



بهینه‌سازی مصرف انرژی با استفاده از استراتژی کنترل دور موتور پیشنهادی نرم بینهایت و الگوریتم ممیتیک؛ کاربرد در موتور آسنکرون سه فاز

پیام حسین پور جلیسه^{۱*}، محسن آقایی اعرابی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل payamhosseinpur@yahoo.com

۲- کارشناسی مهندسی مکانیک arabi@cementsabz.com

خلاصه

با توجه به اینکه بیش از نیمی از انرژی الکتریکی در صنعت سیمان، در موتورهای الکتریکی مصرف می‌شود می‌توان اقدامات مختلفی برای صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در الکتروموتورهای صنعتی بعمل آورد، به این منظور در این مقاله استراتژی کنترلی پیشنهادی در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی بکار گرفته شده است. روش جدید مبتنی بر تاثیر نرم بی‌نهایت در قانون دستیابی سیستم کنترل ساختار متغیر (VSC) گسسته ارائه می‌نماید. هدف این مقاله غلبه بر چالش‌هایی است که سیستم‌های VSC گسسته، در هنگام همگرا شدن به مبدأ دارند. در واقع نرخ و سرعت همگرایی از چالش‌های موجود در روش VSC هستند. در این مقاله، یک استراتژی جدید کنترلی که نقص سیستم کنترل VSC را بهبود می‌بخشد؛ ارائه می‌شود. ویژگی خاص این قانون جدید این است که، متناسب با نرم بردار حالت تغییر می‌کند و می‌تواند سرعت همگرایی به مبدأ را بالا برده و سوئیچینگ را تا حد زیادی کاهش دهد. ضمناً با بکارگیری روش کنترلی مبتنی بر نرم بی‌نهایت، دقت حالت ماندگار افزایش یافته و عملکرد کنترل بر حسب خطا و سرعت همگرایی رضایت بخش می‌شود. همچنین دو پارامتر مهم ساختار جدید، با استفاده از الگوریتم ممیتیک بدست آمده و در ساختار بهبود یافته، جایگزین مقادیر قبلی شده‌اند. در این حالت سوئیچینگ حذف شده و نرخ همگرایی چندین برابر افزایش می‌یابد. در واقع این مقاله یک قانون ترکیبی جدید برای کنترل ساختار متغیر، با بکارگیری نرم بی‌نهایت بردار حالت و الگوریتم ممیتیک ارائه کرده است. نتایج شبیه‌سازی اثر بخشی روش پیشنهادی را بخصوص با کاربرد در موتور القایی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: الگوریتم ممیتیک، نرم بی‌نهایت، بهینه‌سازی مصرف انرژی، کنترل مد لغزشی، کنترل قانون دستیابی، موتور آسنکرون سه فاز،

۱. مقدمه

امروزه در صنعت، الکتروموتورهای متفاوت و با سرعت‌های مختلف از جمله در سنگ‌شکن، نوار نقاله، آسیاب مواد، فن‌ها، پمپ‌ها و کمپرسورها، ماشین برش فلزات، جرقه‌تیل الکتریکی، ماشین‌های مربوط به حمل و نقل و انواع مختلف وسایل چاپ، معدن ذغال سنگ و صنایع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال چرخاننده الکتریکی در ماشین برش فلزات، سرعت

^{۱*} مدرس دانشگاه، کارشناس ارشد مهندسی برق-کنترل، شرکت صنایع سیمان گیلان سبز

^{۲*} مدیر کارخانه سیمان گیلان سبز (دیلمان)



سیستم می باید مطابق با نوع کار، فلز و کیفیت نوع برش و اندازه قطعه مورد نظر، قابل تنظیم باشد. در کلیه ماشین‌آلات ذکر شده، چرخاننده باید مجهز به کنترل سرعت باشد تا بتواند کمیت تولید زیاد، شرایط کار مطلوب و کیفیت محصول خوب باشد. توسط کنترل سرعت می توان سرعت چرخاننده را به میزان مورد نیاز جهت انجام مراحل کار تغییر داد. مفهوم کنترل سرعت یا تنظیم نباید شامل تغییر طبیعی در هنگام اخذ بار شود. تغییر سرعت مورد نیاز در روی موتور چرخاننده و یا عنصر مرتبط به موتور چرخاننده انجام می‌گیرد، که ممکن است این عمل با دست توسط اپراتور و یا به طور اتوماتیک توسط وسایل کنترل انجام گیرد. امروزه تنظیم سرعت توسط مدار الکتریکی توسعه یافته و از نظر اقتصادی و نتایج حاصله بر کنترل مکانیکی ارجحیت دارد. موتورهای آسنکرون سه فاز به خاطر امتیازات چشمگیرشان در صنایع کاربرد متنوعی دارند. از آن جمله در سیستم‌های محرکه‌ای که نیاز به تغییر و تنظیم دور دارند بیشتر و بیشتر بکار گرفته می‌شوند. بحث انرژی از دو دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی حائز اهمیت است. بهینه‌سازی مصرف انرژی به این معنی است که بتوان با استفاده از تجهیزات و یا مدیریت بهتر همان کار را با مصرف انرژی کمتر انجام بدهیم. در اغلب بخش‌های صنعتی انرژی الکتریکی مهمترین منبع انرژی صنعت بشمار می‌رود. از آنجا که موتورهای الکتریکی، مصرف کننده اصلی انرژی الکتریکی در کارخانجات صنعتی می‌باشند لذا بهینه‌سازی مصرف انرژی در موتورهای الکتریکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. در بسیاری از کاربردها به هنگام راه اندازی، موتور جریان بسیار بالایی از شبکه می‌کشد و موجب کاهش ولتاژ شبکه و ایجاد صدماتی به تاسیسات برق رسانی و سایر دستگاه‌ها می‌گردد. این جریان به ۶ برابر جریان نامی موتور می‌رسد که بسیار نامطلوب می‌باشد. کنترل دورهای موتور هم در بهبود بهره وری تولید و هم در صرفه جوئی مصرف انرژی در کاربردهائی نظیر فن‌ها، پمپ‌ها، کمپرسورها و دیگر محرکه‌های کارخانجات، نقش بسزایی دارند.

