جبران اشباع محرک در سیستمی با کنترل کننده PID با استفاده از سیستم فازی و الگوریتم رقابت استعماری

عباسعلی زمانی[۱] - سید محمد کارگر دهنوی[۲]

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۲) مربی - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

تاریخ دریافت: تابستان ۱۳۹۰ تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۹۱

خلاصه: سیستم‌های فیزیکی همواره با قیود و محدودیت‌هایی همراه هستند. در سیستم‌های کنترل قیود معمولاً به شکل محدودیت‌های دما یا فشار و یا ظرفیت پمپ‌ها ظاهر می‌شود یکی از محدودیت‌های موجود در سیستم‌هایی با کنترل کننده PID، محدودیت‌های مربوط به اشباع محرک می‌باشد. در اثر به اشباع رفتن محرک خروجی کنترل کننده و ورودی فرآیند تحت کنترل با هم تفاوت پیدا می‌کنند و در حقیقت سیگنال خروجی کنترل‌کننده، سیستم را هدایت نمی‌کند و حالت‌های آن بدرستی بروز رسانی نمی‌شوند، که این امر موجب پاسخ نامناسب سیستم خواهد شد. در این مقاله با اضافه کردن یک جبرانساز فازی که پارامترهای آن با الگوریتم رقابت استعماری تعیین شده‌اند از اشباع محرک جلوگیری شده و پارامترهای مهم پاسخ سیستم مانند زمان نشست و فراجهش بهبود داده شده‌اند.

کلمات کلیدی: اشباع محرک،کنترل کننده PID، جبرانساز فازی، الگوریتم رقابت استعماری.

۱- مقدمه

اغلب سیستم‌ها دارای قیود و محدودیت‌هایی مانند، حداکثر ظرفیت پمپ‌ها، دریچه‌ها، محدودیت‌های جریانی و ... هستند یکی از مهمترین این محدودیت‌ها، محدودیت‌های ناشی از به اشباع رفتن محرک می‌باشد که به عنوان محدودیت ورودی شناخته می‌شود. در اثر به اشباع رفتن محرک، خروجی کنترل‌کننده و ورودی فرآیند تحت کنترل با هم تفاوت پیدا می‌کنند و در حقیقت سیگنال خروجی کنترل کننده سیستم را هدایت نمی‌کند و حالت‌های آن به طور اشتباه بروز می‌شوند و باعث بروز مشکلی به نام Windup می‌شود [۲-۱].

معمولا طراحی کنترل‌کننده بصورت خطی و بدون در نظر گرفتن این محدودیت‌های غیر خطی انجام می‌شود پس زمانی که اشباع محرک اتفاق می‌افتد قطعا بر روی پاسخ سیستم و نحوه عملکرد آن اثر منفی خواهد داشت و کنترل‌کننده مقادیر متفاوتی را نسبت به زمان عدم حضور اشباع دریافت خواهد کرد و نتیجه آن تولید سیگنال کنترلی نامناسب می‌باشد. معمولا برای جلوگیری از به اشباع رفتن محرک اثر آنرا در نظر نمی‌گیرند سپس جبران سازی، با رعایت مسائل پایداری به آن اضافه می‌کنند [۳و۱۰].

کنترل‌کننده PID یکی از ساده‌ترین کنترل‌کننده‌های صنعتی است که مزایای زیادی مانند، سادگی در تنظیم، مقاوم بودن وکم هزینه بودن را داراست [۴]. یکی از معایب این کنترل‌کننده به علت داشتن عامل انتگرال‌گیر موجود در ساختار آن می‌باشد، و این مشکل زمانی رخ می‌دهد که سیگنال خروجی کنترل‌کننده محرک را به اشباع می‌برد و یک افزایش بیشتر در سیگنال کنترل منجر به پاسخ سریعتر سیستم نمی‌شود. اگر انتگرالگیری از خطا ادامه یابد مقدار انتگرالگیر بدون هیچ اثری روی خروجی پروسه خیلی بزرگ می‌شود پس خطای کنترل مجبور می‌شود برای مدت طولانی علامت مخالف داشته باشد تا انتگرالگیر را به صورت حالت ماندگارش برساند که نتایج آن بالازدگی زیاد و زمان نشست طولانی است [۵].

