

بهینه سازی کنترلر Fuzzy PID برای سیستم کنترل سرعت موتور DC با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

کد مقاله: ۷۲۵۴۹

احسان خاکی*، محمد رضا خوگر^۲

چکیده

از میان انواع موتورهای DC، سری، شنت و تحریک جداگانه، موتور تحریک جداگانه بیشترین مورد استفاده را دارد. در واقع در کاربردهایی که تنظیم خوب و کنترل وسیع سرعت نیاز است، از موتورهای تحریک جداگانه استفاده شود. کنترل کننده PID فقط تحت مجموعه ای از شرایط خاص و معلوم از ویژگی بار موتو و پارامترهای سیستم می تواند عملکرد خوبی داشته باشد و تغییر پارامترهای سیستم و شرایط بار از مقادیر شناخته شده باعث می شود که کارایی سیستم حلقه بسته پایین آمده و در نتیجه موجب فرآجهش زیاد، زمان صعود و نشست بزرگتر و حتی ناپایداری سیستم گردد. هدف از انجام این تحقیق بهینه سازی کنترلر Fuzzy PID برای سیستم کنترل سرعت موتور DC با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری می باشد. در این تحقیق به روش جدیدی برای کنترل سیستم کنترل سرعت موتور DC با استفاده از ترکیب الگوریتم پردازش شده است. در این روش از کنترل کننده Fuzzy-PID استفاده شده است به طوری که برای این کنترل کننده ۱۵ پارامتر قرار داده ایم و برای تعیین آن ها از روش بهینه سازی الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری- ژنتیک استفاده نمودیم. دلیل ترکیب این دو الگوریتم قدرت و سرعت بالای الگوریتم رقابت استعماری و استفاده از اپراتورهای الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن جواب های بهتر است. تابع هزینه به کارگرفته شده مبتنی بر حداقل سازی انتگرال قدر مطلق انحراف خطا (IAE) به ازای ورودی های مختلف می باشد. نتایج تحقیق نشان می دهد که نتایج شبیه سازی نشان دهنده دقت بالای روش ارائه شده در دنبال کردن سرعت موتور می باشد. همچنین کنترل کننده ی پیشنهادی به جهت سادگی در ساختار و دقت بالا در کارایی می تواند در صنعت خود رو به منظور کنترل سرعت مورد استفاده قرار بگیرد.