کنترل ساختار متغیر (VSC: Variable Structure Control) یک شیوه طراحی کلی برای سیستم‌های کنترل مقاوم است. از گذشته تئوری VSC زمان پیوسته و عملکردهای آن، مورد علاقه محققان بوده و به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۳]. اما در میان نتایج موجود از تحقیقات، تنها چند مورد از آنها مربوط به سیستم‌های زمان گسسته است. حالت گسسته VSC زمانی که اجرا توسط کامپیوتر، با دوره نمونه‌برداری نسبتاً کوتاه انجام شود، اهمیت پیدا می‌کند. از آنجا که تجزیه و تحلیل و طراحی زمان گسسته برای برنامه‌های کاربردی واقعی مناسب‌تر است، معادلات طراحی بدست آمده در زمان گسسته انجام شده است [۴]. در هر حال، عملکرد کنترل کننده با کامپیوترهای دیجیتالی نیاز به یک فاصله‌ی نمونه‌برداری مشخص دارد که ممکن است وزوز (Chatering) طولانی و سوئیچینگ سطح و ناپایداری با بهره‌ی بالا را به همراه داشته باشد. هدف در این مقاله مقابله با اثر سوئی ناشی از سوئیچینگ است، بنابراین VSC زمان گسسته تحقق ارزشمندی را به همراه دارد.

Hoft و Dote اولین بار مسئله VSC گسسته را مورد بررسی قرار دادند؛ تا شرایط دستیابی به فرم گسسته را بوجود بیاورند [۴]. با آشکار شدن مکانیسم حرکتی سیستم‌های VSC زمان گسسته، پیشرفت زیادی بدست آمد. ولی این سیستم‌ها یک نقص آشکار دارند، و آن این است که برای دستیابی به تعادل، در همسایگی از مبدأ به نوسان درمی‌آیند. بنابراین، یک قانون جدید برای ثبات در مبدأ و مقابله با سوئیچینگ معرفی شد [۵].

مقاله حاضر مبتنی بر یک استراتژی جدید کنترلی است، که نقص سیستم‌های کنترل VSC را بهبود می‌بخشد. در این ساختار از نرم بی‌نهایت بردار حالت، جهت افزایش نرخ همگرایی و کاهش سوئیچینگ استفاده شده است. برتری مهم یک سیستم کنترل ساختار متغیر، حساسیت آن به تغییرات پارامترها و اختلالات خارجی است [۶]. بیش از دو دهه است که از روش ساختار متغیر برای بدست آوردن پایداری مقاوم در الکترونیک قدرت و درایوها استفاده شده است. فکر استفاده از تئوری کنترل مد لغزشی (Sliding Mode Control) به وسیله‌ی یک دانشمند روسی عنوان شد [۷]. کنترل مد لغزشی (SMC) روشی کارا برای کنترل سیستم‌های غیرخطی و با عدم قطعیت [۸] به عنوان یک شیوه کنترل مقاوم، در حضور عدم قطعیت‌های مدل، نوسانات پارامتر و اختلالات خارجی می‌تواند استفاده شود. این روش مبتنی است بر این که سیگنال کنترل می‌تواند از یک مقدار به مقدار دیگر به میزان نامحدود سوئیچ شود [۹]. در این روش حالت‌های سیستم توسط قانون



کنترل روی مسیر از پیش تعیین شده‌ای (خط یا سطح لغزش) قرار می‌گیرند و با دینامیک مشخصی که توسط طراح تعیین می‌شود و می‌تواند غیر از دینامیک سیستم باشد، به سمت نقطه مورد نظر (مبدأ) پیش می‌رود [۱۰]. چترینگ یکی از اشکالات این روش است. این چالش بوسیله‌ی تأخیرهایی که در خود سیستم وجود دارد، تقویت می‌شود. اگر اغتشاش وارد شده به سیستم دارای علامت معین باشد، در هر لحظه با اعمال قانون کنترل معین، می‌توان اثر این اغتشاش را از بین برد. برای از بین بردن یا کم کردن اغتشاش از تابع علامت می‌توان استفاده کرد [۱۱]. مهمترین خواصی که باعث شده است این روش توسعه پیدا کند، دقت زیاد، پاسخ دینامیکی سریع، پایداری خوب، آسانی در پیاده‌سازی و پایداری مقاوم مناسب می‌باشد [۷]. طراحی سیستم‌های ساختار متغیر شامل دو مرحله زیر است:

الف: تعیین سطح کلید زنی به طوریکه پایداری و رفتار مورد نظر تأمین گردد.

ب: تعیین زیر سیستم‌های کنترلی بطوری که مسیر حالت سیستم به سمت یک سطح لغزش مطلوب برود و شرایط لازمه مربوطه را تأمین کند.