برای رفع این مشکل روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است مانند Anti-reset windup وLimited-integrator [۶]. در این مقاله برای

جبران اشباع محرک جبرانساز فازی سیگنال‌های مختلف را از بلوک کنترل‌کننده PID می‌گیرد و سیگنالی را برای بهبود عملکرد سیستم تولید می‌کند. این عمل به سرعت اثر اختلال را جبران و باعث بهبود رفتار سیستم می‌شود. در نهایت خروجی قسمت فازی با سیگنال کنترل‌کننده PID جمع شده و سیگنال کنترلی را می‌سازند. همچنین برای تعیین بهینه پارامترهای جبرانساز فازی از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است.

۲- جبرانساز فازی

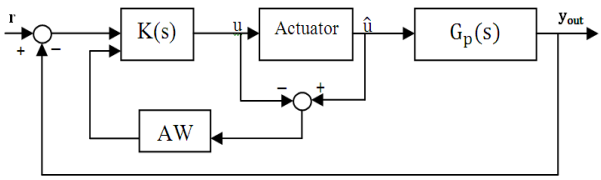
سیستم فازی به کار رفته برای جبران اشباع محرک در این مقاله از نوع ممدانی می‌باشد. این سیستم دارای دو ورودی و یک خروجی می‌باشد، ورودی‌های این سیستم عبارتند از خطا و خروجی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده PID و خروجی آن با استنتاج از قواعد فازی و غیر فازی ساز مرکز ثقل از طریق روابط (۱) و (۲) به ترتیب به دست می‌آید.

$$\text{IF (error is } MF_i^1\text{) AND (integral output of PID controller is } MF_j^2\text{) THEN (out is } MF_k^3\text{)} \quad (۱)$$

$$i=1,2,\ldots,5 \quad , \quad j=1,2,\ldots,5 \quad , \quad k=1,2,\ldots,5$$

$$U_a=\frac{\int y\mu_{out}(y)dy}{\int \mu_{out}(y)dy} \quad (۲)$$

منظور از MFها توابع تعلق می‌باشد که در این مقاله از ۵ تابع تعلق برای خطا و خروجی انتگرال‌گیر و خروجی سیستم استفاده شده است [۷-۶]. همچنین برای تعیین پارامترهای هر یک توابع تعلق و جدول قواعد فازی بهینه، از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. در شکل (۱) شمای کلی یک جبرانساز استاندارد (Anti Windup) که به اختصار AW نامیده می‌شود، نمایش داده شده است.



شکل (۱): شمای کلی جبرانساز استاندارد
Fig. (1): Standard anti-windup scheme

۳- الگوریتم رقابت استعماری

در الگوریتم رقابت استعماری اولین بار در سال ۲۰۰۷ ارائه شد. این الگوریتم از یک رفتار سیاسی،اجتماعی و فرهنگی به نام امپریالیسم الهام گرفته شده است.

مشابه دیگر روش‌های تکاملی، این الگوریتم با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود که افراد آن، کشورهای جهان هستند. بهترین کشورهای موجود در جمعیت به عنوان استعمارگر انتخاب شده و بقیه مستعمرات خواهند بود. تمامی مستعمرات در جمعیت اولیه، براساس قدرت آنها بین استعمارگران تقسیم می‌شوند. قدرت هر حکومت با هزینه آن، نسبت عکس دارد. قدرت هر حکومت معادل تابع شایستگی در الگوریتم وراثتی است. بنابراین هرچه هزینه یک حکومت کمتر باشد شایستگی آن بیشتر خواهد بود. پس از تقسیم مستعمرات بین استعمارگران، این مستعمرات به سوی استعمارگران خویش شروع به حرکت می‌کنند. قدرت هر حکومت وابسته به قدرت کشور استعمارگر و قدرت مستعمرات آن است که در اینجا این قدرت به صورت مجموع قدرت استعمارگر و میانگین قدرت مستعمرات آن مدل می‌شود.

روند این الگوریتم به صورت زیر می‌باشد:

۱- تولید تصادفی جمعیت اولیه (کشورها) و محاسبه مقدار تابع برازندگی برای هر کشور.

۲- تشکیل امپراطوری‌های اولیه.

۳- حرکت مستعمرات به سمت کشورهای استعمارگر (سیاست جذب).

۴- تعویض جای مستعمره و استعمارگر، در صورت وجود مستعمره‌ای در یک امپراطوری با هزینه‌ای کمتر از استعمارگر.

