

کنترل پروسه های صنعتی و تنظیم پارامترهای کنترل گر PID توسط به کارگیری الگوریتم ژنتیک

محمد باقر فروحی منجیلی¹، حسن ابراهیمی راد^{1,2}

¹ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی - دانشکده مهندسی برق

² دانشگاه تهران - گروه مهندسی برق و کامپیوتر

e-mail : Mohammadfm2001@yahoo.com

چکیده - با مطالعه دقیق کتب، درباره کنترل کننده های PID متوجه یک ازدیاد گیج کننده ای از تکنیک های موجود برای سیستم های ساده و بر عکس یک کمبود عمده در تکنیک های موجود برای سیستم های پیچیده تر می شویم. عموماً تکنیک های اعمال شده به سیستم های ساده برای سیستم مرتبه بالاتر مناسب نیستند و علاوه بر این، این روش ها حتی برای سیستم های ساده نیز مکرراً بی نتیجه می مانند به عنوان مثال هنگامی که سیستم دارای تاخیر زمانی باشد. الگوریتم ژنتیک این مشکل را با ارائه دادن یک روش تنظیم سازی عمومی که قابل اعمال به گونه های وسیع ای از سیستم هاست، حل کرده است.

این مقاله اعمال الگوریتم ژنتیک به چند سیستم نمونه را نشان میدهد و نتیجه حاصله را با نتیجه ای که از روش های متداول تنظیم سازی بدست آمده، مقایسه می کند. نتیجه شبیه سازی ها نشان می دهد که الگوریتم ژنتیک بر بسیاری از سیستم ها که تنظیم سازی آنها دشوار است غلبه کرده و نتایج قانع کننده ای در این سیستم ها تولید نموده است.

کلید واژه - الگوریتم ژنتیک، تنظیم سازی، شاخص رفتاری، کنترل کننده PID

1- مقدمه :

قابل استفاده شدیداً کاهش می یابند و در برخی از موارد کاملاً از میان می روند. از این رو معمولاً این اتفاق می افتد که اگر یک طراح بخواهد کنترل کننده ای را بهینه کند یا اینکه بگوئیم بخواهد انتگرال قدر مطلق خطا (IAE) را کمینه کند، بسته به نوع سیستم مورد نظر، او ممکن است با کثرت قوانین یا اینکه فقدان کامل قوانین مواجه شود که کاملاً واضح است که این حالت ایده آلی نیست.

هدف از این مقاله نشان دادن یک روش تنظیم سازی است که یک شیوه واحد را در رنج گسترده ای از مدل سیستم ها مورد استفاده قرار می دهد. برای رسیدن به این هدف، الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می گیرد. شیوه GA بر مبنای یک تحقیق شهودی و تکامل یافتن است. معمولاً GA با داده های کم و بدون اطلاع از درستی آنها شروع به کار می کند و کاملاً وابسته به پاسخ های متقابل دریافتی از محیط و عملکرد تکاملی آن تا رسیدن به پاسخ مطلوب، می

علی رغم فراوانی روش های موجود در کتابها برای اصلاح پارامترهای کنترل کننده های PID و PI، تلاش برای توسعه یک روش جدید همچنان ادامه دارد. بی شک این به خاطر کاربرد گسترده این کنترل کننده های توانمند در صنعت و همچنین به خاطر این است که تشخیص داده شده است که اکثریت سیستم ها به آن خوبی که ما تصور می کنیم تنظیم نمی شوند [4]. در حال حاضر بیشتر روش های اصلاح پارامترهای PID و PI محدود به کلاس خاصی از مدل سیستم ها شده است و یک روش جامع برای یک سیستم دلخواه به غیر از تخمین زدن آن به یک سیستم مرتبه اول یا مرتبه دوم با تاخیر زمانی و اعمال قوانین مربوط به آنها، وجود ندارد. بنابراین هنگامی که پیچیدگی یک سیستم افزایش می یابد به عنوان مثال یک سیستم مرتبه اول ناپایدار با تاخیر زمانی، تعداد قوانین تنظیم سازی

باشد. با ادامه این رفتار با چندین نقطه غیر وابسته (مشتق از نقاط بهینه نسل قبل)، نمونه های GA به طور یک راسا فضای سیستم را جستجو می کنند.

