

تاریخ دریافت مقاله: تیر ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: دی ۱۳۹۲

کنترل موتور BLDC با استفاده از کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری

ابوالفضل حلوائی نیاسر^۱، صابر فلاحتی علی‌آبادی^۲

^۱استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

halvaei@kashanu.ac.ir

^۲دانشجوی دکترای مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

s_falahati@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، روش جدیدی برای کنترل سرعت موتورهای BLDC ارائه می‌شود. در این روش، از کنترل کننده PID مرتبه کسری (FOPID) جهت کنترل موتور BLDC استفاده شده است. ویژگی کنترل کننده PID مرتبه کسری، مقاومت و سادگی ساختار نسبت به سایر کنترل کننده‌های مقاوم است. جهت تعیین پارامترهای کنترل کننده FOPID از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) که دارای سرعت و دقت بالایی در حل مسائل بهینه‌سازی است، بهره گرفته شده است. برای بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها با توابع هدف مختلف در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته و نتایج حاصل با نتایج به‌دست آمده از کنترل کننده PID سنتی مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌ها عملکرد مطلوب کنترل کننده‌ی پیشنهادی را تأیید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: موتور BLDC، کنترل سرعت، کنترل کننده PID مرتبه کسری، الگوریتم رقابت استعماری.

۱. مقدمه

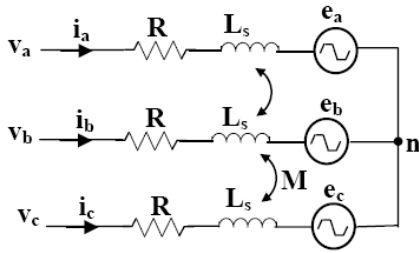
حسگر و هزینه پیاده‌سازی بالاتر نسبت به کنترل کننده PID، سبب شده است تا روش‌های مذکور به‌طور فراگیر استفاده نشوند و استفاده از کنترل کننده PID به‌دلایل ذکر شده، همچنان تداوم داشته باشد.

اخیراً استفاده از کنترل کننده PID مرتبه کسری^۲ (FOPID) به‌دلیل ساختار انعطاف‌پذیرتر نسبت به PID سنتی برای کنترل سیستم‌های مختلف در مقالات متعددی معرفی شده است [۱۰، ۹]. در این مقاله، برای کنترل سرعت موتورهای BLDC از کنترل کننده FOPID استفاده شده است. برای به‌دست‌آوردن پارامترهای کنترل کننده FOPID از روش بهینه‌سازی و الگوریتم رقابت استعماری^۳ (ICA) بهره گرفته شده است. اخیراً از الگوریتم رقابت استعماری به‌دلیل سرعت و دقت بالای آن در حل مسائل بهینه‌سازی، در مقالات مختلفی بهره گرفته شده است [۱۱-۱۳]. در این مقاله، جهت به‌دست‌آوردن پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی از این الگوریتم استفاده شده است. به‌منظور بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، توابع هدف متعددی در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌ها به‌ازای آن‌ها در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از کنترل کننده‌ی پیشنهادی و کنترل کننده‌ی PID سنتی، عملکرد مطلوب کنترل کننده PID مرتبه کسری را در کنترل سرعت موتور BLDC نشان می‌دهد. در ادامه‌ی مقاله و در بخش دوم، سیستم درایو موتور BLDC مورد مطالعه معرفی می‌شود. در بخش سوم، اصول عملکرد کنترل کننده FOPID بیان می‌شود. در بخش چهارم، به‌طور خلاصه الگوریتم رقابت استعماری معرفی شده و در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی‌ها آورده می‌شوند.

موتورهای BLDC دارای مزایایی از قبیل سهولت در کنترل همانند موتورهای DC، ساختار ساده، چگالی توان و گشتاور بالا، طول عمر زیاد، نگهداری کم‌هزینه و تنظیم سرعت خوب هستند [۱، ۲]. یکی از موضوعات مطرح در کنترل موتورهای BLDC، تنظیم و کنترل سرعت آن‌ها در کاربردهای سرعت متغیر است.

درایو الکتریکی موتور BLDC با عملکرد بالا نیاز به کنترل کننده‌های دقیق و سریع دارند. کنترل کننده‌ی متعارف PID به‌دلیل سادگی در طراحی و پیاده‌سازی، به‌طور وسیع در کاربردهای مختلف استفاده شده است [۳]؛ اما عملکرد کنترل کننده PID به‌مقدار پارامترهای تناسب-انتگرال-مشتق آن وابسته است و با تغییر نقطه کار سیستم، از جمله اعمال بار و تغییرات پارامترهای موتور و همچنین کاربردهای سرعت متغیر که سرعت موتور در محدوده‌ی وسیعی باید تنظیم شود، کنترل کننده PID کارایی دلخواه را ندارد. برای غلبه بر ناتوانی‌های کنترل کننده PID استفاده از روش‌های کنترل غیرخطی، نظیر روش کنترل مقاوم [۴] روش‌های کنترل تطبیقی [۵]، کنترل کننده مد لغزشی [۶] و روش‌های خطی‌سازی با فیدبک [۷] مورد توجه قرار گرفته است. همچنین انعطاف‌پذیری سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی سبب شده است تا ساختارهای مختلفی از آن‌ها در کنترل درایوهای الکتریکی از جمله درایو موتور BLDC طراحی و به‌کار برده شوند [۸]. این کنترل کننده‌ها از حیث مقاومت نسبت به تغییرات بار و تغییرات پارامترهای سیستم و همچنین ردیابی سرعت، عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به کنترل کننده PID دارند؛ اما پیچیدگی ساختاری این روش‌ها، نیاز به تعداد بیشتر