واژگان کلیدی: کنترلر Fuzzy pid، کنترل سرعت موتور، الگوریتم ژنتیک، رقابت استعماری

۱- کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، رشته برق، گرایش کنترل

ekhaki45@gmail.com

۲- استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

khoogar@yahoo.com

موتورهای DC از اولین موتورهای الکتریکی در صنعت بوده اند و بواسطه داشتن خصوصیات عالی مانند گشتاور راه اندازی بالا، سهولت کنترل آن ها، در توان های چند وات تا چندین هزار کیلو وات، با محدوده وسیع ولتاژ و در سرعت های نامی مختلف شناخته شده اند. موتورهای DC با وجود داشتن هزینه تعمیر و نگهداری بالاتر نسبت به موتورهای القایی به علت ویژگی های عالی کنترلی، بیشتر مورد توجه قرار گرفته و در صنایع و کاربردهای مختلف مانند روباتیک، غلتک های صنایع کاغذ، غلتک های صنایع نساجی، کارخانجات نورد، کارخانجات ذوب آهن، ماشین های ابزار کششی نظیر لوکوموتیوها، به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. (Pedregal, 2016) از میان انواع موتورهای DC، سری، شنت و تحریک جداگانه، موتور تحریک جداگانه بیشترین مورد استفاده را دارد. در واقع در کاربردهایی که تنظیم خوب و کنترل وسیع سرعت نیاز است، از موتورهای تحریک جداگانه استفاده شود. کنترل کننده PID فقط تحت مجموعه ای از شرایط خاص و معلوم از ویژگی بار موتو و پارامترهای سیستم می تواند عملکرد خوبی داشته باشد و تغییر پارامترهای سیستم و شرایط بار از مقادیر شناخته شده باعث می شود که کارایی سیستم حلقه بسته پایین آمده و در نتیجه موجب فراجهدش زیاد، زمان صعود و نشست بزرگتر و حتی ناپایداری سیستم گردد. ضعف اصلی کنترل کننده PI، خطای حالت ماندگار زیاد آن است. محبوبترین کنترل کننده مورد استفاده در فرآیندهای صنعتی، کنترلر تناسبی انتگرالی مشتقی (PID) می باشد. نقطه ضعف این نوع از کنترلرها جهت توضیح، درک و پیاده سازی در آمده است. کنترل کننده PID از دهه ی ۱۵۹۱ تاکنون، شناخته شده ترین و پرکاربردترین مکانیزم فیدبک می باشد و به علت ساختار بسیار ساده و عملکرد موثر آن در گستره وسیعی از فرآیندهای صنایع مورد استفاده قرار می گیرد. چپون (۲۰۱۵) در تحقیقی بیان داشت که یک کنترلر طراحی شده بهینه از کنترلر سرعت موتور Brushless DC به وسیله ی الگوریتم ژنتیکی (GA) پارامترهای (PID) را بهینه یابی می کند. بهینه یابی مورد استفاده در این مقاله از سه نوع طراحی برای موتور DC استفاده می کند. آزمایش و طراحی خطای PID، طراحی تنظیم خودکار PID و طراحی کنترلر مبتنی بر الگوریتم ژنتیک. یک کنترل کننده ی PID با استفاده از معیار خطای مطلق انتگرال (IAE) و معیار خطای مربعات انتگرال (ISE) برای سیستم کنترل موتور BLDC استفاده می کند. در این مقاله یک کنترلر GA-PID جهت بهبود عملکرد سیستم با استفاده از طراحی الگوریتم ژنتیک طراحی شده است ضرایب کنترل کننده PID (K_p, K_i, K_d)، توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه می شود. پاسخ سرعت حلق بسته کنترل کننده PID برای معیارهای خطای IAE و ISE آزمایش شده است. نتایج نشان داد که عملکرد زمان کنترلر GA-PID بر اساس معیار ISE، دارای عملکرد بهینه (زمان ستلینگ و درصد اور شوت) نسب به تکنیک های دیگر از نتایج بهتری برخوردار است. (Premkumar, 2015) کار اصلی یک سیستم فازی تبدیل دانش و آگاهی یک فرد خبره در مورد سیستم تحت کنترل به صورت فرمول های ریاضی می باشد. این ویژگی مهم که توان سیستم های پیچیده و مبهم را ظاهر ریاضی بخشید و استدلال و استنتاج و کنترل نمود، سبب گسترش روز افزون این علم در جهان چه از نظر تئوری و چه از نظر کاربردی گردید. چنانکه در سال ۱۹۷۵ Mamdani و Asilian چهارچوب اولیه ای را برای کنترل کننده فازی مشخص کردند و اولین کنترل کننده فازی را به یک موتور بخار اعمال نمودند. از آن زمان تا کنون سیستم های فازی در طیف وسیعی از علوم و فنون مانند کنترل، پردازش سیگنال ارتباطات، ساخت مدارات مجتمع، بازرگانی، پزشکی و ... بکار رفته است. موتورهای DC در حیطه صنعت کنترل برای مدت طولانی محبوب بوده اند، زیرا آن ها ویژگی های خوبی مانند مشخصه گشتاور راه اندازی بالا، پاسخ دهی سریع کنترل خطی راحت تر و غیره دارند. (Cheon, 2015) دستگاه های کنترل جانبی آنها دارای تنوع زیادی می باشند، زیرا موتورهای DC کاربرد بسیار گسترده ای در صنعت دارند. از این رو کنترلر موتور DC از انواع دیگر موتورها جا افتاده تر می باشد. انواع مختلفی از کنترلرها در موتورهای DC مانند کنترل کننده های PI و PID استفاده شده اند. ضعف اصلی کنترل کننده PI، خطای حالت ماندگار زیاد آن است. محبوبترین کنترل کننده مورد استفاده در فرآیندهای صنعتی، کنترلر تناسبی انتگرالی مشتقی (PID) می باشد. در گذشته راه حل متداول در طراحی چنین کنترلرهایی روش سعی و خطا بوده که این کار مستلزم صرف زمان و هزینه بسیار بالایی می باشد. در دهه های گذشته دستورالعمل های مختلفی برای ارائه روشی منظم به منظور کاهش زمان صرف زمان و هزینه بسیار بالایی می باشد. (Venkateswarlu, 2014) در دهه های گذشته دستورالعمل های مختلفی برای ارائه روشی منظم به منظور کاهش زمان صرف شده در انتخاب بهینه پارامترهای کنترل بوجود آمده است. با توجه به دلایل ذکر شده، بسیاری از تکنیک های هوش مصنوعی به منظور بهبود کارایی کنترلرها در گستره وسیعی از فرآیندها بکار گرفته شده اند که از جمله آن ها می توان به شبکه های عصبی، سیستم فازی و منطق عصبی فازی اشاره نمود. (Sunisith, 2014) همچنین به منظور کاهش پیچیدگی پارامترهای کنترلر بسیاری از روش های جستجوی تصادفی مانند الگوریتم ژنتیک (GA)، سرمایشی تدریجی (SA)، الگوریتم کلونی مورچه ها (ACO) و غیره توسعه یافته اند. با این وجود دلایل بسیاری برای توسعه روش های بهتر طراحی وجود دارد که از جمله می توان به بالا بردن کارایی و سرعت تنظیم پارامترهای کنترلر اشاره نمود که توسط روش های طراحی