۵- محاسبه هزینه کل یک امپراطوری (با در نظر گرفتن هزینه استعمارگر و مستعمره‌های آن).

۶- رقابت استعماری (انتخاب یک مستعمره از ضعیفترین امپراطوری و اختصاص آن به امپراطوری‌ای که بیشترین احتمال تصاحب را دارد).

۷- حذف امپراطوری‌های ضعیف.

۸- توقف الگوریتم، در صورتی که اگر تنها یک امپراطوری باقی مانده، در غیر این صورت رفتن به مرحله ۴.

سیاست همسان‌سازی به گونه‌ای می‌باشد، که مستعمره با واحد x به سمت استعمارگرش در حال حرکت است. که x یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت (یا هر توزیع مناسب دیگر) مطابق با رابطه (۳) می‌باشد.

$$x \sim U(0,\beta \times d) \quad (۳)$$

که β یک عدد بزرگتر از ۱ و d فاصله بین مستعمره و استعمارگر است. برای جستجوی مکان‌های بیشتر در اطراف استعمارگر یک مقدار انحراف θ به صورت تصادفی به جهت حرکت مستعمره‌ها به صورت تصادفی اضافه می‌شودکه θ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت (یا هر توزیع مناسب دیگر) مطابق با رابطه (۴) می‌باشد.

$$\theta z \sim U(-\gamma,) \quad (۴)$$

که γ یک عدد رندوم است و$\frac{\pi}{4}$(رادیان) برای γ و ۲ برای β منجر به جواب‌های مناسبی می‌شود. برای محاسبه قدرت یک امپراتوری از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$T.C._n = Cost\ (imperialist) + \zeta\ mean\ \{Cost\ (colonies\ of\ empire)\} \quad (۵)$$

که $T.C._n$ قدرت کلی امپراتور و ζ یک عدد مثبت کوچکتر از یک می‌باشد. برای شروع رقابت ابتدا باید احتمال مالکیت هر امپراتور را بر اساس قدرت آنها به دست آوریم. هزینه کلی نرمالیزه شده به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$N.T.C._n = T.C._n - \max_i \{T.C._i\} \quad (۶)$$

احتمال مالکیت هر استعمارگر را مطابق رابطه (۷) به دست آمده و بردار P را تشکیل می‌دهد.

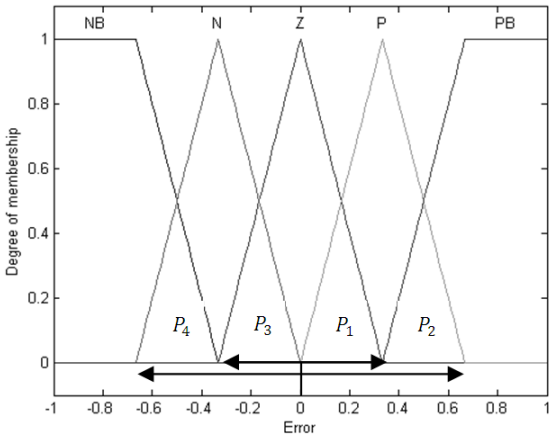
$$P_{P_n}=\left|\frac{N.T.C_{,n}}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C_{,i}}\right|,\ P=[P_{P1}, P_{P2},\ldots,P_{P\,N\,imp}] \qquad (۷)$$

سپس یک بردار (R) هم اندازه با P با مولفه‌های تصادفی حاصل از یک توزیع یکنواخت را تولید می‌شود و در ادامه اختلاف دو بردار (D=P-R) را به دست می‌آید سپس حکومت متناظر با بزرگترین مولفه D صاحب مستعمره می‌شود [۹-۸].