سطح لغزش صفحه‌ای است که مسیر حالت بر روی آن هدایت شده و رفتار مطلوب و پایدار ارائه می‌کند [۱۲]. قبل از این که Gao و دیگر همکارانش (۱۹۹۵ میلادی) نظریه‌ی قانونی دستیابی زمان گسسته را ارائه کنند [۱۳]، سه شکل نامعادله در شرایط دستیابی به صورت زیر پیشنهاد شده بود [۴] و [۱۴]:

$$\{s(k+1)-s(k)\}s(k) < 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} [s(k+1)-s(k)]\text{sgn}(s(k)) < 0 \\ [s(k+1)-s(k)]\text{sgn}(s(k)) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Furta از شکل مطابق نوع لیاپانوف شرایط دستیابی پیوسته $v = s^2/2$ ، $v < 0$ استفاده کرد تا حالت گسسته را بدست آورد [۱۵]:

$$v(k+1)-v(k) < 0 \text{ with } v(k) = \frac{1}{2}[s(k)]^2 \quad (3)$$

Gao (۱۹۹۵ میلادی) یک شرط دستیابی را به شکل معادله زیر پیشنهاد کرد:

$$s(k+1) = (1-qT)s(k) - \varepsilon T \text{sgn}(s(k)) \quad (4)$$

که $q > 0$ ، $\varepsilon > 0$ ، $1-qT > 0$ و T دوره‌ی نمونه برداری است. $s(k)$ سطح لغزش، εT و $\text{sgn}(\cdot)$ تابع علامت و k نیز زمان و v نیز تابع لیاپانف است. در میان همه‌ی شرایط دستیابی تئوری Gao کامل‌تر از بقیه به نظر می‌رسد. در انتها یک قانون دستیابی به نام قانون دستیابی با نرخ متغیر در [۱۶] ارائه شد. در هر حال، قوانین دستیابی گذشته یک چالش بزرگ را با خود دارند، و آن نرخ همگرایی است. مسیر این سیستم‌ها در مجاورت مبدأ با توجه به هم‌پوشانی‌ها به نوسان درمی‌آید. بنابراین دقت حالت ماندگار در این سیستم‌های کنترل شده ایده‌آل نیست.

در این مقاله، یک قانون کنترلی جدید برای دستیابی به کارایی بالاتر، در همگرایی به مبدأ پیشنهاد می‌شود. ویژگی اصلی در قانون دستیابی پیشنهاد شده این است که سریع‌تر به تعادل می‌رسد و می‌تواند دقت حالت ماندگار بهتری را در سیستم کنترل شده نسبت به قوانین قبلی تضمین نماید. اساس این استراتژی بکارگیری نرم بی‌نهایت بردار حالت، برای کاهش سطح لغزش در قانون دستیابی می‌باشد. استراتژی کنترل پیشنهادی در کنترل یک موتور القایی سه فاز اعمال گشته، در قالب شبیه‌سازی نتایج تئوری بررسی می‌گردد. این مقاله بصورت زیر تقسیم‌بندی شده است:

بخش اول مقاله به معرفی نظریه‌ی قانون دستیابی پرداخته می‌شود تا مبنا برای تجزیه و طراحی کنترل ساختار متغیر گسسته به‌وجود آید. در ادامه استراتژی کنترل پیشنهاد شده در این مقاله، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش دوم برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی قوانین دستیابی مختلف با نتایج حاصل از استراتژی کنترل پیشنهاد شده، با هم مقایسه شده است. در بخش سوم مقاله به بهینه‌سازی پارامترهای ساختار جدید با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، مقایسه آنها و انتخاب بهترین پاسخ پرداخته می‌شود. سپس الگوریتم ممیتیک معرفی می‌گردد. در

ادامه تابع هزینه تعریف می‌شود. در بخش چهارم کاربرد قوانین دستیابی گذشته و قانون ترکیبی پیشنهادی، بر روی موتور آسنکرون سه فاز بررسی و مقایسه می‌شود. در انتها در بخش یازدهم به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲. نظریه‌ی قانون دستیابی (Reaching law approach)

روش طراحی SMC جدید، که کنترل قانون رسیدن (RLC) نامیده می‌شود، به وسیله‌ی Gao و hung [۳] معرفی شده است. این افراد توانستند یک روش جدید را برای طراحی سیستم‌های (SMC) معرفی کنند. این روش نه تنها شرط رسیدن به خط لغزشی (یا سطح) را به طور مستقیم فراهم می‌کند، بلکه به طور مستقیم ویژگی‌های دینامیکی سیستم در هر مرحله از رسیدن را نشان می‌دهد. از مزیت‌های دیگر شیوه RLC، می‌توان به ساده‌سازی راه‌حل برای کنترل مد لغزشی و فراهم آوردن معیاری برای کاهش چترینگ اشاره کرد. از آنجایی که RLC روشی کاملاً جدید است و SMC یک روش قدیمی و کاملاً شناخته شده است، کاربردهای عملی کمی از روش RLC مربوط به سیستم‌های کنترل موتور، گزارش گردیده است. کنترل قانون رسیدن (RLC) یک رویکرد از طراحی کنترل مد لغزشی (SMC) است. رویکرد قانون رسیدن به طور گسترده در طراحی کنترل ساختار متغیر زمان گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، قانون رسیدن که یک معادله دیفرانسیل است؛ دینامیک تابع سویچینگ $s(x)$ را مشخص می‌کند. معادله دیفرانسیل پایدار جانبی $s(x)$ خودش به خودی خود یک شرط رسیدن است. به علاوه کیفیت دینامیک سیستم VSC در حالت دستیابی با انتخاب پارامترها در معادله دیفرانسیلی می‌تواند کنترل شود. مهمترین ویژگی رویکرد قانون دستیابی این است که بدست آوردن قانون کنترل VSC را بسیار آسان می‌کند. سیستم زمان گسسته زیر را در نظر بگیرید [۱۳]:

$$x(k+1) = Ax(k) + bu(k) \quad (5)$$

که x بردار حالت $n \times 1$ است، A یک ماتریس $n \times n$ است، b یک بردار $n \times 1$ است، u ورودی سیستم است و (A, b) قابلیت کنترل دارند. سطح لغزش به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$s(x) = cx(k) \quad (6)$$