بنابراین GA به عنوان یک ابزار قدرتمند در بسیاری از کاربردهای کنترلی مانند: شناسایی پارامترها و طراحی سازه های کنترلی شناخته شده است [1]. GA همچنین استفاده گسترده ای در بهینه کردن کنترل کننده ها به خصوص در زمینه فازی لاجیک [8] و شبکه عصبی [11] پیدا کرده است. با این حال کاربرد GA در بهینه نمودن پارامترهای کنترل کننده PID نادیده گرفته شده است مخصوصاً به عنوان یک روش ثانوی برای سیستم هایی که به غیر از این روش تنظیم سازی آنها مشکل است. در پایان این مقاله بر بهینه سازی شاخص های رفتاری چند سیستم توسط قوانین موجود تنظیم سازی متمرکز شده است و سپس نتیجه بدست آمده از آن با کنترل گر مشابهی که پارامترهای آن توسط اعمال الگوریتم ژنتیک بدست آمده است، مقایسه می شود. نتیجه مقایسه نشان می دهد که مهندسين کنترل مدرن که می خواهند طراحی خوبی انجام دهند باید GA را در متدهای طراحی خود وارد کنند.

Chromosome 1 1101100100110110

Chromosome 2 1101111000011110

روشهای دیگری نیز برای نمایش کروموزومها وجود دارد که بسته به مسئله مورد حل می باشد. الگوریتم ژنتیک احتیاج به یک جمعیت اولیه برای نزدیک شدن به جواب نهایی دارد. در اینجا 40 شخص اولیه به صورت رندوم برای استفاده به عنوان جمعیت اولیه انتخاب شده است و سپس GA به صورت زیر شروع به کار می کند:

محاسبه $fitness$: قدم اول در روش GA ارزیابی هریک از کروموزوم ها می باشد و متعاقباً به آنها مقداری داده می شود. مقدار متغیرها (کروموزوم ها) به داخل الگوریتم بر می گردد و با استفاده از تابع مورد نظر مقدار کارایی آنها ارزیابی می شود و یک مقدار $fitness$ (شایستگی) به هر شخص داده می شود.

انتخاب ($selection$): چند تا از شایسته ترین کروموزوم ها با توجه به $fitness$ آنها به طور اتوماتیک انتخاب میشود در حالی که بقیه جمعیت به صورت احتمالی انتخاب می شوند. این یک استراتژی نخبه سالارانه است که اطمینان می دهد شایسته ترین های نسل بعد هرگز از بین نروهند رفت و از

باشد. با ادامه این رفتار با چندین نقطه غیر وابسته (مشتق از نقاط بهینه نسل قبل)، نمونه های GA به طور یک راسا فضای سیستم را جستجو می کنند.

بنابراین GA به عنوان یک ابزار قدرتمند در بسیاری از کاربردهای کنترلی مانند: شناسایی پارامترها و طراحی سازه های کنترلی شناخته شده است [1]. GA همچنین استفاده گسترده ای در بهینه کردن کنترل کننده ها به خصوص در زمینه فازی لاجیک [8] و شبکه عصبی [11] پیدا کرده است. با این حال کاربرد GA در بهینه نمودن پارامترهای کنترل کننده PID نادیده گرفته شده است مخصوصاً به عنوان یک روش ثانوی برای سیستم هایی که به غیر از این روش تنظیم سازی آنها مشکل است. در پایان این مقاله بر بهینه سازی شاخص های رفتاری چند سیستم توسط قوانین موجود تنظیم سازی متمرکز شده است و سپس نتیجه بدست آمده از آن با کنترل گر مشابهی که پارامترهای آن توسط اعمال الگوریتم ژنتیک بدست آمده است، مقایسه می شود. نتیجه مقایسه نشان می دهد که مهندسين کنترل مدرن که می خواهند طراحی خوبی انجام دهند باید GA را در متدهای طراحی خود وارد کنند.