۴- تعیین بهینه پارامترهای جبرانساز فازی با الگوریتم رقابت استعماری

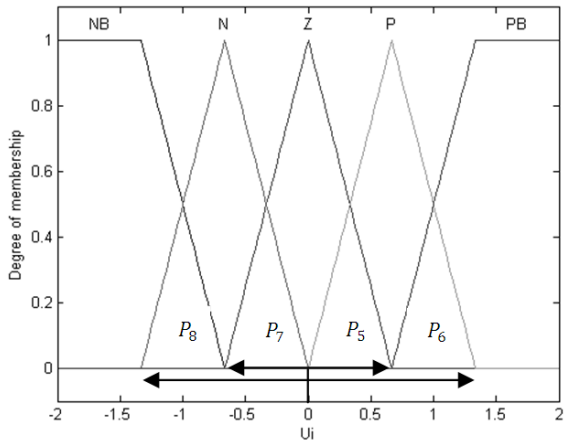
برای برای استفاده از این الگوریتم برای طراحی جبرانساز اشباع محرک فازی باید پارامترهای مسئله را در غالب بردار متغیرهای قابل استفاده در این الگوریتم در آوریم. بردار متغیرها در الگوریتم ژنتیک کروموزوم و در این الگوریتم کشور نامیده می‌شود. هر بردار شامل پارامترهای مربوط به توابع تعلق و جدول قواعد فازی بهینه می‌باشد به طوری که یک تابع هدف خاص را مینیمم کند [۱۰].

پارامترهای توابع تعلق و محدوده‌های توابع تعلق ورودی‌ها وخروجی سیستم در شکل‌های (۲) و (۳) و (۴) نشان داده شده است. در این مقاله یکی از اهداف به دست آوردن نقاط بهینه P_1 تا P_{12} می‌باشد که این نقاط در شکل‌ها مشخص شده‌اند.



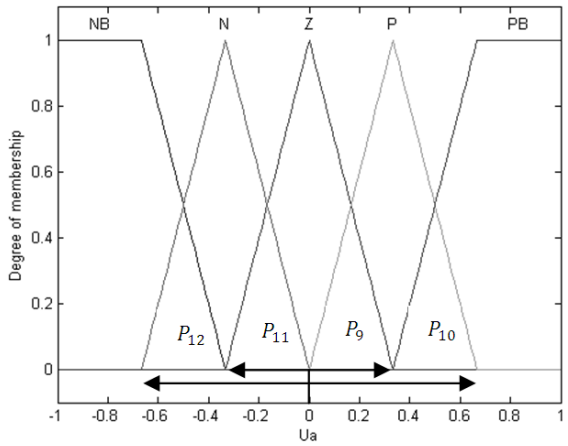
شکل (۲): توابع تعلق اولیه برای خطا

Fig. (2): Initial membership function for error



شکل (۳): توابع تعلق اولیه برای خروجی انتگرال گیر

Fig. (3): Initial membership function for integrator output



شکل (۴): توابع تعلق اولیه برای خروجی

Fig. (4): Initial membership function for compensator output

همانطور که قبلا اشاره شد، برای خطا و برای خروجی انتگرال‌گیر هر کدام ۵ تابع تعلق در نظر گرفته شده است و همچنین تعداد قوانین جدول قواعد ۲۵ قانون می‌باشد پس سایر درایه‌های بردار هر کشور، از P_{13} تا P_{37}، مربوط به جدول قواعد فازی بهینه می‌باشد.

در این مقاله هدف طراحی جبرانساز فازی است، بطوری که مانع از اشباع شدن محرک و نیز بهبود مشخصات پاسخ‌گذاری سیستم، مانند میزان بالازدگی و زمان نشست شود. برای این منظور تابع هدف مطابق با رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$J=C_1\int_0^{t_f}|e(t)|dt+C_2E_{ss}+C_3M_p\Big|+C_4\int_0^{t_f}u_a(t)^2dt \qquad (۸)$$

در این تابع منظور از $e(t)$ سیگنال خطا و منظور از E_{ss} خطای حالت ماندگار و منظور از M_p فراجهش خروجی کلی و منظور از $u_a(t)$ خروجی جبران‌ساز فازی می‌باشد. جمله اول در تابع هزینه بدین منظور در نظر گرفته شده که خطای ردیابی در کمترین زمان به کمترین مقدار خود برسد و جمله چهارم در تابع هزینه بدین منظور در نظر گرفته شده که عمل جبرانسازی هزینه کمی داشته باشد و جملات دوم

وسوم نیز مربوط به فراجهش و خطای حالت ماندگار می‌باشند که باید کاهش پیدا کنند.

ضرایب C در تابع هزینه وزن‌های المان‌های تابع هزینه می‌باشند که در اینجا به صورت $C_1 = 1.1$ و $C_2 = 100$ و $C_3 = 1$ و $C_4 = 10^{-4}$ و $C_5 = 10$ در نظر گرفته شده‌اند.