بردار c باید تضمین کند که $cb \neq 0$ است. با طراحی مناسب تابع سویچینگ، پایدار جانبی مد لغزشی VSC تضمین می‌شود. از معادلات (۵) و (۶) داریم:

$$s(k+1) = cAx(k) + cbu(k) \quad (7)$$

از مقایسه این معادله با قانون دستیابی (۴) می‌توان نوشت [۱۳]:

$$cAx(k) + cbu(k) = (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s(k)) \quad (8)$$

با حل کردن آن برای $u(k)$ قانون کنترل ارائه می‌شود:

$$u(k) = u^+(k) = -(cb)^{-1}[cAx(k) - (1 - qT)cx(k) + \varepsilon T \operatorname{sgn}(cx(k))] \quad (9)$$

۳. استراتژی کنترل پیشنهادی

در این مقاله یک استراتژی جدید دستیابی مبتنی بر نرم بی‌نهایت و با اصلاح معادله (۶) به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$s(k+1) = -\varepsilon T \|x(k)\|_\infty \quad (10)$$

که $\|x(k)\|_\infty$ نرم بی‌نهایت بردار حالت x در لحظه k است. با استفاده از معادلات (۷) و (۱۰) قانون کنترل، براساس قانون دستیابی پیشنهادی به صورت زیر بدست می‌آید:

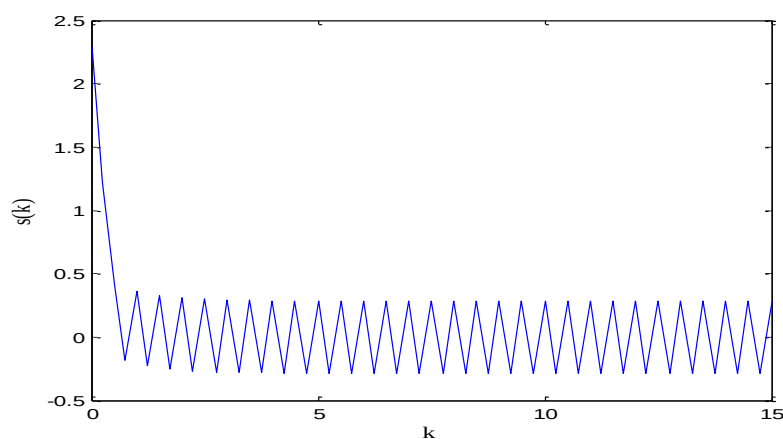
$$u(k) = -(cb)^{-1} [cAx(k) - cx(k) + \varepsilon T \|x(k)\|_{\infty} \operatorname{sgn}(cx(k))] \quad (11)$$

مزیت قانون دستیابی پیشنهاد شده این است که منطقه سوئیچینگ در آن یک بخش (قطاع) است و پایداری در مرکز را می‌توان انتظار داشت و مقدار دامنه‌ی عبوری مسیر سیستم در تناسب با نرم‌بی‌نهایت است. هدف اصلاح و ترکیب قانون دستیابی متداول (۴) با قانون دستیابی پیشنهادی (۱۰) بوده، در نهایت استراتژی کنترل ترکیب شده بدست می‌آید. نقطه سوئیچینگ قوانین کنترل (۹) و (۱۱) بر طبق فرمول زیر تعیین می‌شود:

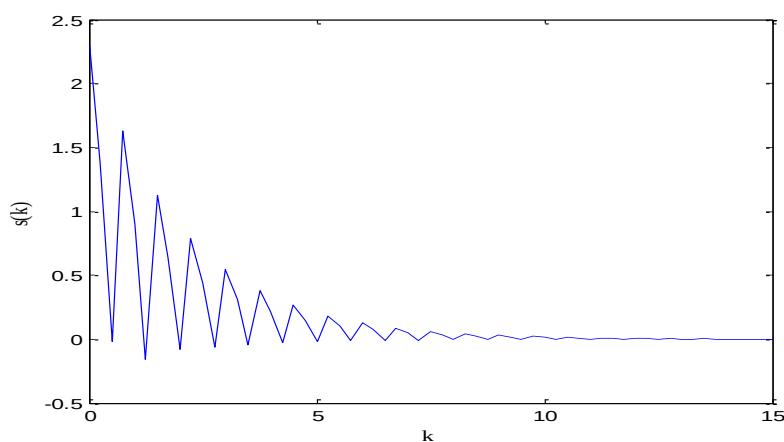
$$\varepsilon T = \varepsilon T \|x(k)\|_{\infty} \quad (12)$$

۴. نتایج شبیه‌سازی عملکرد دینامیکی قوانین دستیابی مختلف

عملکردهای دینامیکی سیستم (۵) با استفاده از قانون دستیابی معمولی و قانون دستیابی متغیر اجرا شده است، که نتایج در شکل (۱) الف و ب نمایش داده شده است.



