

طراحی کنترل کننده فازی نوع سوگنو بهینه برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک درایو و چاپر با الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

علی صدارت نیا^۱، مجید مرادی زیرکوهی^{۲*}، نجمه چراغی شیرازی^۳

۱: دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۲: دانشیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران moradi@bkatu.ac.ir

۳: استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران nch_shirazi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲

چکیده

با توجه به ساختار ساده موتورهای DC این موتورها کاربردهای زیاد در صنعت و بخصوص حوزه رباتیک پیدا کرده است. از این رو کنترل دقیق سرعت آن‌ها حائز اهمیت است. در این مقاله برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک درایو و چاپر، کنترل کننده فازی نوع سوگنو پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این برای افزایش کارایی کنترل کننده فازی از ضرایب مقیاس دهی غیرخطی استفاده می‌شود. برای کنترل ولتاژ اعمالی به آرمیچر موتور DC از چاپر استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن ملاحظات عملی در نظر گرفتن دینامیک درایو چاپر باعث افزایش پیچیدگی سیستم می‌شود. بعد از طراحی کنترل کننده فازی برای افزایش عملکرد سیستم کنترل پارامترهای کنترل کننده فازی با استفاده از الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری تنظیم می‌شوند. این الگوریتم جدید بوده و یکی از ویژگی‌های آن تعداد کم پارامترهای آن است. نتایج نشان می‌دهد کنترل کننده فازی در مقایسه با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مشتقی کلاسیک دارای عملکرد بهتری در مقابل تغییرات پارامترهای سیستم و اغتشاش دارد. با در نظر گرفتن تابع معیار مناسب مقدار تابع هزینه برای روش پیشنهادی ۲/۰ ولی با کنترل کننده بهینه شده تناسبی-انتگرالی مشتقی حدود ۳۱/۰ است که نشان از برتری ۵۵ درصدی روش پیشنهادی را دارد.

واژه های کلیدی: کنترل کننده فازی نوع سوگنو، موتور DC، چاپر، الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری.

۱- مقدمه

اخیراً پیشرفت‌های زیادی در تولید درایو برای کنترل موتورهای مورد نیاز صنعت صورت گرفته است. درایو با عملکرد بالا و قابل اعتماد کاربردهای فراوانی از جمله در حوزه رباتیک دارد. کاربردهای صنعتی لزوم طراحی درایو با پاسخ دینامیکی سریع را ایجاب می‌کنند. از این رو از نقطه نظر کنترلی سیستم درایو باید سرعت مطلوب را به خوبی ردگیری کند [۱، ۲]. درایو موتور DC به خاطر کنترل پذیری خوب انتخاب خوبی برای کاربردهای صنعتی است. شایان ذکر است درایوهای موتور AC جایگاه خوبی در صنعت دارند ولی به فراخور نیاز به خاطر کنترل آسان، شتاب راه اندازی خوب و هزینه کم درایو موتور DC در اولویت قرار دارد. دکوپله بودن ولتاژ آرمیچر و میدان از مزیت‌های بارز موتورهای DC است. این مهم این امکان را به طراح می‌دهد که جریان میدان را ثابت نگه دارد و سپس با تغییر ولتاژ اعمالی، جریان آرمیچر کنترل نماید [۳]. از دیدگاه کنترلی دینامیک موتور DC مشخصه سرعت مطلوبی را دارد. این مهم باعث کنترل پذیری خوب موتور DC در محدوده گسترده‌ای از سرعت را دارد. برای کنترل سرعت درایو موتور DC یک سیستم حلقه بسته که شامل دو حلقه جریان و ولتاژ است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش کنترلی در حلقه داخلی جریان و در حلقه خارجی سرعت کنترل می‌شود [۴].

تاکنون در متون کنترلی روش‌های متفاوتی برای کنترل موتور DC پیشنهاد شده است. در [۵] از کنترل کننده تناسبی انتگرالی-مشتقی مرتبه کسری برای کنترل سرعت موتور DC استفاده شده و برای تنظیم بهینه ساختار کنترل کننده پیشنهادی از الگوریتم

بهینه‌سازی کرم شب‌تاب استفاده شده است. در [۴] از الگوریتم زنبور عسل برای تنظیم کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی- مشتقی مرتبه کسری برای کنترل سرعت موتور DC استفاده شده است. روش‌های دیگری از جمله کنترل غیرخطی [۶] و کنترل بهینه [۷] برای کنترل موتور DC پیشنهاد شده است. این روش‌ها دارای ساختار پیچیده هستند و اعمال آن‌ها معمولاً پرهزینه است. شایان‌ذکر است که ولتاژ اعمالی به آرمیچر موتور DC را می‌توان با استفاده از چاپر کنترل کرد. از نقطه‌نظر کنترلی در نظر گرفتن دینامیک چاپر باعث کاهش ریبیل جریان آرمیچر می‌شود. این امر باعث بهبود پاسخ گذرا و تنظیم بهتر سرعت می‌گردد [۱]. در این مقاله به کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک درایو و چاپر با کنترل‌کننده فازی پرداخته می‌شود. زیرا کنترل‌کننده فازی گزینه مناسبی برای کنترل سیستم‌های غیرخطی با دینامیک نامعلوم است. اما تنظیم بهینه و مناسب آن‌ها معمولاً با سعی و خطا انجام می‌شود که برای طراح گاهاً آزاردهنده است.