2- تعریف الگوریتم ژنتیک:

الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط جان هلند [5] در طول سالهای 1960 تا 1970 توسعه داده شد. مبداء تحقیق بر روی این روش بر اساس تقلید از پدیده های طبیعی وراثت ژنتیکی و ایده تکاملی داروین می باشد. بر اساس ایده تکامل داروین افراد یک جمعیت به سمت تطابق بیشتر با محیط اطراف خود تکامل می یابند. افرادی که بهتر بتوانند خود را با محیط اطراف خود سازگار کنند، شانس بیشتری برای ادامه حیات خواهند داشت. اطلاعات هر نسل توسط کروموزومها به نسل بعد منتقل می شود. کروموزومها رشته های DNA هستند که به واقع مدلی از یک ارگانیسم طبیعی هستند. هر کروموزوم متشکل از ژنهاست. هر ژن بیانگر یک رفتار یا خصوصیت شخص است. در عمل تولید مثل ($reproduction$)، کروموزومهای والدین به نحوی با یکدیگر ترکیب شده و کروموزومهای فرزند را ایجاد می کنند ($Crossover$). ممکن است کروموزوم فرزند دچار جهش ($mutation$) شود. جهش به معنی تغییر اندکی در رشته DNA می باشد که عمدتاً بر اثر کپی اشتباه ژنها از والدین

کنترل کننده معادله 1 را به ما میدهد .

$$ITAE = \int_0^T t \cdot |r(t) - y(t)| dt \quad (2)$$

$$IAE = \int_0^T |r(t) - y(t)| dt$$

$$ISE = \int_0^T [r(t) - y(t)]^2 dt$$

که در آن $r(t)$ سیگنال ورودی و $y(t)$ سیگنال خروجی است .

همچنین برای پیک فراجش و خطای کل به فرم معادلات 3 و 4 تعریف می شود .

$$P_{OS} = \max |y(t) - y_{ss}| \quad (3)$$

$$E_{TOTAL} = \int_0^t J_{DO} dt \quad (4)$$

در این مقاله شاخص های رفتاری با اعمال روش موجود تنظیم سازی و همچنین الگوریتم ژنتیک بهینه می شود و نتایج آنها با هم مقایسه می شود .

4- شبیه سازی الگوریتم ژنتیک :

همانطوری که در مقدمه اشاره شد یکی از اهداف این مقاله نشان دادن فواید GA برای طراحی کنترل کننده های PID به وسیله مقایسه کردن آن با یک روش متداول موجود است . چون قوانین تنظیم سازی که مقادیر شاخص های رفتاری (معادله 2) را کمینه می کنند محدود به نوع سیستم می باشد ، سیستم مرتبه اول با تاخیر زمانی $^{1}FOLPD$ زیر برای شروع ارزیابی انتخاب می شود .

$$G_p(s) = \frac{e^{-t_m \cdot s}}{s+1} \quad (5)$$

با $t_m = 0.2 \text{ sec}$.

اینرو همگرایی GA را به بهترین نسل گارانتی می کند .

نسل (*generation*) : با استفاده از افراد انتخاب شده در بالا ، نسل بعدی به وسیله فرآیند *Crossover* و جهش ، تولید می شود . در این مقاله جهش با احتمال خیلی پائین 0.01 در هر بیت اعمال می شود . تولید نسل از میان افراد بدست آمده از طریق *Crossover* و جهش ، عدم از دست دادن ژنی در جمعیت را ، به وسیله توانایی تولید هر ژنی که ممکن است در آغاز نبوده یا بعداً گم شده باشد را کاملاً تضمین می کند . در زیر یک مثال از *Crossover* نشان داده شده است .