الف: قانون دستیابی معمولی [۱۶]



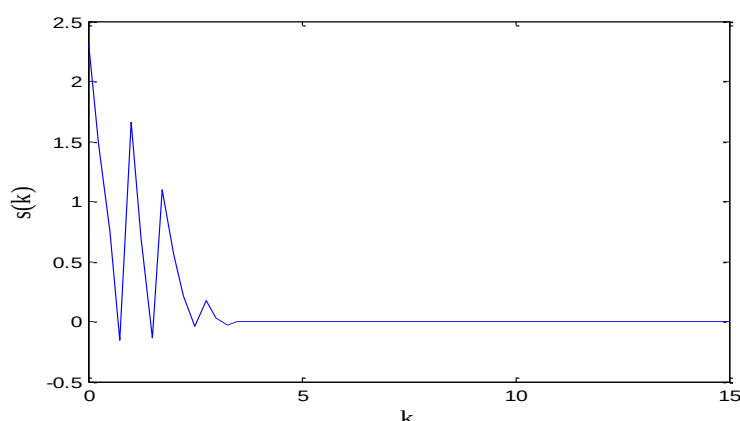
ب: قانون دستیابی متغیر

شکل ۱: عملکرد دینامیکی قوانین دستیابی مختلف

۵. نتایج شبیه سازی استراتژی کنترلی پیشنهادی

عملکرد دینامیکی سیستم (۵) با استفاده از استراتژی کنترلی جدید مبتنی بر نرم بی‌نهایت بردار حالت، اجرا شده است، که نتایج در شکل (۲) نشان داده شده است. بنابراین، استراتژی کنترل معرفی شده، می‌تواند به صورت زیر توصیف شده باشد. که $u_1^\pm$ و $u_2^\pm$ به ترتیب قوانین کنترل (۹) و (۱۱) را ارائه می‌کند.

$$\begin{cases} u = u_1^\pm, & \text{if } \|x(k)\|_\infty > 1 \\ u = u_2^\pm, & \text{if } \|x(k)\|_\infty \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$



شکل ۲: استراتژی کنترل پیشنهاد شده

همانطور که از شکل‌های مذکور مشخص است، زمان همگرایی در قانون دستیابی متغیر بیش از ده ثانیه است. حال آنکه سرعت همگرایی با اعمال قانون پیشنهاد شده، به شکل چشم‌گیری افزایش یافته، و همگرایی در زیر پنج ثانیه انجام شده است. ضمناً میزان سوئیچینگ در قانون جدید کاهش بیشتری پیدا کرده است. با دقت بیشتر در پاسخ حالت ماندگار قانون رسیدن قبلی و قانون پیشنهادی این نتیجه حاصل می‌شود که دقت حالت ماندگار در سیستم کنترل شده متداول مناسب نیست. این در حالی است که پاسخ حالت ماندگار سیستم کنترلی پیشنهاد شده در بهترین حالت خود قرار دارد. در واقع نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استراتژی کنترل پیشنهادی مبتنی بر نرم بی‌نهایت، میرایی بهتری را نسبت به قوانین دستیابی گذشته می‌تواند ارائه کند.

۶. بهینه‌سازی پارامترهای استراتژی کنترل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند

در این مقاله سعی شده که از چند الگوریتم هوشمند بطور موازی برای حل مسئله استفاده شود. لذا در کنار الگوریتم ممیتیک (Memetic: MA) از الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) و الگوریتم کرم شبتاب (Firefly Algorithm) و الگوریتم رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm) نیز استفاده شده است. در ادامه، کارکرد الگوریتم‌های اخیر برای بدست آوردن پارامترهای مهم ساختار پیشنهادی جدید بررسی و مقایسه می‌گردد.

۱-۶ الگوریتم ممیتیک (MA)

الگوریتم‌های ممیتیک از مفهوم "مم" الهام گرفته شده است که نخستین بار توسط داو کینز ارائه گردید. مم تشریح کننده واحدی از تکامل فرهنگی است که می‌تواند سازگاری محلی را نشان دهد. الگوریتم ممیتیک نمونه‌ای از الگوریتم‌های

تکاملی است که برای حل یک مسأله بهینه‌سازی، با افزودن جستجوی محلی به یک الگوریتم ژنتیک، منجر به دستیابی، پاسخ‌های بهتر در زمان کمتر می‌شود. در واقع الگوریتم‌های ممیتیکی یک نوع الگوریتم ژنتیکی ترکیبی محسوب می‌شوند [۱۴].

۶-۱-۱ تابع هدف

اولین قدم برای تخمین پارامترها، در نظر گرفتن تابعی از پارامترهاست، تا توسط الگوریتم‌ها بهینه شود. این تابع به صورت مرتبه دوم زیر تعریف می‌شود:

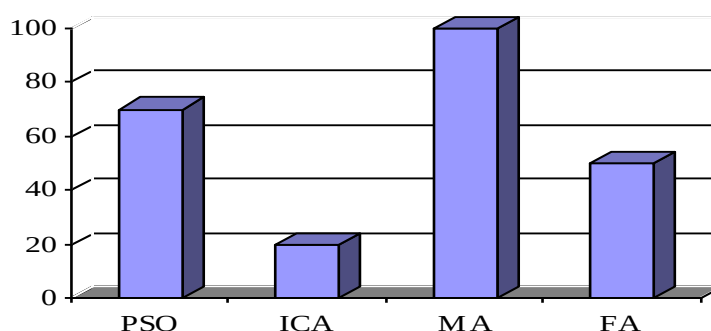
$$f = \frac{(s(k))^T s(k))}{k} \quad (14)$$

تابع هدف در الگوریتم‌ها، وظیفه‌ی یافتن کمترین خطا را بر عهده دارد. در صورتی که تابع هدف به مینیمم مقدار خود برسد، کمترین سطح لغزش و بهترین پاسخ را خواهیم داشت. حال از الگوریتم‌های هوشمند در شرایط یکسان و با تعداد اعضای جمعیت برابر برای مینیمم‌سازی تابع هدف استفاده می‌گردد. نتایج حاصل از الگوریتم‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: نتایج پارامترها با توجه به چهار الگوریتم هوشمند