از این رو به‌عنوان یک نوآوری سعی می‌شود تا با رویکردی چند هدفه و با استفاده از روش جدید بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری ساختار کنترل‌کننده فازی بهینه گردد. در واقع با در نظر گرفتن اهداف عملکردی، پارامترهای زیادی از جمله فراجش، خطای حالت ماندگار و زمان نشست، بسته به اهمیت‌شان با وزن‌های مختلف باهم جمع‌آوری خواهند شد تا تابع هزینه مناسب که الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری قصد کمینه کردن آن را دارد شکل گیرد. این روش بهینه‌سازی از روابط بین معلم و دانش‌آموز در کلاس الهام گرفته شده است. این الگوریتم متأثر از اثر یک معلم در خروجی یادگیرندگان است. این روش، یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت بوده و مانند دیگر روش‌های مبتنی بر جمعیت از جمعیتی از جواب‌ها برای رسیدن به جواب بهینه استفاده می‌کند [۸، ۹]. این روش بهینه‌سازی بر اساس استفاده از روابط بین معلم و دانش‌آموز در کلاس است. این الگوریتم توسط اثر یک معلم در خروجی یادگیرندگان تحت تأثیر است. الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش بر اساس تأثیر یک معلم روی خروجی دانش‌آموزان در یک کلاس است و به‌طور کلی در یک کلاس معلم فردی تعیین می‌شود که دارای مقدار بهتری است و سطحی بالاتری نسبت به دانش‌آموزان دارد و می‌تواند دانش‌آموزان را با دانش خود سهیم نماید. این روش مبتنی بر جمعیت است و یک گروه از یادگیرندگان، یک جمعیت در الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری را تشکیل می‌دهند [۱۰، ۱۱]. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این الگوریتم، عدم وابستگی به پارامترهاست. چراکه این الگوریتم، کمترین تعداد پارامتر ممکن را دارد و از این نظر، می‌تواند یک امتیاز ویژه را داشته باشد [۱۲]. تاکنون در طراحی کنترل‌کننده فازی سوگنو بهینه برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک چاپر از این الگوریتم استفاده نشده است. برای صحت سنجی نتایج حاصله، نتایج شبیه‌سازی با کارهای دیگر انجام‌شده در این حوزه مقایسه می‌شود.

در ادامه در بخش دوم کنترل‌کننده فازی بیان می‌شود. سپس در بخش سوم به معرفی الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری پرداخته می‌شود. در بخش چهارم دینامیک موتور DC معرفی می‌شود. در بخش پنجم روش پیشنهادی و در بخش ششم نتایج ارائه می‌شود. نهایتاً در بخش هفتم نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- کنترل‌کننده فازی

دکتر لطفی زاده، استاد علوم کامپیوتری دانشگاه برکلی کالیفرنیا در سال ۱۹۶۰ منطق فازی را معرفی نمود [۱۳]. بسیاری معتقد هستند که سرآغاز تحول در علوم نوین مهندسی مقاله پرفسور لطفی زاده درباره مجموعه‌های فازی بود که در سال ۱۹۶۵ به چاپ رسید. پرفسور لطفی زاده سال ۱۹۷۳ طی یک مقاله مهم دیگر مفهوم استفاده از متغیرهای زبانی را در سیستم‌های مختلف و بخصوص مهندسی کنترل مطرح نمود [۱۴، ۱۵]. بنیان مهندسی کنترل در حوزه فازی همین مقاله است. این مقاله با رویکردی نوین و کارآمد اثرات مهمی در طراحی سیستم‌های کنترل هوشمند گذاشت. سیستم‌های فازی سیستم‌هایی توانمند و نو بر مبنای دانش یا قواعد هستند [۱۶]. جوهره یک سیستم فازی پایگاه قواعد است که از قواعد اگر-آنگاه فازی تشکیل شده است. کنترل‌کننده فازی از چهار قسمت فازی کننده، پایگاه دانش، منطق تصمیم‌گیری و فازی زدا تشکیل شده است [۱۷]. با توجه به اینکه در این مقاله از سیستم فازی نوع- سوگنو استفاده شده است در ادامه فقط این سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. پایگاه قواعد در فرم تاکاگی- سوگنو بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{if } x_1 \text{ is } A \text{ and } x_2 \text{ is } B \text{ then } y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_0 \quad (1)$$

طراحی کنترل کننده فازی نوع سوگنو بهینه برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن ...
 که در آن x_1 و x_2 ورودی‌ها و y خروجی است. A و B نیز توابع تعلق مربوط به ورودی‌ها و C توابع تعلق خروجی است. علاوه بر این a_1 ، a_2 و a_0 اعداد ثابت هستند.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری، یکی از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است که در سال ۲۰۱۱ و با الهام گرفتن از فرایند یادگیری و آموزش، ابداع شده است [۱۸]. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری یا الگوریتم آموزش معلم بر اساس اصول یادگیری و آموزش معلم و دانش آموزان طراحی گردیده است و با استفاده از یادگیری و یاددهی به بهینه‌سازی مسائل مختلف می‌پردازد. معلم در کلاس نقش مهمی دارد و می‌تواند با طرز بیان خوب خود به بالا بردن سطح دانش آموزان کمک نماید و میانگین سطح کلاس را بالا ببرد. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری به‌طور خاص مخصوص مسائل پیوسته است ولی با ایجاد تمهیدات خاص می‌توان از آن در مسائل گسسته و باینری نیز استفاده نمود [۱۹].
 الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری بر اساس تأثیر یک معلم روی خروجی دانش آموزان در یک کلاس است و به‌طور کلی در یک کلاس معلم فردی تعیین می‌شود که دارای مقدار بهتری است و سطحی بالاتری نسبت به دانش آموزان دارد و می‌تواند دانش آموزان را با دانش خود سهیم نماید [۱۸].