بهبودیافته، حاصل می شوند. بدین منظور تحقیق حاضر به دنبال بهینه سازی کنترلر Fuzzy PID برای سیستم کنترل سرعت موتور DC با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری بود.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق به روش جدیدی برای کنترل سیستم کنترل سرعت موتور DC پرداخته شده است. در این روش از کنترل کننده Fuzzy-PID استفاده شده است به طوری که برای این کنترل کننده ۱۵ پارامتر قرار داده ایم و برای تعیین آن ها از روش بهینه سازی الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری- ژنتیک استفاده نمودیم. دلیل ترکیب این دو الگوریتم قدرت و سرعت بالای الگوریتم رقابت استعماری و استفاده از اپراتورهای الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن جواب های بهتر است. تابع هزینه به کارگرفته شده مبتنی بر حداقل سازی انتگرال قدر مطلق انحراف خطا (IAE) به ازای ورودی های مختلف می باشد.

۳- مبانی نظری تحقیق

موتور کلاسیک DC دارای آرمیچری از آهنربای الکتریکی است. یک سویچ گردشی به نام کموتاتور جهت جریان الکتریکی را در هر سیکل دو بار برعکس می کند تا در آرمیچر جریان یابد و آهنرباهای الکتریکی، آهنربای دائمی را در بیرون موتور جذب و دفع کنند. (Premkumar, 2014) سرعت موتور DC به مجموعه ای از ولتاژ و جریان عبوری از سیم پیچ های موتور و بار موتور یا گشتاور ترمزی، بستگی دارد. سرعت موتور جریان مستقیم وابسته به ولتاژ و گشتاور آن وابسته به جریان است. معمولاً سرعت توسط ولتاژ متغیر یا عبور جریان و با استفاده از تپ ها (نوعی کلید تغییر دهنده وضعیت سیم پیچ در سیم پیچی موتور یا با داشتن یک منبع ولتاژ متغیر، کنترل می شود. به دلیل اینکه این نوع از موتور می تواند در سرعت های پایین گشتاوری زیاد ایجاد کند معمولاً از آن در کاربردهای کششی نظیر لوکوموتیوها استفاده می کنند. (Naranjani, 2013) یک سیستم کنترلی آبخاری شامل دو حلقه فیدبک است که برای کنترل سرعت موتور DC استفاده می شود و عملکرد سیستم را نسبت به سیستم کنترلی تک حلقه ارتقا می بخشد. حلقه کنترلی داخلی برای کاهش پارازیت های روی حلقه دوم استفاده می شود در حالی که حلقه خارجی برای کاهش حساسیت متغیرهای مرحله اول نسبت به نوسانات بهره استفاده می شود. کنترل کننده سرعت به گونه ای طراحی می شود که خروجی آن سیگنال مطلوب (مرجع) برای کنترل کننده جریان باشد. کنترل کننده سرعت در بلوک دیاگرام فوق حساسیت ها را نسبت به نوسانات بهره کاهش می دهد. (Pramonohadi, 2013) حلقه داخلی در بلوک دیاگرام کنترل آبخاری، کنترل کننده جریان می باشد. خطای محاسبه شده جریان مطلوب (مرجع) که از کنترل کننده سرعت گرفته می شود و جریان واقعی که از موتور گرفته می شود و ورودی این کنترل کننده می باشد. این کنترل کننده برای بهتر کردن پاسخ گذاری سیستم و محدود کردن جریان موتور استفاده می شود. خروجی کنترل کننده جریان به یک مدوله کننده پهنای پالس PWM داده می شود که ولتاژ ترمینال خروجی را کنترل می کند. یک ساختار شبکه ای که تعدادی گره را به وسیله تعدادی لینک به هم مربوط می سازد یک شبکه تطبیقی را تعریف می کند. (Taşçı, 2013) گره