۲. درایو موتور BLDC

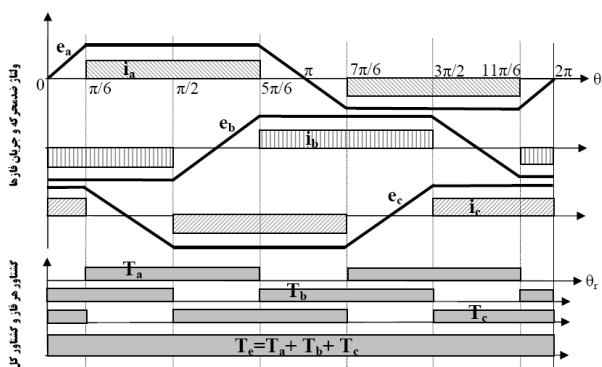


شکل (۲): مدل مداری موتور BLDC سه فاز

که در آن Z_p تعداد زوج قطب‌های موتور است. سرعت الکتریکی موتور (ω_r) از معادله حرکت دورانی نیوتن به دست می‌آید:

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B_f \omega_r \quad (۳)$$

در این رابطه T_L گشتاور بار بوده و J, B_f نیز به ترتیب ضریب اصطکاک بار و ممان اینرسی ارجاعی به محور روتور هستند [۱۴]. شکل (۳) شکل موج‌های ولتاژ و جریان هر فاز در موتور BLDC سه فاز در حالت ایده‌آل را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، در موتور BLDC، متفاوت با موتورهای سنکرون آهن‌ربای دائم (PMSM)، شکل ولتاژهای ضدمحرکه فازها به صورت دوزنقه‌ای هستند و کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر نیز به نحوی انجام می‌شود تا جریان‌های فازها به صورت شبه مربعی شوند؛ در نتیجه، طبق رابطه (۲) گشتاور موتور همواره ثابت خواهد ماند.



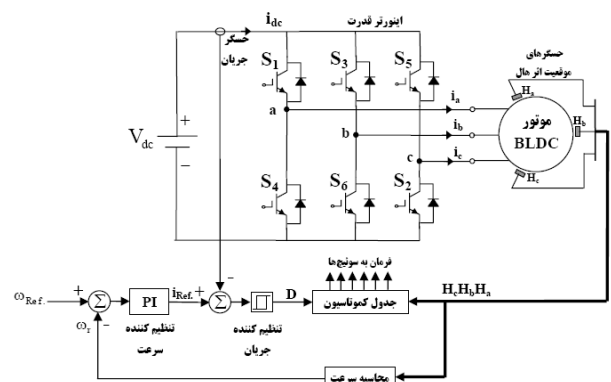
شکل (۳): شکل موج‌های ولتاژ ضدمحرکه و جریان فازها در موتور BLDC

سیستم کنترلی موتور BLDC تحت بررسی در این مقاله، در شکل (۱) آورده شده است. در این ساختار، از اینورتر شش سوئیچه برای کنترل موتور BLDC استفاده شده است. در این روش، مقدار اختلاف سرعت مرجع با سرعت موتور به دست می‌آید و حاصل، از یک کنترل‌کننده‌ی سرعت که در اینجا FOPID است، عبور می‌کند. در ساختار تحت بررسی در این مقاله، از جریان لینک dc برای کنترل عملکرد موتور BLDC استفاده شده است. شکل (۲)، مدل مداری موتور BLDC سه فاز را نشان می‌دهد [۱۴]. در این مدل، فرض می‌شود که هر سه فاز کاملاً متعادل بوده و اشباع نیز وجود ندارد؛ لذا معادلات ولتاژ به صورت ذیل خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (۱)$$

در معادله فوق v_{an}, v_{bn}, v_{cn} ، ولتاژهای ترمینال استاتور نسبت به نقطه ستاره موتور، e_a, e_b, e_c ، ولتاژهای ضدمحرکه فازها، M, L_s نیز به ترتیب اندوکنانس خودی و متقابل فازهای استاتور هستند. گشتاور الکترومغناطیسی روی محور روتور نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_e = \frac{Z_p}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (۲)$$



شکل (۱): درایو موتور BLDC به روش کنترل جریان لینک dc

۳. اصول عملکرد کنترل کننده FOPID

که در آن

$$\omega_k = \omega_l \left(\frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{(k+n+0.5+0.5r)/(2n+1)} \quad (7)$$

$$\omega'_k = \omega_l \left(\frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{(k+n+0.5-0.5r)/(2n+1)} \quad (8)$$

$$K = \left(\frac{\omega_h}{\omega_l} \right)^{\frac{r}{2}} \prod_{k=-n}^n \omega_k / \omega'_k \quad (9)$$

می باشند.