یک معلم خوب، یک میانگین بهتر برای دانش آموزان تولید می‌نماید. در هر مرحله و تکرار در الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری معلم کسی است که بهترین فرد کلاس است و بهترین تابع هدف را دارد و در هر مرحله ممکن است معلم تغییر نماید. در الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری دو فاز بهینه‌سازی وجود دارد. این دو فاز عبارت‌اند از فاز معلم و فاز دانش‌آموز. فاز معلم بدین صورت است که میانگین کلاس باید به سطح معلم رسانده شود و سطح دانش آموزان در این مرحله تغییر نماید. فاز دانش آموزان بعد از فاز معلم اجرا می‌شود و دانش آموزان می‌توانند از یکدیگر نیز آموزش ببینند و بر روی یکدیگر تأثیر بگذارند و این تعامل باعث می‌شود که سطوح دانش آموزان ارتقا پیدا نماید [۲۰].

۳-۱- فاز معلم

فرض کند M_i میانگین و T_i معلم در نسل i باشد. T_i سعی می‌کند که میانگین M_i را به سمت سطح خودش سوق دهد، بنابراین اکنون میانگین جدید T_i خواهد بود که با M_{new} نشان داده می‌شود. راه‌حل (پاسخ) بر اساس تفاوت بین میانگین موجود و میانگین جدید به‌روز می‌شود و توسط فرمول زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$Difference_mean_i = r_i(M_{new} - T_i M_i) \quad (2)$$

که در این فرمول T_F عامل آموزش است که تصمیم می‌گیرد مقدار میانگین چقدر باید تغییر کند. r_i یک عدد تصادفی در محدوده بین صفر تا یک است. مقدار T_F می‌تواند ۱ و یا ۲ باشد که در واقع یک رفتار تصادفی با احتمال یکسان است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_F = \text{round}(1 + \text{rand} \times (2 - 1)) \quad (3)$$

توجه شود که مقدار T_F به‌عنوان ورودی الگوریتم داده نمی‌شود بلکه به‌صورت تصادفی به‌وسیله الگوریتم به دست می‌آید. پس از انجام آزمایش‌های زیادی روی توابع و مسائل مختلف، این نتیجه به‌دست آمده است که الگوریتم زمانی بهتر عمل می‌کند که مقدار T_F بین ۱ و ۲ باشد. برای ساده‌سازی الگوریتم مقدار T_F یک یا دو در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه راه‌حل موجود را طبق رابطه زیر اصلاح می‌شود:

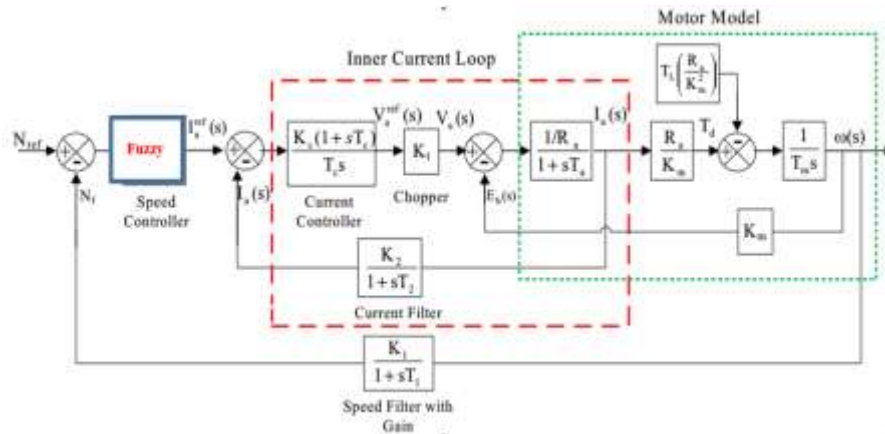
$$X_{new,i} = X_{old,i} + Difference_mean_i \quad (4)$$

۳-۲- فاز دانش آموز

یادگیرندگان اطلاعات خود را توسط دو میانگین مختلف افزایش می‌دهند: یکی از طریق معلم و یکی از طریق تعامل بین خودشان. تعامل یک یادگیرنده (دانش‌آموز) به‌طور تصادفی با دیگر یادگیرندگان با کمک بحث‌های گروهی، ارائه‌ها، ارتباطات رسمی صورت می‌گیرد [۹، ۲۱]. یک یادگیرنده چیزهای جدیدی یاد می‌گیرد اگر یادگیرندگان دیگر دانش بیشتری از خودش داشته باشد.

۴- کنترل موتور DC

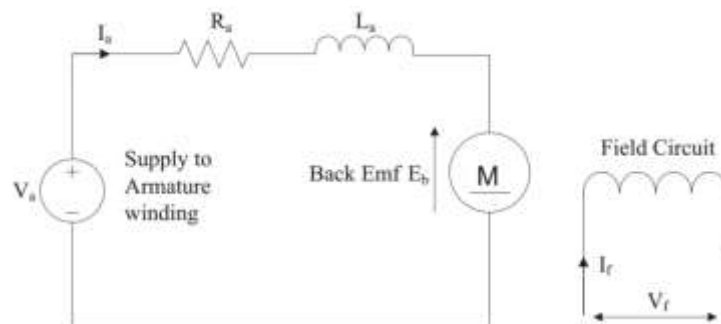
برای کنترل سرعت درایو موتور DC یک سیستم حلقه بسته که شامل دو حلقه جریان و ولتاژ است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش کنترلی در حلقه داخلی جریان و در حلقه خارجی سرعت کنترل می‌شود [۴]. با استفاده از چابک امکان تنظیم سرعت موتور بالاتر یا پایتیر از سرعت نامی فراهم می‌شود. بلوک دیاگرام کنترل سرعت درایو موتور DC در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام کنترل سرعت درایو موتور DC [۴]