ها در واقع واحدهای پردازش را بیان می کنند و لینک ها در واقع اتصال بین آن واحدهای پردازشی را بیان می کند. همه گره ها یا حداقل قسمتی از آن ها منطبق بر طبیعت هستند یعنی خروجی سیستم از روی پارامترهای گره ساخته می شود. قواعد یادگیری به گونه ای ساخته می شوند که خطای سیستم را کم کنند و پارامترهای گره را آن گونه که باید باشند اصلاح کند. (Shi-da, 2012) اصولاً کنترلر وظیفه مقایسه مقدار واقعی پروسه با مقدار مطلوب یا نقطه تنظیم و همچنین صدور فرمان برای عملگر جهت انجام این تنظیم را دارد. برای مثال در کنترلرهای ساده نظیر ترموستات که سنسور که وظیفه اندازه گیری دما را دارد معمولاً از یک بیتمال تشکیل شده است. بیتمال برای حفاظت از موتورهای الکتریکی در مقابل اضافه بار از رله های حرارتی استفاده می شود. اساس کار این رله ها بر پایه اختلاف ضریب انبساط طولی دو فلز به کار رفته است. بر اثر عبور جریان از بی تمال دو فلز گرم می شوند و طول آن ها افزایش می یابد. (Coelho, 2012) از آن جایی که ضریب انبساط طولی یکی از فلزات بیشتر از دیگری است. دو فلز با هم به سمت فلزی که ضریب انبساط طولی کمتری دارد خم می شود. در نتیجه مسیر عبور جریان کنتاکت ها باز و مدار قطع می شود. در حقیقت بیتمال با توجه به کم یا زیاد شدن دما به یک طرف متمایل شده با تنظیم مناسب جهت دمای مطلوب خروجی کنترلر که همان فرمان خاموش یا روشن کردن منبع حرارتی است صادر می شود. (Abdechiri, 2010) اما در یک کنترلر PID با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر نسبت تغییرات نقطه تنظیم با مقدار فعلی پروسه با فاکتورهایی نظیر شدت تغییرات ناگهانی و میزان تغییرات نسبت به زمان می تواند کنترلی پیشرفته خصوصاً در پروسه های دمایی که استفاده از کنترلرهای ساده باعث ایجاد نوسان دائمی دما می شود را ایجاد کند. در کنترلر PID از الگوریتم نسبی مشتقی و انتگرالی بهره می برند همان گونه که نام آن از P مخفف Proportional یا نسبی و فاکتور I مخفف Integral یا انتگرالی و فاکتور D مخفف Derivative یا مشتقی گرفته شده است و در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC کنترل فشار، کنترل دما و ... کاربرد دارد. (Bahrami, 2010) کنترل کننده ها نقش حیاتی را در کنترل سرعت

موتور DC به میزان دلخواه بازی می‌کنند. الگوریتم‌های تکامل‌پذیر روش‌های بر مبنای جستجوی تصادفی‌اند که از مدل‌سازی تکامل بیولوژیکی طبیعی الگوبرداری شده‌اند. آن‌ها بر روی پاسخ‌های ممکن کار می‌کنند که از ویژگی برتری برخوردار و نیز بقای نسل بیشتری دارند، لذا تخمین نزدیک‌تری از پاسخ بهینه به دست می‌دهند. در هر نسل دسته جدیدی از تخمین‌ها بر مبنای انتخاب اعضای با میزان برازندگی (شایستگی) بیشتر تولید شده و آن‌ها مشابه آنچه در طبیعت رخ می‌دهد با هم تلفیق می‌شوند. (Abdechiri, 2010) این روند نتیجتاً تکامل افرادی را شامل می‌شود که نسبت به والدینشان در محیط سازگارترند دقیقاً مشابه آنچه در مطابقت با طبیعت است. الگوریتم‌های تکامل‌پذیر بر روی جمعیت‌هایی از افراد به جای یک تک پاسخ کار می‌کنند از این رو جستجو به صورت موازی می‌تواند صورت گیرد.

