند.



شکل 15 : مدل فرآیند TITO

12. نتیجه‌گیری

این آموزش ایده بنیادین و الگوریتم‌های اصلی PFC و به طور اساسی برای فرآیندهای SISO را نشان داده است. PFC با PI(D) و پیش‌بینی‌کننده اسمیت مقایسه شده است و مزایای PFC مورد توجه قرار گرفته‌اند. اختلاف اصلی بین آن کنترل‌کننده‌ها در دانش PFC از رفتار فرآیند گنجانده می‌شود. "PFC با فرآیندی که بایستی کنترل شود، آشنا است؛ پیش‌بینی اینکه چه چیزی در حال اتفاق است." همانطور که PFC ساده است، جدول 3 ویژگی‌های آن را با پکیج‌های MPC تجاری مقایسه می‌کند. PFC یک رقیب در برابر MPC تجاری نیست، و می‌تواند برای موارد ساده که MPC تجاری بیش از نیاز است، مورد استفاده قرار گیرد. تنها اگر کنترل‌کننده‌های سطح پایه به خوبی کار کنند، MPC چند متغیره می‌تواند یک کارخانه پیچیده را کنترل نماید. برای این کار، PFC یک انتخاب ایده آل است.

جدول 3 : PFC در برابر نرم‌افزار MPC تجاری

ویژگی	MPC تجاری	PFC
فرآیند MIMO	می‌تواند به کار برود	در حالت MIMO چندان آسان نیست
محدودیت MV	با بهینه‌سازی عددی	برش ساده
محدودیت CV	با بهینه‌سازی عددی یا فاکتورهای وزنی	با استفاده از پیش‌بینی‌کننده CV
پارامترهای کنترل‌کننده	فاکتورهای وزنی بدون معنی فیزیکی مستقیم	زمان نشست مطلوب پارامتر کنترل-کننده است
نیرومندی	معمولاً بله، الگوریتم‌های پیچیده	بله، از طریق زمان نشست مطلوب
پیش‌بینی نقطه تنظیم	ممکن است	ممکن است
لایسنس نرم‌افزاری	بله	خیر

PFC که در اغلب واحدهای کنترلی صنعتی بکار اجرا می‌شود، در کشورها و فرآیندهای مختلف بسیار بکار برده می‌شود و در مدارس فنی مختلفی تدریس می‌گردد. مشکلاتی با فرآیندهای دشوار (یعنی تکرار معکوس، میرایی ضعیف، ناپایداری) در این آموزش به آنها پرداخته نمی‌شود اما دستورالعمل‌های خوبی وجود دارد [2، 8، 9]. جایابی قطب PFC برای سیستم‌هایی با میرایی شدید در [10] و برای سیستم‌هایی با میرایی ضعیف در [11] پیشنهاد می‌گردد.

مؤلفان از ژاکوس ریچالت برای بحث های بسیار سودمند و برخی از کدهای PFC تشکر می کنند.

REFERENCES

- [1] J. Richalet, A. Rault, J.L. Testud, J. Papon, "Model predictive heuristic control: applications to industrial processes," *Automatica*, vol. 14, no. 5, pp. 413-428, 1978
- [2] J. Richalet, D. O' Donovan, "Predictive functional control Principles and industrial applications," Springer-Verlag, London, 2009
- [3] M.T. Khadir, J.V. Ringwood, "Extension of first order predictive functional controllers to handle higher order internal models," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 18, no. 2, pp 229-239, 2008
- [4] J. A. Rossiter, R. Haber, "The effect of coincidence horizon on predictive functional control", *Processes*, Vol. 3, 25-45, 2015
- [5] R. Haber, R. Bars, U. Schmitz, "Predictive Control in Process Engineering: From the Basics to the Applications, Ch. 11: Predictive Functional Control," Wiley-VCH, Weinheim, 2011
- [6] J. Normey-Rico, C. Bordons, E. Camacho, Improving the robustness of dead-time compensating PI controllers, *Control Engineering Practice*, Vol. 5, 801-810, 1997
- [7] K. Zabet, R. Haber. K. Mocha Stabilizing gain design for PFC (Predictive Functional Control) with estimated disturbance feedforward. *Nordic Process Control Workshop*, Oulu. 2013
- [8] J. A. Rossiter, "Model predictive control: a practical approach," CRC press, 2003.
- [9] Rossiter, J.A., Input shaping for PFC, how and why? *Journal of Control and Decision*, DOI: 10.1080/23307706.2015.1083408, 2015.
- [10] J.A. Rossiter, R. Haber, K. Zabet. Pole-placement Predictive Functional Control for over-damped systems with real poles. *ISA Transactions*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2015.12.003>, Vol. 61, pp. 229-239, 2016.
- [11] J.A. Rossiter, R. Haber, K. Zabet. Pole-placement PFC (Predictive Functional Control) for systems with one oscillatory mode. *15th European Control Conference (ECC16)*, Aalborg, Denmark, 2016.