۴-۱- حلقه کنترل جریان

به خاطر وجود لختی در موتور، با اعمال ولتاژ سرعت موتور به صورت آنی تغییر نمی‌کند. موتور برای رسیدن به سرعت مطلوب نیاز به زمان است. از طرفی کنترل کننده سرعت بسیار سریع عمل می‌کند. در ابتدای شروع بکار موتور چون ولتاژ ضد محرکه وجود ندارد جریان زیادی در سیم‌پیچ‌های موتور جاری می‌شود و باعث صدمه به موتور شود. بنابراین برای کنترل جریان آرمیچر طراحی کنترل حلقه بسته جریان ضرورت دارد. بنابراین حلقه کنترل جریان اهمیت زیادی در درایو موتور DC دارد و از این رو طراحی آن توجه خاصی را می‌طلبد [۲۲، ۲۳]. شایان ذکر است ولتاژ اعمالی به آرمیچر هم به مقدار خطای جریان و هم مقدار خطای سرعت بستگی دارد. بنابراین یک کنترل کننده جریان برای تضمین این مهم که ولتاژ اعمالی در گشتاورهای مثبت و منفی از کران‌های مجاز خود تجاوز نخواهد کرد ضروری است [۲۴].



شکل ۲: مدار معادل موتور DC با تحریک مجزا [۴]

۴-۲- حلقه کنترل سرعت

در حلقه خارجی سرعت مرجع (مطلوب) با سرعت موتور مقایسه شده و بر مبنای این اختلاف (خطای سرعت) کنترل کننده سرعت، جریان مورد نیاز موتور را فراهم می‌کند. در این مقاله هدف طراحی بهینه کنترل کننده سرعت است. کنترل کننده پیشنهادی کنترل کننده فازی نوع سوگنو می‌باشد.

۴-۳- مدل ریاضی موتور

همان طور که در شکل ۲ آشکار است با کنترل دقیق ولتاژ اعمالی شده به آرمیچر می توان سرعت موتور را به منظور رسیدن به سرعت مطلوب تنظیم نمود. با توجه به قانون ولتاژ کیرشرف می توان نوشت [۴]:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b \quad (۵)$$

$$\tau_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + \tau_l \quad (۶)$$

که در آن V_a ولتاژ اعمالی به آرمیچر، R_a مقاومت سیم پیچ آرمیچر، I_a جریان آرمیچر، L_a اندوکتانس آرمیچر، E_b ولتاژ محرکه ضد القاء، τ_d گشتاور تولیدی موتور، τ_l گشتاور بار، ω سرعت زاویه ای موتور، B ثابت موتور و J ممان اینرسی است. معمولاً B بسیار ناچیز است با فرض $B = 0$ و در نظر گرفتن ϕ به عنوان شار میدان داریم:

$$\tau_d = J \frac{d\omega}{dt} + \tau_l \quad (۷)$$

$$E_b = k_m \omega \quad (۸)$$

$$\tau_d = k_m I_a \quad (۹)$$

که $k_m = k\phi$ یک مقدار ثابت است. با در نظر گرفتن معادلات (۵) تا (۹) در حوزه لاپلاس داریم:

$$I_a(s) = \frac{V_a - E_b}{R_a + L_a s} = \frac{V_a - k\omega\phi(s)}{R_a(1 + \frac{L_a}{R_a}s)} = \frac{V_a - k\omega\phi(s)}{R_a(1 + T_a s)} \quad (۱۰)$$

$$\omega(s) = \frac{\tau_d - \tau_l}{Js} = \frac{k\phi I_a(s) - \tau_l}{Js} \quad (۱۱)$$

$$T_m = \frac{JR_a}{(K\phi)^2} \quad (۱۲)$$

که $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ ثابت زمانی مکانیکی موتور است.

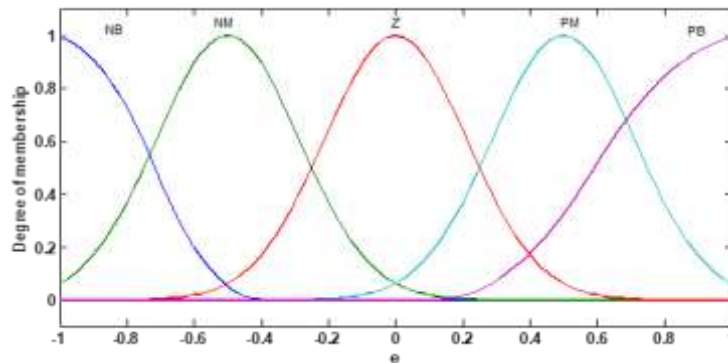
۵- روش پیشنهادی

همان طور که در بخش های قبل مطرح شد هدف کنترل سرعت موتور با استفاده از کنترل کننده فازی نوی سوگنو است. بعد از طراحی کنترل کننده به تنظیم بهینه آن جهت کنترل سرعت موتور DC با تحریک مجزا با رویکرد بهینه سازی و به کارگیری الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری پرداخته می شود. کنترل کننده فازی طراحی شده دارای دو ورودی خطا و مشتق خطا است. که خطا در واقع اختلاف بین خروجی (سرعت موتور) و ورودی مرجع است. برای پیاده سازی کنترل کننده فازی ابتدا باید توابع تعلق هر دو ورودی را مشخص کنیم. برای هر ورودی پنج تابع تعلق در نظر گرفته می شود. توابع تعلق خطا در شکل ۳ و توابع تعلق مربوط به مشتق خطا در شکل ۴ آمده است. همان طور که دیده می شود هر ورودی دارای پنج تابع تعلق است. در نتیجه تعداد قوانین کنترل کننده فازی ۲۵ قاعده است. پایگاه قوانین نیز در جدول ۱ آمده است. علاوه بر این برای افزایش کارایی کنترل کننده فازی از ضرایب مقیاس دهی غیرخطی در ورودی های کنترل کننده فازی به صورت زیر استفاده می شود:

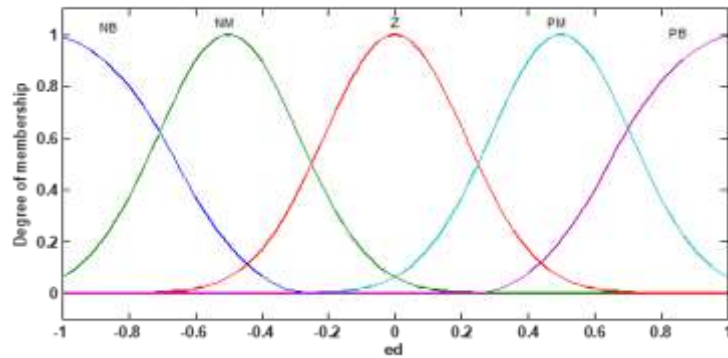
$$k_1 = e^{0.2e(t)} \quad (۱۳)$$

$$k_2 = e^{0.03\dot{e}(t)} \quad (۱۴)$$

توجه شود که با افزایش خطا و یا مشتق خطا ضرایب مقیاس دهی افزایش می یابد تا خروجی کنترل کننده تحت تأثیر بیشتر قرار گیرد و باعث کاهش خطا گردد. بلوک دیاگرام کنترل کننده با نشان دادن ضرایب مقیاس دهی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۳: توابع تعلق خطا



شکل ۴: توابع تعلق مشتق خطا

جدول ۱: پایگاه قواعد سیستم فازی

	NB	NM	Z	PM	PB
NB	-1	-1	-0.96	-0.64	0
NM	-1	-0.97	-0.64	0	0.64
Z	-0.97	-0.64	0	0.64	0.97
PM	-0.64	0	0.64	0.97	1
PB	0	0.64	0.97	1	1



شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترل کننده با نشان دادن ضرایب مقیاس دهی

۵-۱- طراحی کنترل کننده بهینه

برای اعمال الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری ابتدا یک تابع معیار با رویکرد چند هدفه به‌عنوان تابع هزینه به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$J_1 = w_1 \int_0^{\infty} e^2 dt + w_2 Mp \tag{15}$$

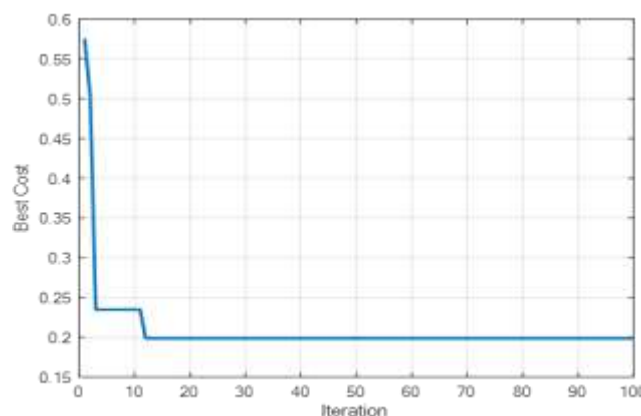
طراحی کنترل کننده فازی نوع سوگنو بهینه برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن
 که w_1 ، w_2 پارامترهای طراحی هستند که با توجه به انتظارات طراح از سیستم کنترل تنظیم می شوند. Mp فراجش است. با هدف کمینه سازی و مقایسه نتایج توابع هزینه فوق استفاده شده است. هدف بهینه سازی ۲۰ پارامتر سیستم کنترل است. یکی از مزیت های الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری این است که تعداد پارامترهای کمی دارد. تعداد جمعیت اولی ۱۰۰ و حداکثر تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته می شود.

۶- نتایج شبیه سازی

در این قسمت ابتدا کنترل کننده فازی و سپس کنترل کننده کلاسیک PID جهت کنترل سرعت موتور DC با تحریک مجزا با رویکرد بهینه سازی و به کارگیری الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری طراحی و مقایسه می شوند. پارامترهای موتور DC مطابق جدول ۲ انتخاب می شوند [۴].

۶-۱- کنترل کننده فازی بهینه

با اجرای برنامه تابع هزینه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود الگوریتم به خوبی و سریع همگرا شده است. تقریباً الگوریتم بعد از ۱۲ تکرار همگرا شده است.

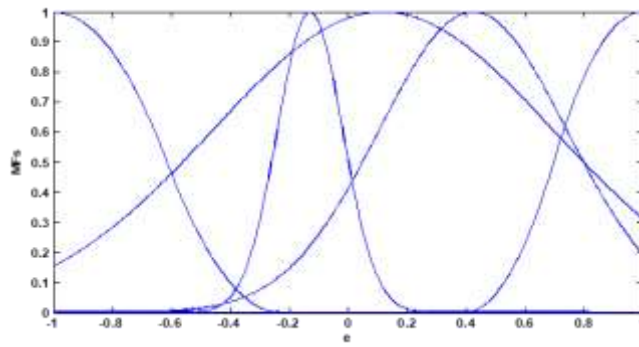


شکل ۶: تابع هزینه

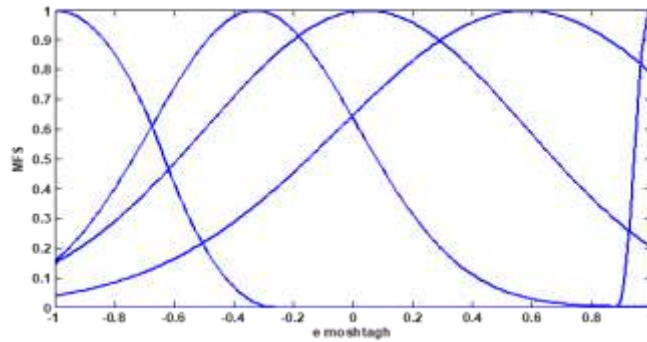
جدول ۲: پارامترهای درایو موتور DC [۴]