• Single-Point Crossover

Chromosome1	11011	00100110110
Chromosome2	11011	11000011110
Offspring 1	1101111000011110	
Offspring 2	1101100100110110	

انواع دیگر *Crossover* به شرح زیر است :

- Partially-mapped crossover (PMX)
- Position Based Crossover(PX)
- Order crossover (OX)
- Cycle crossover (CX)

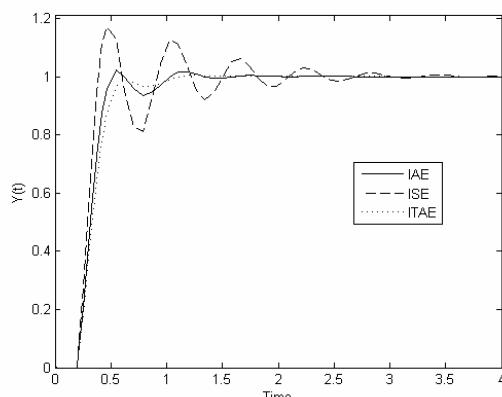
تکرار (*Repeat*) : این ترتیب آنقدر تکرار می شود تا الگوریتم به یک نقطه همگرا بشود .

3- طراحی کنترل کننده PID :

به خاطر گوناگونی اساسی در قوانین کنترل کننده های PID ضروری است که حداقل تعریف را از نوع کنترل کننده PID داشته باشیم . کنترل کننده PID فرض شده در این مقاله به فرم کتاب های درسی و به صورت زیر است :

$$G_c(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \quad (1)$$

با تبدیل مناسب پارامترها ، این فرم می تواند به فرم متقابل دیگری تبدیل شود در حالی که عکس این مطلب همواره صحیح نیست . البته تجربه نشان داده است که ساختار بالا از دیگر روابط بدست آمده از این ساختار مناسبتر است . کمینه کردن یکی از شاخص های رفتاری زیر پارامترهای



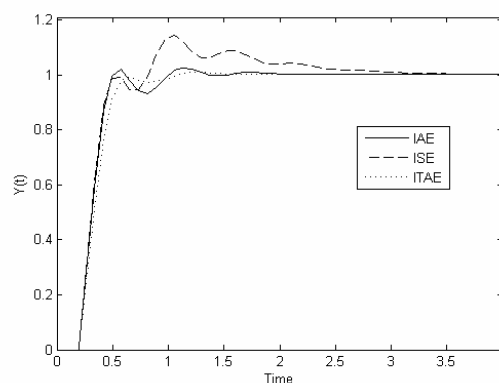
شکل 2: پاسخ پله FOLPD با الگوریتم ژنتیک

در حالی که مدل FOLPD برای بسیاری از پروسه های صنعتی کافی است ولی مثال های زیادی هم وجود دارد که مدل فرض شده بالا برای آنها مناسب نیست. در این نوع موارد مدل های مرتبه بالاتر، بطور نمونه سیستم مرتبه دوم با تاخیر زمانی¹ (SOSPD) مورد نیاز است تنظیم سازی این نوع سیستم ها بسیار دشوار است نه صرفاً به خاطر پویایی زیاد آنها بلکه به خاطر کم شدن قوانین مناسب تنظیم سازی برای آنهاست. یک نمونه قانون برای مینیمم کردن IAE پاسخ پله برای کنترل کننده PI سیستم های SOSPD توسط Shinsky [13] ارائه شده است. قوانین مشابه برای ISE و ITAE کاملاً آشکار و در جلوی چشم است البته بخاطر فقدان آنها! یک دلیل ساده این است که مدل های مرتبه دوم و بالاتر آنقدر دشوار هستند که نتوان برای آنها به یک قانون کلی رسید. بطوریکه بسیاری از عملیات تنظیم سازی توسط شبیه سازی با کامپیوتر های بزرگ بدست می آید. طبق توضیحات بالا حالتی که استفاده از GA را سودمند می کند، حالتی است که قوانین تنظیم سازی وجود نداشته باشد یا نتوان به سهولت قوانین مربوطه را مشخص نمود. هر چند دلیل دیگری که روش GA را روش برتری می کند اختلاف عمده بین مقادیر بدست آمده توسط قوانین موجود و روش GA می باشد که مشخص می شود قوانین موجود در مقایسه با روش GA دقت پائینی در تنظیم سازی سیستم های SOSPD نسبت به FOLPD دارند. برای