۴- یافته‌ها

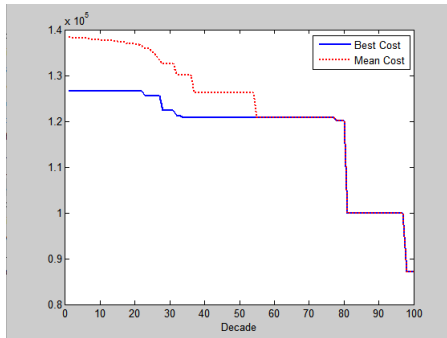
به منظور تنظیم پارامترها به صورت بهینه در کنترلر Fuzzy-PID با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (ICA-GA)، برای عملکرد مطلوب کنترل سرعت موتور DC بهینه می‌گردد. به ترتیب جدول ۱ و جدول ۲ مقادیر تنظیم شده برای پارامترهای الگوریتم ICA و الگوریتم پیشنهادی مشخص شده‌اند. این مقادیر به صورت تجربه و در طی اجرای چندین باره ی الگوریتم‌ها بدست آمده‌اند.

جدول ۱. پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم ICA

nPop	50	اندازه جمعیت
nImp	20	تعداد امپراتوری‌ها
nCol	nPop-nImp	تعداد کشورهای مستعمره
MaxDecades	100	تعداد تکرارهای الگوریتم
Beta	0.8	ضریب بتا
pRevolution	0.1	احتمال انقلاب
Zeta	0.1	ضریب زیتا

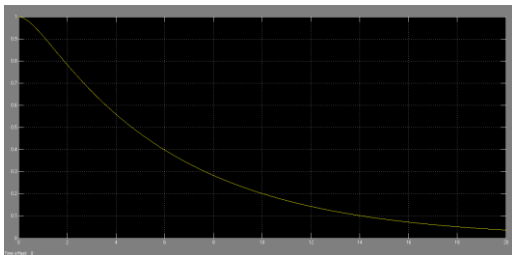
جدول ۲. مقدار پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم ICA-GA

MaxIt	20	تکرار الگوریتم ترکیبی ماکسیمم تعداد
nImp	10	تعداد امپراتوری‌ها
MaxSubItGA	1	تعداد تکرار زیر الگوریتم ژنتیک
nPop	20	تعداد کشورها
pCrossover	0.7	نرخ تزویج
nCrossover	$\text{round}(pCrossover * nImp / 2) * 2$	تعداد والدین
pMutation	0.2	نرخ جهش
nMutation	1	تعداد جهش‌ها
nCol	nPop-nImp	تعداد کشورهای مستعمره
MaxDecades	2	تعداد تکرارهای زیر الگوریتم رقابت استعماری
beta	0.8	ضریب بتا
pRevolution	0.1	احتمال انقلاب
zeta	0.1	ضریب زیتا