	εT	qT	F
MA	0.25	0.89	0
PSO	0.26	0.78	1.054×10^{-29}
ICA	0.24	0.75	6.572×10^{-24}
FA	0.24	0.59	1.617×10^{-27}

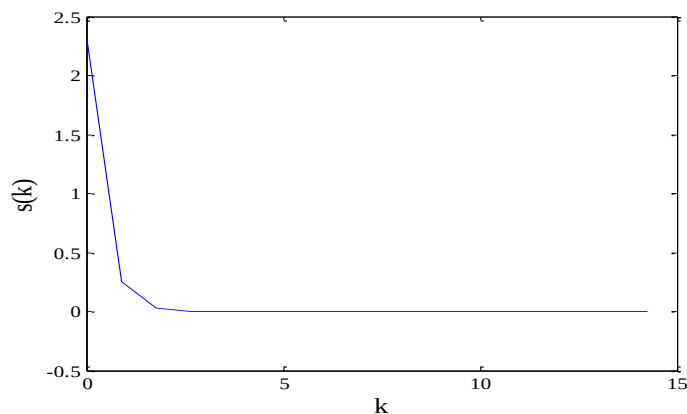
همانطور که از جدول ۱ مشخص است الگوریتم ممیتیکی توانسته تابع هزینه را به کمترین مقدار خود یعنی صفر برساند. بنابراین بهترین مقدار، برای پارامترهای مذکور بدست آمده است. در نتیجه MA به عنوان الگوریتم کارا تر انتخاب شده، و نتایج حاصل از این الگوریتم بر روی استراتژی کنترل پیشنهاد شده اعمال می‌شود. نمودار ۱ کارایی الگوریتم‌ها را نمایان می‌کند.



نمودار ۱: مقایسه الگوریتم‌های بکار رفته



نمودار بالا با توجه به نتایج جدول ۱ رسم شده است. این نمودار نشان دهنده برتری الگوریتم ممیتیک در حل این مسئله می‌باشد. در نهایت، استراتژی کنترل پیشنهاد شده با بکارگیری نرم بی‌نهایت بردار حالت، و نیز الگوریتم ممیتیک، به عنوان یک قانون ترکیبی جدید، کارایی بالاتری را نسبت به قوانین دستیابی گذشته از خود نشان داده است. در نهایت با اعمال الگوریتم ممیتیک بر روی ساختار کنترلی پیشنهاد شده، نتیجه زیر بدست آمد.



شکل ۳: نمایش سطح لغزش در قانون ترکیبی جدید

نتیجه بدست آمده از قانون ترکیبی جدید سطح سوئیچینگ را کاملاً از بین برده و زمان همگرایی را تا ۲ ثانیه کاهش داده است، در این حالت سرعت همگرایی نسبت به قانون رسیدن اولیه تا پنج برابر افزایش یافته است. این بهترین شرایط همگرایی ممکن است، که با استراتژی کنترل پیشنهاد شده به همراه الگوریتم ممیتیک بدست آمده است.

۷. کاربرد در موتور آسنکرون سه فاز

کلیه مدل فضای حالت موتور القایی با جریان روتور و استاتور به عنوان متغیرهای حالت به صورت زیر است [۱۷]:

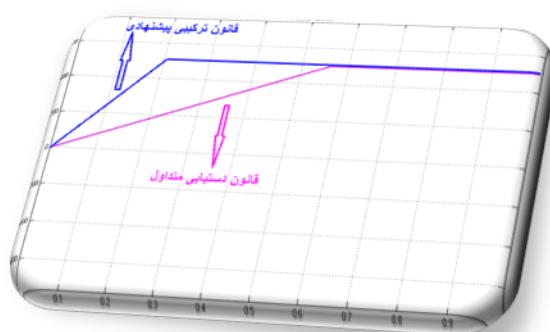
$$\begin{bmatrix} \dot{p}i_{sd} \\ \dot{p}i_{sq} \\ \dot{p}i_{rd} \\ \dot{p}i_{rq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \times \begin{bmatrix} -R_s L_r & L_m^2 \omega_r & L_m R_r & L_m L_r \omega_r \\ -L_m^2 \omega_r & -R_s L_r & -L_m L_r \omega_r & L_m R_r \\ L_m R_s & -L_m L_s \omega_r & -L_s R_r & -L_s L_r \omega_r \\ L_m L_s \omega_r & L_m R_s & -L_s L_r \omega_r & L_s R_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$T_{em} - T_r = \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{B}{P} \omega_r \quad (16)$$

قانون دستیابی متداول و قانون ترکیبی پیشنهاد شده، به وسیله نرم افزار Matlab/simulink بر روی موتور آسنکرون سه فاز شبیه‌سازی شده و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. در جدول ۲ پارامترهای موتور القایی مورد استفاده در شبیه‌سازی آورده شده است [۱۷].

جدول ۲: پارامترهای موتور القایی

Machine parameter	Value
Rated Power (KW)	7.5
Rated Voltage (V)	220
Rated torque (Nm)	40
Frequency (HZ)	60
$R_s (\Omega)$	0.15
$R_r (\Omega)$	0.17
$L_s (mH)$	0.035
$L_m (mH)$	0.0338
$L_r (mH)$	0.035
$J (kg / m)$	0.14
Pole number	4



شکل ۴: کاربرد قانون دستیابی متداول و قانون ترکیبی جدید بر روی موتور آسنکرون سه فاز (سرعت روتور)