هدف طراحی، رسیدن به مقدار مینیمم در شاخص های رفتاری (ITAE و IAE و ISE) می باشد با فرض اینکه ورودی پله باشد که با روش GA و قوانین موجود تنظیم سازی بدست می آید. با وجود قوانین بسیار در این زمینه - برای یک خلاصه ای مفید از این قوانین [10] O'Dwyer را ببینید - در اینجا قوانین برای شاخص رفتاری ISE توسط Shinsky [7] و Atherton و Zhuang و برای IAE توسط [6] و برای ITAE توسط [9] Murrill ارائه شده است که با تکنیک GA مقایسه شده است. برای هر دو مورد ضریب کنترل کننده ها به همراه خطای کل و مقدار پیک فراجش (Overshoot) در جدول 1 لیست شده است.

جدول (1): پاسخ پله FOLPD

قوانین تنظیم	شاخص رفتاری	K_p	K_i	K_d	E_T	P_{OS}
سازی متداول	IAE	4.40	3.14	0.35	0.35	0.05
	ISE	4.44	4.98	0.52	0.30	0.11
	ITAE	3.79	2.91	0.26	0.07	3.8e-3
GA	IAE	4.27	3.04	0.34	0.35	0.03
	ISE	5.59	3.62	0.50	0.28	0.18
	ITAE	3.77	2.87	0.27	0.07	3.7e-4



شکل 1: پاسخ پله FOLPD توسط قوانین موجود

پیرو مثال بالا مشاهده می شود که استفاده از الگوریتم ژنتیک - که شبیه سازی آن باید با یک کامپیوتر حرفه ای صورت بگیرد - مزیت زیادی برای بهینه سازی کنترل کننده های PID برای FOLPD ندارد چون در این زمینه قوانین ساده و با دقت بالایی وجود دارد و نتیجه نشان داده شده در جدول نیز اختلاف زیادی را بین دو روش نشان نمی دهد.

¹ second-order system plus delay

سیستم به کار برد با مقایسه با قوانین متداول موجود که :

الف (تنها متعلق به گروه خاصی از مدل های سیستمی هستند .

ب (احتمال دارد که به یک اکستریم محلی همگرا شوند .

ج (ممکن است محدودیت هایی در کاربرد این قوانین اعمال شود .

مفهوم آخرین قسمت این است که قوانین در برخی از موارد ناموفق می مانند به طور نمونه هنگامی که به یک سیستم با تاخیر زمانی اعمال شود . به علاوه حتی هنگامی که این قوانین برای یک سیستم بسیار فراوان هستند باز ممکن است که ناموفق باشند . استفاده از GA لزوم نگه داری از یک دیتابیس (database) قوانین را که ممکن است همیشه هم مورد استفاده قرار نگیرند را برطرف کرده و در اولین قدم مشکل پیدا کردن یک قانون مرتبط با سیستم مورد نظر را حل کرده است . همچنین اینکه پیچیدگی اعمال GA به وسیله ترکیب آن با برنامه مطلب و قابلیت استفاده از سورس کدها وجعبه ابزارهای [2] تخصص یافته مربوط به آن ، شدیداً کاهش یافته است . مزیت های بیان شده در بالا ، همگرایی سریع آن به جواب ، نیاز آن به پردازش نسبتاً کم و شاید هم نداشتن احتیاج به دانستن اطلاعات زیاد برای بکار بردن این روش ، دلیل افزایش روزافزون استفاده از این روش برای کنترل کننده ها باشد . به هر حال توصیه می شود همه مهندسين کنترل روش GA را به عنوان یک کمک ارزشمند برای بهینه سازی پارامترها در جعبه ترفندهای خود جای دهند .