برای شبیه‌سازی، تابع تبدیل پروسه و محرک یا عمل‌کننده به صورت روابط (۹) و (۱۰) انتخاب می‌شوند و خروجی محرک بین ۱- و۱ محدود شده است.

$$G_p(s)=\frac{e^{-0.2s}}{s+1} \quad (۹)$$

$$G_A(s)=\frac{e^{-0.1s}}{0.2s+1} \quad (۱۰)$$

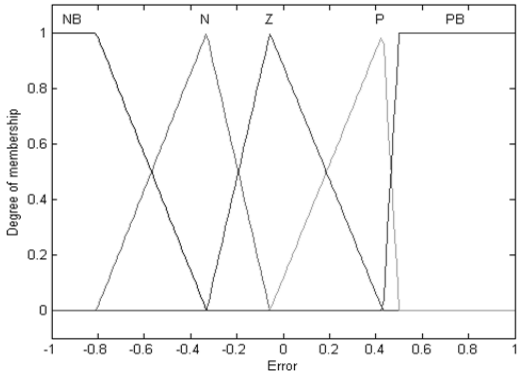
کنترل‌کننده PID برای این سیستم با استفاده از روش زیگلر نیکولز تنظیم شده و پارامترهای آن به صورت زیر انتخاب خواهندشد.

K=2.01
Ti=0.92
Td = 0.23

که در آن K بهره تناسبی و T_i زمان انتگرال‌گیری و T_d زمان مشتق‌گیری و N عامل مربوط به مشتق‌گیر می‌باشد [۶]. پاسخ سیستم همراه با کنترل‌کننده PID برای ورودی پله با دامنه 0.9 به صورت شکل (۹) می‌باشد. همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود در خروجی سیستم کلی هم محرک به اشباع رفته و هم دارای زمان نشست طولانی و فراجهش زیاد می‌باشد.

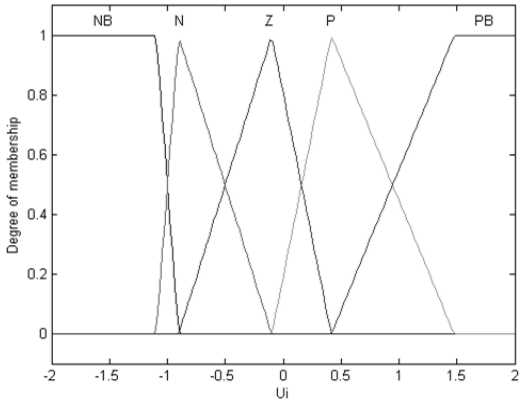
به منظور بهبود پاسخ سیستم و جلوگیری از اشباع محرک یک سیستم فازی به کنترل کننده اضافه می‌شود که ورودی‌های آن به ترتیب سیگنال خطا و سیگنال خروجی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده PID می‌باشند، خروجی این سیستم سیگنالی می‌باشد که در صورت به اشباع رفتن محرک به سیگنال خروجی کنترل‌کننده PID اضافه می‌شود تا هم از اشباع محرک جلوگیری کرده و هم مشخصات پاسخ همانطور که در تابع هزینه بیان شد بهبود پیدا کند.

پس از اجرای الگوریتم رقابت استعماری با بردار ۳۷ درایه‌ای که در قسمت قبل توضیح داده شد، توابع تعلق بهینه به صورت شکل‌های (۵) و (۶) و (۷) به دست می‌آیند.



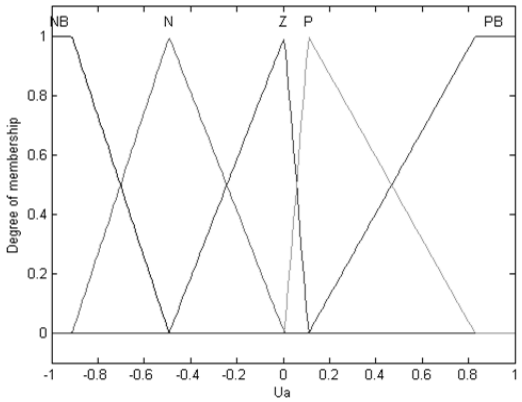
شکل (۵): توابع تعلق بهینه برای خطا

Fig. (5): Optimal membership function for error



شکل (۶): توابع تعلق بهینه برای خروجی انتگرال گیر

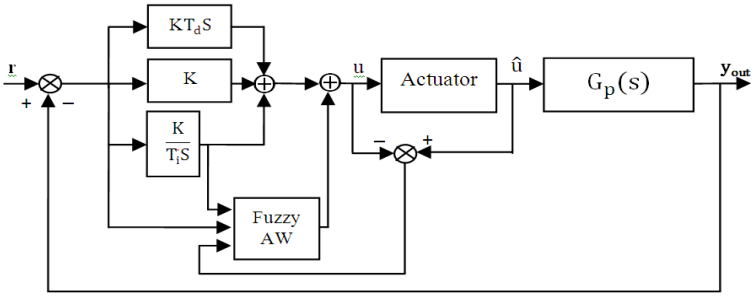
Fig. (6): Optimal membership function for integrator output