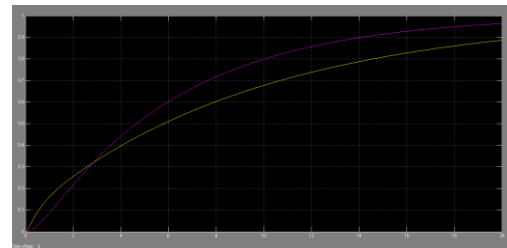


نمودار ۱. نمودار مقادیر بدست آمده از تابع هزینه به ازای هربار تکرار الگوریتم ICA

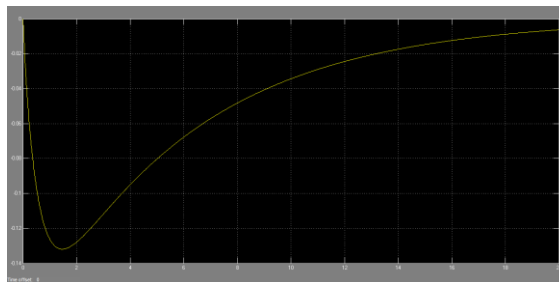
نتایج نمودار ۱ نشان می دهد که محور عمودی نشان دهنده مقدار هزینه ی بدست آمده توسط الگوریتم ICA میباشد و محور افقی نشان دهنده تعداد تکرارهای الگوریتم است. همان طور که مشاهده میشود تعداد تکرار های الگوریتم رقابت استعماری ۱۰۰ است و به طور کلی نمودار نزولی Best Cost، بهترین هزینه های پیدا شده برای سیستم Fuzzy-PID و نمودار Mean Cost نشان دهنده ی میانگین هزینه های پیدا شده میباشد و همان طور که مشاهده می شود طی اجرای الگوریتم هزینه یافته شده کمتر و در نتیجه عملکرد سیستم بهبود میابد که بهترین مقدار یافته شده توسط این الگوریتم ۱,۲۴۶ می باشد.



نمودار ۳. نمودار سرعت خطا (Speed Error) در روش Fuzzy-PID بهبود یافته توسط الگوریتم ICA



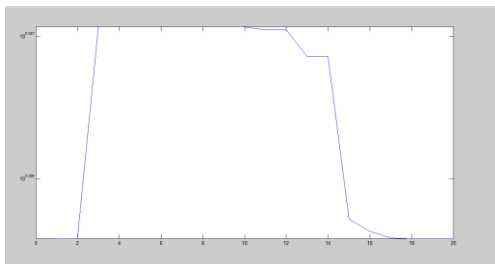
نمودار ۲. نمودار مقایسه ی کنترل سرعت توسط PID و Fuzzy-PID بهبود یافته توسط الگوریتم ICA



نمودار ۴. نمودار نرخ تغییر سرعت خطا (Rate of Change of Speed Error) در روش Fuzzy-PID بهبود یافته توسط الگوریتم ICA

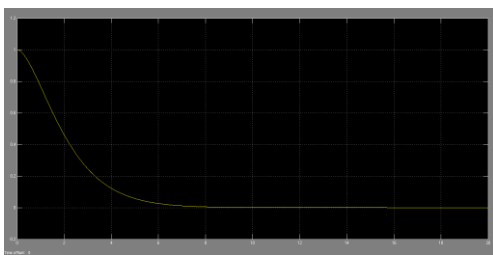
جدول ۳. مقادیر پیدا شده توسط الگوریتم رقابت استعماری که منجر به یافتن بهترین جواب ها

۲,۹۷۱۷	۲,۲۰۳۷	۲,۳۵۴۳۷	۲,۷۹۹۳	۲,۴۴۷۳	معادل عددی بهترین قوانین
			۱۰۸,۷۰۸۹-60 NS	۱۰۸,۷۰۸۹ PS	نقاط بهینه برای تابع عضویت خطا
			1.6294 NS	۶۱,۶۲۹۴PS	نقاط بهینه برای توابع عضویت مشتق خطا
	۷۰,۸۵۵۶- 20	۷۰,۸۵۵۶	۴,۹۵۱۶-10	۴,۹۵۱۶	نقاط بهینه برای توابع عضویت خروجی KP
	۷,۲۲۶۵-40	۷,۲۲۶۵	۲۰,۷۴۴۳-20	۲۰,۷۴۴۳	نقاط بهینه برای توابع عضویت خروجی KI
	۶,۹۲۵۴-4	۶,۹۲۵۴	۴۳,۰۸۶۵-2	۴۳,۰۸۶۵	نقاط بهینه برای توابع عضویت خروجی KD
			۰,۰۵۱۳ K2	۰,۷۹۷۳ k1	K1 و K2 مقادیر بهینه برای بهره های

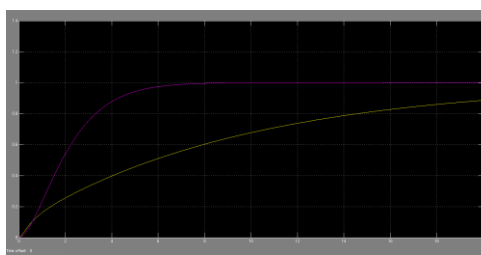


نمودار ۵. نمودار مقادیر بدست آمده از تابع هزینه به ازای هربار تکرار الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