مراجع :

- [1] Chipperfield, A.J., P.J. Flemming, & C.M. Fonscea, 'Genetic algorithms for control system engineering', *Proc. Adapt. Comp. in Eng. Design and Control*, September 1994, pp. 128-133
- [2] Chipperfield, A.J., P.J. Flemming, A. Polheim, & C.M. Fonscea, *Genetic Algorithm Toolbox Version 1.2*, University of Sheffield, 1995
- [3] Davis, L., *A Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1990

اثبات گفته بالا سیستم زیر فرض می شود .

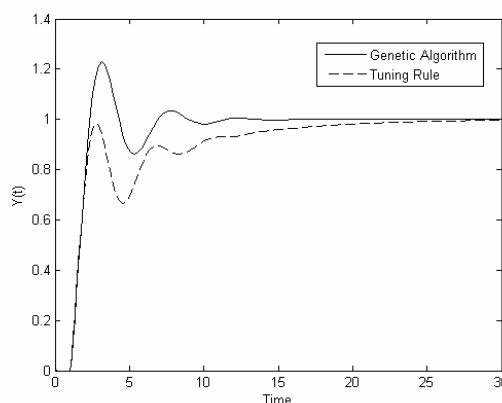
$$G_{so}(s) = \frac{e^{-t_m \cdot s}}{(s+1)(0.1s+1)} \quad (6)$$

با $t_m = 1 \text{ Sec}$.

کنترل کننده PI طراحی شده از قانون ارائه شده توسط Shinskey [13] استفاده کرده است تا شاخص رفتاری IAE پاسخ پله سیستم بالا را مینیمم کند . مقدار پارامترهای کنترل کننده PI در جدول 2 آمده است و پاسخ بدست آمده در شکل 1 نشان داده شده است . با دقت در جدول 2 و شکل 1 مشاهده می شود که مقدار صحیح تنظیم سازی توسط الگوریتم ژنتیک بدست آمده است .

جدول 2 : پاسخ پله برای SOSPD با بهینه سازی IAE

قوانین تنظیم سازی	الگوریتم ژنتیک	
K_p	0.97	1.10
K_i	0.63	0.29
E_{TOTAL}	1.69	3.28
P_{OS}	0.22	0.18



شکل 3 : کمینه کردن IAE برای پاسخ پله SOSPD

5- نتیجه گیری :

در این مقاله یک روش برای اصلاح پارامترهای کنترل کننده های PID و PI به وسیله الگوریتم ژنتیک و مزیت های اصلی آن به عنوان یک روش مورد بررسی قرار گرفت . به طور اساسی واضح است که روش GA مستقل از مدل سیستم است و در نتیجه می توان برای بدست آوردن یک رفتار با ثبات (بهینه) برای گونه های گستردهای از مدل های

- [9] Murrill, P.W., *Automatic Control of Processes*, International Textbook Co., 1967
- [10] O'Dwyer, A., 'PI and PID controller tuning rules for time-delayed processes: a summary. Parts I and II', *Proc. of the Irish Signals and Systems Conference, 1999*, NUI Galway, 1999, pp. 331-346
- [11] Schaffer, J.D., D. Whitley & L.J. Eshelman, 'Combinations of genetic algorithms and neural networks: a survey of the state of the art', *Proceedings of international workshop on Combination of GA and NN*, Baltimore, MD, USA, 1992, pp. 1-37
- [4] Ender, D.B., 'Process control performance: not as good as you think', *Control Engineering*, September, 1993, pp. 180-190
- [5] J.Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [6] Zhuang, M. and D.P. Atherton, 'Automatic tuning of optimum PID controllers', *IEE Proceedings - Part D*, Vol. 140, no. 3, 1993, pp 216-224
- [7] Shinskey, F.G., *Process Control Systems - Application, Design and Tuning*, McGraw-Hill Inc., NY, 3rd Ed., 1988
- [8] Linkens, D.A., & H.O. Nyongesa, 'Genetic algorithms for fuzzy control', *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 142, No. 3, pp. 161-185