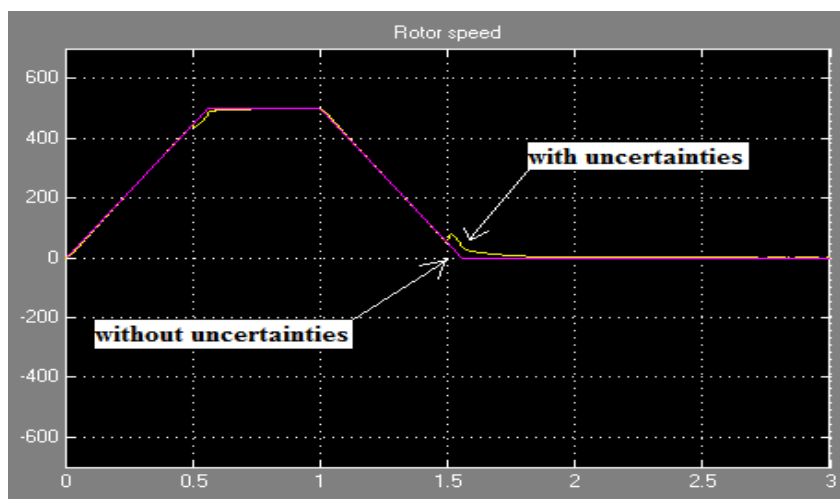
در این مقاله با بکارگیری قانون ترکیبی جدید، حالت‌های سیستم سریع‌تر به صفر همگرا شده‌اند، در این صورت همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، خروجی سرعت مقدار مطلوب را سریع‌تر دنبال می‌کند.

✓ از مزایای کنترل کننده پیشنهادی میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- الف: تنظیم کننده سرعت دور موتور در کمترین زمان ممکن روی مقدار مشخص از RPM
- ب: کاهش ضربه های مکانیکی و در نتیجه افزایش طول عمر مفید قسمت مکانیکی
- ب: روشن و خاموش نمودن موتور بدون نیاز به قطع و وصل برق اصلی
- ج: حفاظت موتور در مقابل افزایش ولتاژ و جلوگیری از آسیب دیدن موتور
- د: راه اندازی نرم موتور بدون چترینگ و هیچگونه ضربه به قسمت‌های مکانیکی مثل کوپلینگ‌ها، گیربکس‌ها، تسمه‌ها، زنجیرها و ... و در نتیجه افزایش طول عمر مفید موتور و سایر قسمت‌های مکانیکی را به دنبال خواهد داشت.

۸. بررسی عدم قطعیت در استراتژی کنترلی پیشنهادی

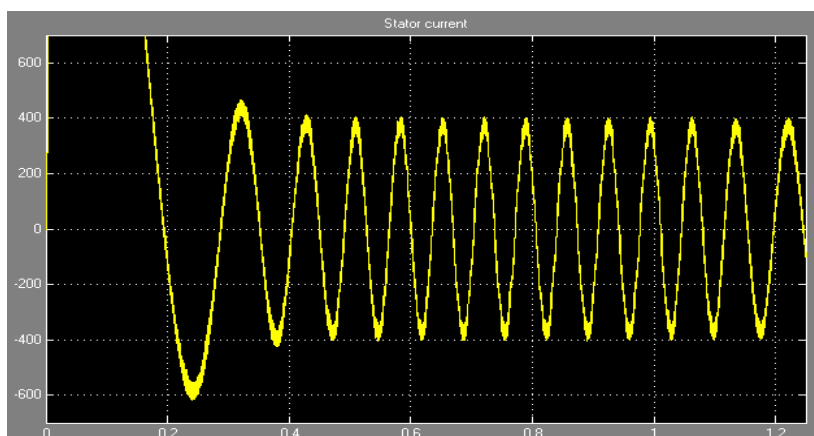
با اضافه کردن عدم قطعیت به سیستم و بررسی آن نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به سیگنال پله مطلوب، زمانی که عدم قطعیت‌هایی از جمله اغتشاشات در بار وجود دارد، واضح است که سیستم می‌تواند موقعیت سیگنال مورد نظر را سریع ردیابی کند، این ردیابی با دقت بالا، چه در حضور عدم قطعیت‌ها و چه در نبود آنها انجام می‌شود. افزایش و کاهش سرعت استاتور، در حضور و عدم حضور عدم قطعیت، در شکل ۵ نشان داده شده است.



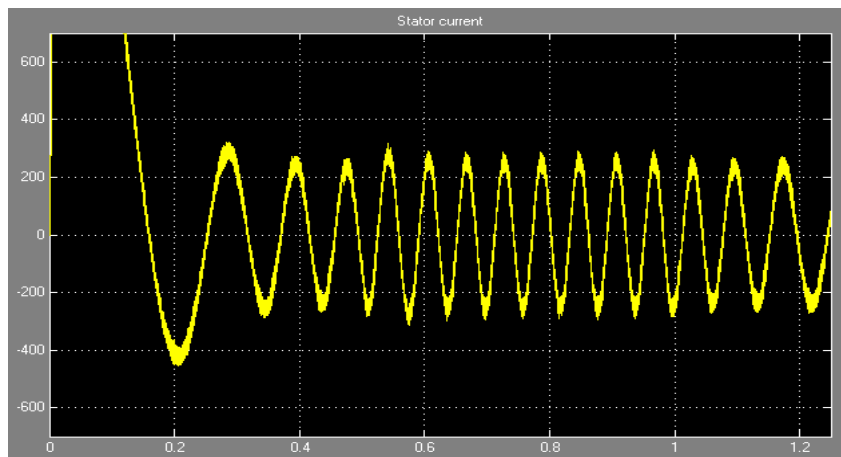
شکل ۵: نتایج شبیه سازی، سیستم همراه با عدم قطعیت و بدون آن.

۹. بررسی جریان استاتور در استراتژی کنترلی پیشنهادی

در مقایسه بین جریان استاتور با اعمال استراتژی کنترلی پیشنهادی و قانون دستیابی معمولی، نتایج شبیه سازی در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است کنترل کننده طوری طراحی شده است که می‌تواند هارمونیک‌های بالا (هارمونیک ۷، ۹ و ۱۱) را ضعیفتر کند و سیگنال جریان، رپل کمتری داشته باشد.