۰.۲۳۴۲	$R_a(\Omega)$	۴۶۰ ولت	ولتاژ نامی موتور
۳/۵	$T_2(ms)$	۶۹۰ آمپر	جریان نامی موتور
۲۵	$T_1(ms)$	۱۲۰۰ آمپر	حد بالای جریان
۲۷/۵۵	$T_m(ms)$	۰.۷۰۲۶	$L_a(H)$
۳۰	$T_c(ms)$	۸۴	$J(kg m^2)$
۳۰	$T_a(ms)$	۱/۵	$K_m(V s/rad)$
۰.۱۹	K_1	۴۶	K_t
		۰.۰۸۳	K_2

با اعمال این الگوریتم توابع تعلق بهینه شده برای خطا و مشتق خطا به ترتیب در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.

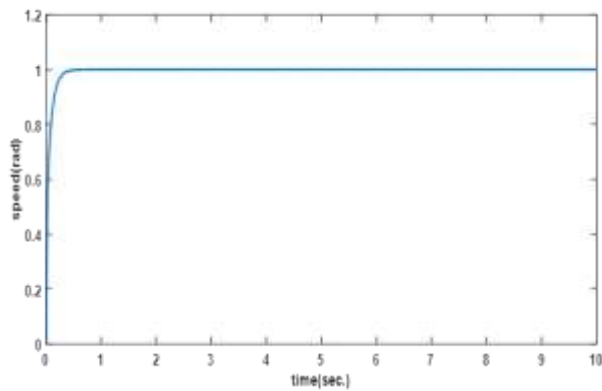


شکل ۷: توابع تعلق بهینه شده خطا

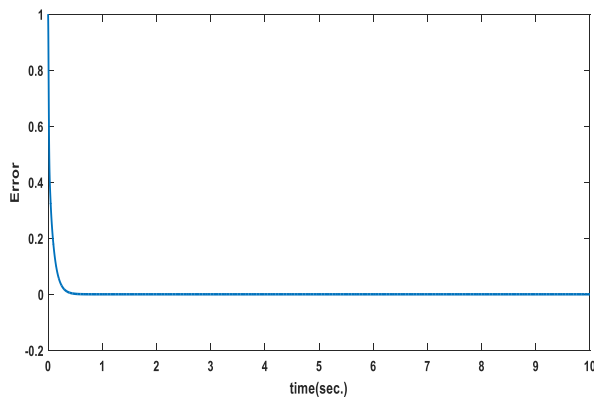


شکل ۸: توابع تعلق مشتق خطا (بهینه شده)

پاسخ سیستم کنترل به ورودی پله واحد در شکل ۹ نشان داده شده است. خطا نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد سرعت موتور بسیار سریع به مقدار مطلوب رسیده است.



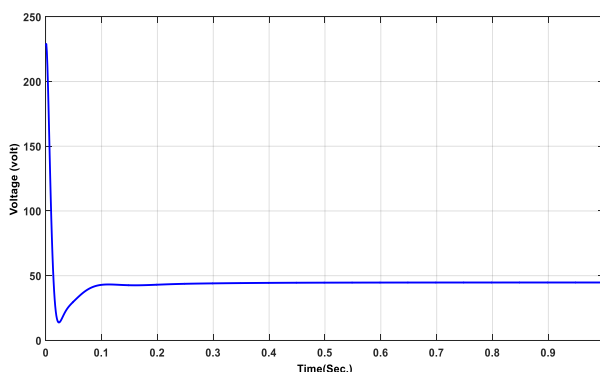
شکل ۹: سرعت خروجی موتور



شکل ۱۰: خطا

طراحی کنترل کننده فازی نوع سوگنو بهینه برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن

ولتاژ اعمالی به آرمیچر موتور نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود ولتاژ اعمالی هموار و در محدوده مجاز است. علاوه بر این نوسان نیز نداشته است. توجه شود که وجود نوسان در ولتاژ اعمالی باعث استهلاک موتور می شود. بنابراین کنترل کننده موفق عمل کرده است.



شکل ۱۱: ولتاژ آرمیچر

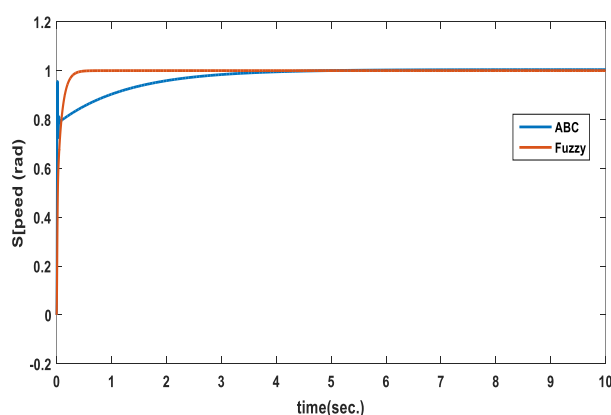
۶-۲- کنترل کننده PID

در این قسمت نتایج کنترل کننده فازی بهینه شده با کنترل کننده PID مقایسه می شوند. ضرایب W_1 ، W_2 به ترتیب ۲، ۱ در نظر گرفته می شود. برای ارزیابی بهتر عملکرد کنترل کننده طراحی شده، نتایج به دست آمده با مرجع [۴] مقایسه می شوند. در این مرجع از الگوریتم زنبور عسل برای به دست آوردن ضرایب کنترل کننده PID استفاده شده است. ضرایب کنترل کننده PID در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: ضرایب کنترل کننده PID [۴]