شکل (۷): توابع تعلق بهینه برای خروجی سیستم فازی

Fig. (7): Optimal membership function for compensator output

باید توجه داشت که با این توابع تعلق در حقیقت تابع هزینه که در رابطه (۸) بیان شد مینیمم می‌شود. شمای کلی سیستم با جبرانساز به صورت شکل (۸) می‌باشد.



شکل (۸): بلوک دیاگرام کلی سیستم
Fig. (8): Main system with fuzzy compensator

جدول قواعد فازی بهینه که از طریق این روش به دست آمده به صورت جدول شماره (۱) می‌باشد.

جدول (۱): قواعد فازی بهینه

u_i / e	NB	N	Z	P	PB
NB	PB	PB	P	Z	Z
N	PB	PB	Z	Z	NB
Z	PB	PB	Z	N	NB
P	PB	P	Z	NB	NB
PB	P	P	N	NB	NB

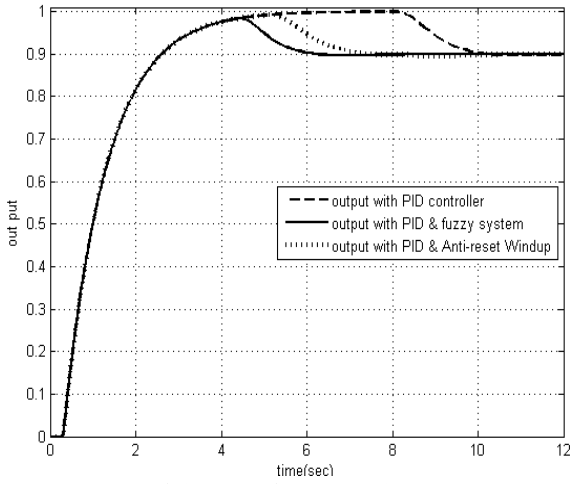
P = Positive
N = Negative
Z = Zero
NB = Negative Big
PB = Positive Big

پاسخ سیستم با اضافه کردن جبرانساز فازی به کنترل‌کننده PID بصورت شکل شماره (۹) می‌باشد. برای مقایسه عملکرد جبران‌ساز فازی نتایج حاصل از طراحی جبران‌ساز به روش Anti-reset Windup نیز در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است.

برای طراحی Anti-reset Windup پارامتر طراحی T_t می‌باشد که مقدار آن برای کنترل‌کننده PID طبق رابطه (۱۱) بر اساس پارامترهای PID انتخاب می‌شود. این پارامتر برای شبیه‌سازی‌ها در این قسمت $T_t = 0.2116$ انتخاب شده است.

$$T_t = \sqrt{T_i T_d} \qquad (۱۱)$$

برای بررسی بهتر عملکرد جبران‌کننده فازی ورودی‌های پله با دامنه‌های مختلف را به سیستم اعمال کرده و مشخصه‌های مهم سیستم از جمله فراجهش و زمان نشست، در جدول شماره (۲) آورده شده است، لازم به ذکر است که در تمامی حالات، سیستم فازی تنظیم شده با الگوریتم رقابت استعماری، از اشباع محرک جلوگیری می‌کند. زمان نشست در این جدول با معیار 2% محاسبه شده و واحد آن ثانیه می‌باشد، همچنین زمان کل شبیه‌سازی در تمامی حالات 12 ثانیه است. در شکل شماره (۱۰) پاسخ به ورودی پله با دامنه 0.7 نمایش داده شده است.