الف: قانون دستیابی متداول



ب: استراتژی کنترلی پیشنهادی

شکل ۶: بررسی جریان استاتور در استراتژی کنترلی پیشنهادی و قانون دستیابی متداول

۱۰. نتیجه گیری

بهینه سازی انرژی در الکتروموتورهای صنعتی باعث جلوگیری از اتلاف انرژی و پایین آوردن مخارج در اثر اتلاف انرژی می‌شود. استفاده از کنترل کننده دور موتور یکی از بهترین روشها برای بهینه سازی انرژی در الکتروموتورهای صنعتی است. در این مقاله راهکار جدیدی برای کنترل ساختار متغیر، با بکارگیری نرم بی‌نهایت بردار حالت و الگوریتم ممیتیک ارائه گردید. در ابتدای مقاله نتایج مربوط به قانون دستیابی متغیر را دیدیم، که در آن زمان همگرایی در حدود ۱۰ ثانیه بود، در ادامه با استفاده از استراتژی کنترل پیشنهاد شده در این مقاله، این زمان به نصف کاهش یافت، و در نهایت با استفاده از استراتژی پیشنهاد شده به همراه الگوریتم ممیتیک (قانون ترکیبی)، سوئیچینگ سطح از بین رفته و زمان همگرایی به ۲ ثانیه کاهش یافت. این مقاله توانسته با بهبود قانون رسیدن، زمان همگرایی را پنج برابر کاهش دهد. الگوریتم کنترل ترکیبی پیشنهاد شده، برای کنترل سیستم موتور آسنکرون سه فاز به کار رفته است. نتایج شبیه سازی اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهند. با سریعتر همگرا شدن حالت‌های سیستم به صفر، سیستم پایدار و خروجی بهتری را از خود نشان می‌دهد. در بین الگوریتم‌های هوشمند بکار رفته در این مسئله، الگوریتم ممیتیک کارایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است. در نتیجه استفاده از کنترل کنند پیشنهادی دور موتور، امکان اعمال تغییرات لازم در سرعت موتور فن و یا پمپ را بطور دائم فراهم آورده و بدین ترتیب می‌توان با توجه به فرآیند مورد نظر از اتلاف انرژی ایجاد شده در تنظیم کننده های مکانیکی جلوگیری نمود.

۱۱. مراجع

- [۱] Klamka, J., "Controllability of nonlinear discrete systems", Advances in Systems Science, 2001.
- [۲] Xia, B., Zuo, J. and Pu, Y., "Varied structure process predictive coordination control & its application", Advances in Systems Science and Applications, Vol. 3 No. 1, pp. 143-9, 2003.
- [۳] Zhao, H., Liu, G., Li, S. and Xu, J., "Composite control for permanent magnet linear motor servo system with ANN compensation", Advances in Systems Science and Applications, Vol. 3 No. 2, pp. 238-44, 2003.

[۴] Dote, Y. and Hoft, R.G., "Microprocessor based sliding mode controller for DC motor drives", paper presented at the IAS Annual Meeting, Cincinnati, OH, 1980.

[۵] Yao, Q., Song, L. and Wen, H., "Proportional-constant-variable rate control for discrete-time variable structure systems", Control & Decision, Vol. 15 No. 3, pp. 329-32 (in Chinese), 2000.

[۶] Lin, Y., "Systemic yoyo model and applications in Newton's, Kepler's laws, etc. ", Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics, Vol. 36 Nos 3/4, pp. 484-516, 2007.

[۷] C.Namuduri, P.C.Sen, "A Servo-Control System Using a Self Controlled Synchronous motor (SCSM) Industry Applicationns", Vol.IA-23, NO-2, March/April 1987, pp(283-295).

[۸] J.Y. Hung, W.B. Gao and J.C. Hung, "Variable structure control :A survey, " IEEE Trans

[۹] Ind. Electron., vol. 40, no. 1, pp. 2-22, 1993

[۱۰] J.J.E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control . Prentice - Hall, 1991.

[۱۱] B.K.Bose, "Power Elecrtonnics & Variable Frequency Drive", Book, IEEE Press 1989.

[۱۲] Duk-Heon, kim Hack-seong, kim jae-mun kim, "induction motor servo system Using Variable Structure Control", IEEE Trans. On Automatic Control, PP (997-082). 1996.

[۱۳] کوروش رحمانی، گئورگ قره پتیان، مهدی کراری "طراحی کنترل کننده ساختار متغیر فازی در اتصال HVDC جهت بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت AC-DC" دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران-ایران. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران ، ۱۱(۱):۱۹-۲۶؛ بهار ۱۳۸۳.

[۱۴] Gao, W., Wang, Y. and Homaifa, A. (1995), "Discrete-time variable structure control systems", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 42, pp. 117-22 .

[۱۵] Sarpturk, S.Z., Istefanopulos, Y. and Kaynak, O. (1987), "On the stability of discrete-time sliding mode control systems", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 32, pp. 930-2.

[۱۶] Furuta, K. (1990), "Sliding mode control of a discrete system", Syst. Contr. Lett., Vol. 14, pp. 145-52.

[۱۷] Yanhui Lai, "A combined discrete Variable Structure Control algorithm and its application to brushless DC servomotors" IEEE Trans, pp.973-979, vol. 39 No,6, 2010.

[۱۸] S.M. Gadoue, D. Giaouris, J.W. Finch "Artificial intelligence-based speed control of DTC induction motor drives-A comparative study" IEEE Trans, 210-219, 2019.

[۱۹] Innovations in Power Distribution in Cement Plant, by: Robert 2.8 Smith, JR. IEEE Transactions on IA, Vol:2016, No:5 Page 769.