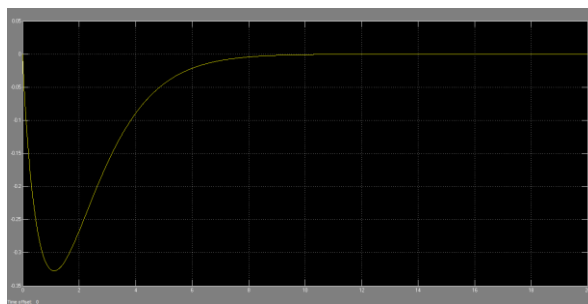
نتایج نمودار ۵ نشان می‌دهد که محور عمودی نشان‌دهنده‌ی مقدار هزینه‌ی بدست آمده توسط روش Fuzzy PID بهبود یافته توسط الگوریتم ترکیبی ICA-GA می‌باشد. و به طور افقی نشان‌دهنده‌ی تعداد تکرارهای الگوریتم است. و به طور کلی نمودار نزولی Beat Cost، بهترین هزینه‌های پیدا شده برای بهترین PID بدست آمده است و نمودار Mean Cost نشان‌دهنده‌ی میانگین هزینه‌های پیدا شده می‌باشد و همانطور که مشاهده می‌شود.



نمودار ۷. نمودار سرعت خطا (Speed Error) در روش الگوریتم ترکیبی پیشنهادی



نمودار ۶. نمودار مقایسه‌ی کنترل سرعت توسط PID و Fuzzy-PID بهبود یافته توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی



نمودار ۸. نمودار نرخ تغییر سرعت خطا (Rate of Change of Speed Error) در روش الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

جدول ۴. مقادیر پیدا شده توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی که منجر به یافتن بهترین جواب‌ها

۲,۹۷۱۷	۲,۲۰۳۷	۲,۳۵۴۳۷	۲,۷۹۹۳	۲,۴۴۷۳	معادل عددی بهترین قوانین
			۱۰۸,۷۰۸۹-60 NS	۱۰۸,۷۰۸۹ PS	نقاط بهینه برای تابع عضویت خطا
			1.6294 NS	۶۱,۶۲۹۴PS	نقاط بهینه برای توابع عضویت مشتق خطا
	۷۰,۸۵۵۶- 20	۷۰,۸۵۵۶	۴,۹۵۱۶-10	۴,۹۵۱۶	نقاط بهینه برای توابع عضویت خروجی KP
	۷,۲۲۶۵-40	۷,۲۲۶۵	۲۰,۷۴۴۳-20	۲۰,۷۴۴۳	نقاط بهینه برای توابع عضویت خروجی KI
	۶,۹۲۵۴-4	۶,۹۲۵۴	۴۳,۰۸۶۵-2	۴۳,۰۸۶۵	نقاط بهینه برای توابع عضویت خروجی KD
			۰,۰۵۱۳ K2	۰,۷۹۷۳ k1	K1 و K2 مقادیر بهینه برای بهره‌های

۵- نتیجه گیری

نتایج نمودار ۱ نشان می دهد که محور عمودی نشان دهنده ی مقدار هزینه ی بدست آمده توسط الگوریتم ICA می باشد و محور افقی نشان دهنده ی تعداد تکرارهای الگوریتم است. همان طور که مشاهده می شود تعداد تکرار های الگوریتم رقابت استعماری ۱۰۰ است و به طور کلی نمودار نزولی **Beast Cost**، بهترین هزینه های پیدا شده برای سیستم Fuzzy-PID و نمودار **Mean Cost** نشان دهنده ی میانگین هزینه های پیدا شده می باشد و همان طور که مشاهده می شود طی اجرای الگوریتم هزینه یافته شده کمتر و در نتیجه عملکرد سیستم بهبود می یابد. که بهترین مقدار یافته شده توسط این الگوریتم ۱,۲۴۶ می باشد. نتایج نمودار ۵ نشان می دهد که محور عمودی نشان دهنده ی مقدار هزینه ی بدست آمده توسط روش Fuzzy PID بهبود یافته توسط الگوریتم ترکیبی ICA-GA می باشد. و محور افقی نشان دهنده ی تعداد تکرارهای الگوریتم است. و به طور کلی نمودار نزولی **Beat Cost**، بهترین هزینه های پیدا شده برای بهترین PID بدست آمده است و نمودار **Mean Cost** نشان دهنده ی میانگین هزینه های پیدا شده می باشد و همانطور که مشاهده می شود. این تحقیق در مورد تاثیر استفاده از الگوریتم ICA به عنوان یک ابزار برای تنظیم کنترلر PID می باشد. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان دهنده این نکته است که روش تنظیم ICA باعث بدست آوردن جواب بهینه می شود. نتایج شبیه سازی نشان دهنده دقت بالای روش ارائه شده در دنبال کردن سرعت موتور می باشد. همچنین کنترل کننده ی پیشنهادی به جهت سادگی در ساختار و دقت بالا در کارایی می تواند در صنعت خود رو به منظور کنترل سرعت مورد استفاده قرار بگیرد.