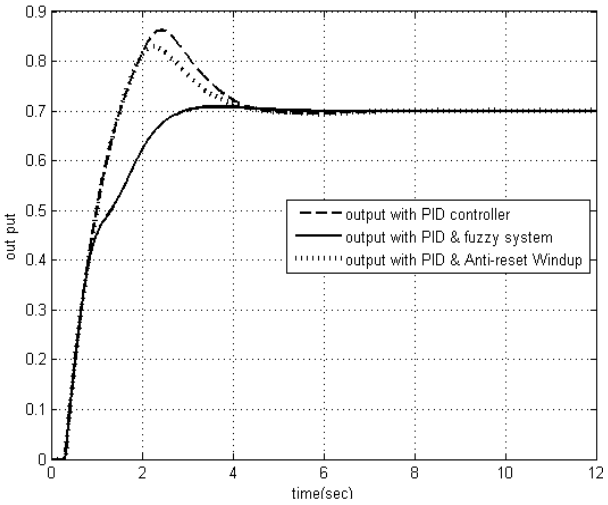
شکل (۹): پاسخ سیستم برای ورودی با دامنه ۰.۹
Fig. (9): Output response for step=0.9

جدول (۲): مشخصات پاسخ‌ها

دامنه ورودی سیستم	سیستم بدون جبران سیستم فازی		سیستم همراه با جبران سیستم فازی	
	زمان نشست	فراجهش	زمان نشست	فراجهش
0.9	9.48	%9.96	5.2	%8
0.7	4.14	%6.24	2.59	%0.82
0.5	3.41	%5.29	2.1	%0.7

نتیجه گیری

در اثر به اشباع رفتن محرک خروجی کنترل‌کننده و ورودی فرآیند تحت کنترل با هم تفاوت پیدا می‌کنند و در حقیقت سیگنال خروجی کنترل کننده سیستم را هدایت نمی‌کند و حالت‌های آن به درستی بروز رسانی نمی‌شوند و این باعث پاسخ نامناسب سیستم خواهد شد. در این مقاله برای جلوگیری از به اشباع رفتن محرک در یک سیستم نمونه و همچنین به منظور بهبود مشخصات پاسخ آن از یک سیستم فازی همراه با کنترل‌کننده PID استفاده شده است. پارامترهای این سیستم فازی را با در نظر گرفتن یک تابع هزینه مناسب از طریق الگوریتم رقابت استعماری به دست آورده شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از اشباع محرک جلوگیری کرده و مشخصات پاسخ گذرای سیستم را بهبود می‌بخشد.



شکل (۱۰): پاسخ سیستم برای ورودی با دامنه ۰.۷

Fig. (10): Output response for step=0.7

References

[1] M.V. Kothare, P.J. Compo, M. Morari, "A unified framework for the study of Anti-Windup design", Automatica Vol.30, No.12, pp.1869-1875, 1994.

[2] Y. Cao, Z. Lin, D.G. Ward, "An anti-windup Approach to enlarging Domain of Attraction for linear systems subject to actuator saturation", IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Vol.48, No.1, Jan. 2002.

[3] T. Hu, A.R. Teel, L. Zaccarian, "Regional anti-windup compensation for linear systems with input saturation", In Proc. Amer. Control Conf, Portland, OR, pp.3397–3402, Jun 8–10, 2005.

[4] K.J. Astrom, J. Hagglund, "Automatic tuning of PID controllers", Instrument Society of America, 1988.

[5] L. Guohan, W. Yingxu, H. Feng, "A novel anti-windup compensator based on fuzzy logic", Proceedings of 2009 4th International Conference on Computer Science & Education, pp.23-26, 2009.

[6] C. Bohn, D.P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies", IEEE Control Systems, Vol.15, No.2, pp.34-40, April1995.

[7] L.X. Wang, A. Course, "In fuzzy systems and control", Prentice-Hall, 1st edition, 1996.

[8] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, Singapore, pp.4661-4667, 2008.

[9] E. Atashpaz-Gargari, F. Hashemzadeh,C. Lucas, "Evolutionary design of PID controller for a MIMO distillation column using colonial competitive algorithm", International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, Vol.1, No.3, pp.337-355, 2008.

[10] S. Sajjadi-Kia, F. Jabbari, "Modified anti-windup compensators for stable plants", IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Vol.54, No.8, Aug. 2009.

[11] W.R. Hwang, W.E. Thompson, "Design of intelligent fuzzy logic controllers using genetic algorithms", Proceedings of the Third IEEE Conference at IEEE World Congress on Computational Intelligence and Fuzzy Systems, Vol.2, pp.1383-1388, 26-29 Jun 1994.