پارامتر	مقدار
k_p	۸/۸۴
k_i	۵/۳۸
k_d	۰/۵۷

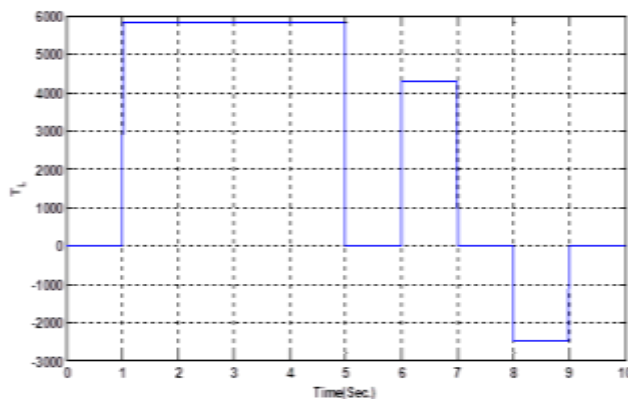
سرعت خروجی موتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در مقایسه با الگوریتم زنبور عسل می توان گفت پاسخ سیستم در نتیجه اعمال کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری دارای فراجهدش کمتر و زمان نشست کمتری است. کنترل کننده بهینه شده با الگوریتم زنبور عسل دارای پاسخ نوسانی است که مطلوب نیست. در مجموع الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری به جواب بهتری رسیده است.



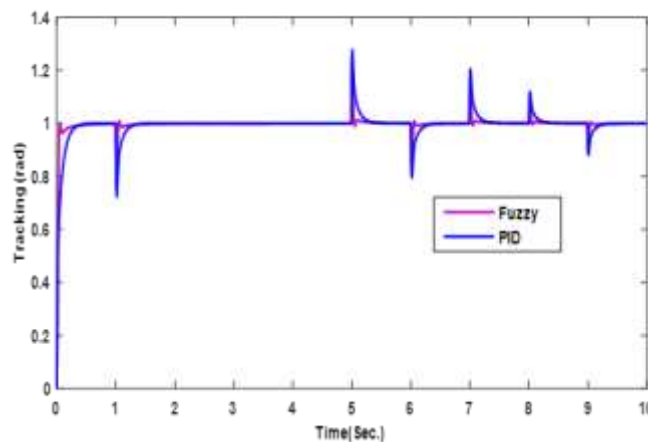
شکل ۱۲: پاسخ کنترل کننده PID بهینه شده با زنبور عسل و فازی

۶-۳- بررسی مقاوم بودن سیستم کنترل

جهت بررسی عملکرد کنترل کننده در این قسمت عدم قطعیت پارامتری را در نظر می‌گیریم. برای این کار همه پارامترهای موتور را ۳۰٪ افزایش می‌دهیم. علاوه بر این فرض کنیم که سیستم در معرض یک سیگنال اغتشاش خارجی مطابق شکل ۱۳ قرار گیرد. پاسخ سیستم کنترل با هر دو کنترل کننده بهینه شده PID و فازی در شکل ۱۴ رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترل کننده فازی دارای پاسخ مقاوم و خوبی در مقابل تغییرات داده شده است. توجه شود با در نظر گرفتن تابع معیار (۱۵) نتایج مقایسه‌ای در جدول ۴ آمده است. مقدار تابع هزینه برای روش پیشنهادی ۰/۲ ولی با کنترل کننده بهینه شده تناسبی-انتگرالی-مشتقی ۰/۳۱ است که نشان از برتری ۵۵ درصدی روش پیشنهادی را دارد.



شکل ۱۳: اغتشاش خارجی اعمالی به موتور



شکل ۱۴: ردگیری کنترل کننده فازی و PID در حضور عدم قطعیت و اغتشاش خارجی

جدول ۴: مقایسه نتایج

مقدار تابع معیار J_1	روش
۰/۲	روش پیشنهادی مقاله
۰/۳۱	روش معرفی شده در مرجع [۲۵]

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به کنترل سرعت موتور DC با لحاظ کردن دینامیک درایو و چاپر با کنترل کننده فازی بهینه با الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری پرداخته شد. از نقطه نظر کنترلی از یک سو در نظر گرفتن دینامیک چاپر باعث سخت‌تر شدن کنترل موتور

طراحی کنترل کننده فازی نوع سوگنو بهینه برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن

و از سوی دیگر باعث کاهش ریپل جریان آرمیچر می‌شود. این مهم باعث بهبود پاسخ گذرا و تنظیم بهتر سرعت می‌شود. نتایج نشان داد که در صورتی که این کنترل کننده به درستی تنظیم شود دارای عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PID کلاسیک بهینه شده با الگوریتم زنبور عسل است. در ادامه برای تنظیم دقیق کنترل کننده فازی از الگوریتم جدید بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری استفاده شد. نتایج با الگوریتم زنبور عسل که در مراجع بیان شده است مقایسه شد. نتایج نشان داد که کنترل کننده فازی بهینه شده با الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری هم دارای همگرایی بسیار خوبی است و هم به مراتب عملکرد بهتری دارد. با توجه به نتایج مقایسه‌ای مقدار تابع هزینه برای روش پیشنهادی ۰/۲ ولی با کنترل کننده بهینه شده PID حدود ۰/۳۱ است که نشان از برتری ۵۵ درصدی روش پیشنهادی را دارد.