-پیشنهادها

-این روش با ترکیب تکنیک PSO و ZN گسترش یابد. بدین صورت که ابتدا تنظیم بوسیله روش ZN انجام گرفته و سپس جواب های بهینه را با جستجو در محدوده جواب های روش ZN با استفاده از روش PSO بدست می آید. این تکنیک باعث کوچکتر شدن فضای جستجو و در نتیجه همگرایی سریع تر الگوریتم می شود. همچنین تعمیم روش تنظیم کنترلر PID به سیستم های چند متغیره با استفاده از الگوریتم ICA پیشنهاد می گردد.
-از این روش برای بهینه نمودن انواع مختلف مدل های صنعتی استفاده شود.

منابع

1. Cheon, K., Kim, J., Hamadache, M., & Lee, D. (2015). On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System. *Journal of Automation and Control Engineering* Vol, 3.(۶)
2. Pedregal, P. (2016). *Motivation and Framework Optimal Design through the Sub-Relaxation Method* (pp. 1-21): Springer.
3. Premkumar, K., & Manikandan, B. (2015). Fuzzy PID supervised online ANFIS based speed controller for brushless dc motor. *Neurocomputing*, 157, 76-90.
4. Cheon, K., Kim, J., Hamadache, M., & Lee, D. (2015). On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System. *Journal of Automation and Control Engineering* Vol, 3.(۶)
5. Venkateswarlu, D. (2014). Comparative study on DC motor speed control using various controllers. *Global Journal of Research In Engineering*, 13.(۱۷)
6. Sunisith, S., Joseph, L., & Saritha, M. (2014). Comparison of Fuzzy PID Controller with Conventional PID Controller in Controlling the Speed of a Brushless DC Motor. *Analysis*, 7.(۳)
7. Premkumar, K., & Manikandan, B. (2014). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor. *Neurocomputing*, 138, 260-270.
8. Naranjani, Y., Sardahi, Y., Sun, J.-Q., Hernandez, C., & Schuetze, O. (2013). Fine structure of pareto front of multi-objective optimal feedback control design. Paper presented at the ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference.
9. Pramonohadi, S. (2013). A comparative study of PID, ANFIS and hybrid PID-ANFIS controllers for speed control of Brushless DC Motor drive. Paper presented at the

- Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA), 2013 International Conference on.
10. Taşçı, G., Küçükyıldız, G., Ertunç, H., & Ocak, H. (2013). A DSPIC Based Real Time Position Control of A DC Motor Using PID and Fuzzy Logic Controller. *Mechanika*.
 11. Shi-da, Y., Ya-lin, Y., & Zhi-yong, S. (2012). Gbest-guided Imperialist competitive algorithm for global numerical optimization. Paper presented at the Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2012 International Conference on.
 12. Coelho, L. D. S., Afonso, L. D., & Alotto, P. (2012). A modified imperialist competitive algorithm for optimization in electromagnetics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2), 579-582.
 13. Abdechiri, M., Faez, K., & Bahrami, H. (2010). Adaptive imperialist competitive algorithm (AICA). Paper presented at the Cognitive informatics (ICCI), 2010 9th IEEE international conference on.
 14. Bahrami, H., Faez, K., & Abdechiri, M. (2010). Imperialist competitive algorithm using chaos theory for optimization (CICA). Paper presented at the Computer modelling and simulation (UKSim), 2010 12th international conference on.
 15. Abdechiri, M., Faez, K., & Bahrami, H. (2010). Adaptive imperialist competitive algorithm (AICA). Paper presented at the Cognitive informatics (ICCI), 2010 9th IEEE international conference on.
 16. Bahrami, H., Faez, K., & Abdechiri, M. (2010). Imperialist competitive algorithm using chaos theory for optimization (CICA). Paper presented at the Computer modelling and simulation (UKSim), 2010 12th international conference on.