مراجع

- [1] U. A. Bakshi, and M. V. Bakshi, *Electrical drives and control: Technical Publications*, 2009.
- [2] A. Kumar, H. Saraf, and R. Kumar, "Hardware design of closed loop four quadrant dc motor drive with regenerative braking," in *proc. 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2018, pp. 287-292.
- [3] H. M. Usman, A. G. Haddad, H. Rehman, and S. Mukhopadhyay, "Comparison of PI and FOPI Based Voltage and Current Controlled DC Motor Drive System," in *proc. 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2019, pp. 139-142.
- [4] A. Rajasekhar, R. K. Jatoth, and A. Abraham, "Design of intelligent PID/PI λ D μ speed controller for chopper fed DC motor drive using opposition based artificial bee colony algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 29, pp. 13-32, 2014.
- [5] V. H. Haji, and C. A. Monje, "Fractional-order PID control of a chopper-fed DC motor drive using a novel firefly algorithm with dynamic control mechanism," *Soft Computing*, vol. 22, no. 18, pp. 6135-6146, 2018.
- [6] N. Hemati, J. S. Thorp, and M. C. Leu, "Robust nonlinear control of brushless DC motors for direct-drive robotic applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 6, pp. 460-468, 1990.
- [7] P. M. Pełczewski, and U. H. Kunz, "The optimal control of a constrained drive system with brushless dc motor," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 5, pp. 342-348, 1990.
- [8] V. K. Ummidivarapu, H. K. Voruganti, T. Khajah, and S. P. A. Bordas, "Isogeometric shape optimization of an acoustic horn using the teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 80, pp. 101881, 2020.
- [9] S. Talatahari, N. Taghizadieh, and V. Goodarzimehr, "Hybrid Teaching-Learning-Based Optimization and Harmony Search for Optimum Design of Space Trusses," *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 177-194, 2020.
- [10] R. Rao, "Review of applications of TLBO algorithm and a tutorial for beginners to solve the unconstrained and constrained optimization problems," *Decision Science Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 1-30, 2016.
- [11] R. V. Rao, "Design Optimization of a Robot Manipulator Using TLBO and ETLBO Algorithms," *Teaching Learning Based Optimization Algorithm*, pp. 163-169: Springer, 2016.
- [12] Z. S. Hasan, and M. Nema Hawas, "Using Teaching Learning Based Optimization to Efficacious and Tuning of UPFC-PODs of Interconnected Systems," *MS&E*, vol. 745, no. 1, pp. 012001, 2020.
- [13] A. T. Azar, *Fuzzy systems: BoD—Books on Demand*, 2010.
- [14] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—II," *Information sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 301-357, 1975.

- [15] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, no. 1, pp. 28-44, 1973.
- [16] E. Khan, "Neural fuzzy based intelligent systems and applications," *Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms*, pp. 105-140: CRC Press, 2020.
- [17] L.-X. Wang, and L.-X. Wang, "A course in fuzzy systems and control: Prentice Hall PTR Upper Saddle River," NJ, 1997.
- [18] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Computer-Aided Design*, vol. 43, no. 3, pp. 303-315, 2011.
- [19] A. K. Shukla, P. Singh, and M. Vardhan, "An adaptive inertia weight teaching-learning-based optimization algorithm and its applications," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 77, pp. 309-326, 2020.
- [20] O. T. Chong, W. H. Lim, N. A. M. Isa, K. M. Ang, S. S. Tiang, and C. K. Ang, "A Teaching-Learning-Based Optimization with Modified Learning Phases for Continuous Optimization," in *proc. Science and Information Conference*, 2020, pp. 103-124.
- [21] W. Chen, X. Chen, J. Peng, M. Panahi, and S. Lee, "Landslide susceptibility modeling based on ANFIS with teaching-learning-based optimization and Satin bowerbird optimizer," *Geoscience Frontiers*, vol.12, no.1, 2021.
- [22] S. J. Hammoodi, K. S. Flayyih, and A. R. Hamad, "Design and implementation speed control system of DC Motor based on PID control and Matlab Simulink," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 127, 2020.
- [23] A. Latif, A. Z. Arfianto, H. A. Widodo, R. Rahim, and E. T. Helmy, "Motor DC PID System Regulator for Mini Conveyor Drive Based-on Matlab," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 1, no. 6, pp. 185-190, 2020.
- [24] A. Rajasekhar, R. K. Jatoth, and A. Abraham, "Design of intelligent PID/PI λ D μ speed controller for chopper fed DC motor drive using opposition based artificial bee colony algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 29, no. 2, pp. 13-32, 2014.
- [25] A. Rajasekhar, S. Das, and A. Abraham, "Fractional order PID controller design for speed control of chopper fed DC motor drive using artificial bee colony algorithm," in *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2013 World Congress on*, 2013, pp. 259-266.

Design of Optimal Sugeno-type fuzzy Controller for Speed Control of DC Motor Including Drive and Chopper Dynamic Considering Multi Objective Optimization Using Teaching Learning Optimization Algorithm

Ali Sedaratnia¹, Majid Moradi Zirkohi^{2*}, Najmeh Cheraghi Shirazi³

¹ Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bushehr branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

^{2*} Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam-Alanbia University of Technology, Iran

³ Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bushehr branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

1: sedarats@gmail.com

2*: moradi@bkatu.ac.ir

3: nch_shirazi@yahoo.com

ABSTRACT:

Due to the simple structure of DC motors, these motors have found many applications in industry. Therefore, in this paper, the speed control of DC motor is investigated by considering the dynamics of drive and chopper with Sugeno-type fuzzy controller. A chopper is used to control the voltage applied to the DC motor armature. Considering the dynamics of the chopper drive increases the complexity of the system. After designing the fuzzy controller to increase the performance of the control system, the fuzzy controller parameters are adjusted using a teaching-learning-based optimization algorithm. This algorithm is new and one of its features is its small number of parameters. The results show that the fuzzy controller has better performance against changes in system parameters and uncertainties compared to the classic PID controller. Considering the appropriate criterion function, the value of the cost function for the proposed method is 0.2 But with the optimized PID controller about 0.31 which shows a 55% superiority of the proposed method.

KEYWORDS: Sugeno-type fuzzy controller, DC motor, chopper, Teaching-Learning-Based Optimization algorithm.