۴. الگوریتم رقابت استعماری

امروزه الگوریتم رقابت استعماری، به دلیل سرعت و دقت بالای آن در دستیابی به پاسخ‌های مسئله، محبوبیت زیادی یافته است. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان امپریالیست انتخاب شده و باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند. امپریالیست‌ها بسته به قدرت خود، این مستعمرات را با روندی خاص به سمت خود می‌کشند. مراحل الگوریتم رقابت استعماری به‌طور خلاصه به صورت زیر است [۲۲]:

۴-۱. شکل‌دهی امپراطوری‌های اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن جوابی بهینه برحسب متغیرهای مدنظر مسئله است. یک آرایه از متغیرهای مسئله که باید بهینه شوند، ایجاد می‌شود. در الگوریتم ژنتیک این آرایه، کروموزوم و در الگوریتم رقابت استعماری، کشور نامیده می‌شود. در یک مسئله بهینه‌سازی با ابعاد N_{var} ، یک کشور، یک آرایه به طول $I \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{country} = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}]$$

که در آن $P_i : i = 1, 2, \dots, N_{var}$ متغیرهایی هستند که باید بهینه شوند.

برای شروع الگوریتم، تعدادی کشور اولیه ($N_{country}$) ایجاد می‌شوند تا تعداد N_{imp} استعمارگر از بهترین اعضای این

کنترل کننده PID مرتبه کسری یک ساختار مناسب با مرتبه

کسری است که برای اهداف کنترلی به کار گرفته می‌شود. این

کنترل کننده را پودلابنی برای اولین بار در سال ۱۹۹۹ معرفی کرد

[۱۵]. یک FOPID با پنج پارامتر، شامل بهره تناسبی، بهره

انتگرالی، بهره مشتقی، مرتبه انتگرالگیری و مرتبه مشتق‌گیری

مشخص می‌شود. معادله دیفرانسیل یک کنترل کننده $PI^\lambda D^\delta$

مرتبه کسری به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D_t^{-\lambda} e(t) + k_D D_t^\delta e(t) \quad (4)$$

تابع انتقال FOPID با تبدیل لاپلاس به دست می‌آید و برابر

است با:

$$G_c(s) = k_p + k_i s^{-\lambda} + k_D s^\delta \quad (5)$$

طراحی FOPID شامل تعیین سه پارامتر k_p ، k_i و k_D و دو

مرتبه λ و δ است که لزوماً عدد صحیحی نیستند. روش‌های

طراحی متفاوتی برای این نوع کنترل کننده معرفی شده است، از

جمله: توزیع قطب [۱۶]، استراتژی حوزه فرکانس [۱۷]،

طراحی فضای حالت [۱۸] و دو طبقه یا استراتژی ترکیبی

[۱۹]. در این مطالعه، برای یافتن پارامترهای کنترل کننده

FOPID از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است.

تکنیک‌ها و روش‌های تقریب‌سازی مختلفی برای دستیابی به

مدل‌های گسسته یا پیوسته مدل‌های مرتبه کسری وجود دارد.

یکی از روش‌های مذکور، روش oustaloup است [۲۰]. در این

مقاله، از تقریب مرتبه پنجم oustaloup استفاده شده است. در

این روش، تابع $H(s) = s^r$ به صورت زیر تقریب زده می‌شود

[۲۰ و ۲۱]:

$$H(s) = K \prod_{k=-n}^n \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (6)$$

۴-۴. جابه‌جایی موقعیت مستعمره و استعمارگر

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از استعمارگر برسند (به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت استعمارگر، تولید می‌کنند). در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض می‌کنند و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه می‌یابد و این بار این کشور استعمارگر جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند.

۴-۵. رقابت استعماری

قدرت یک امپراطوری به صورت قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن تعریف می‌شود. هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، در جریان رقابت‌های استعمارگری حذف خواهد شد. این حذف‌شدن، به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد؛ بدین معنی که به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست می‌دهند و امپراطوری‌های قوی‌تر، این مستعمرات را تصاحب می‌کنند و بر قدرت خویش می‌افزایند.

۴-۶. سقوط امپراطوری‌های ضعیف

در جریان رقابت‌های استعمارگری، خواه ناخواه امپراطوری‌های ضعیف به تدریج سقوط می‌کنند و مستعمراتشان به دست امپراطوری‌های قوی‌تر می‌افتد. شروط متفاوتی را می‌توان برای سقوط یک امپراطوری در نظر گرفت. در الگوریتم پیشنهادشده، یک امپراطوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. مراحل مختلف الگوریتم رقابت استعماری در فلوچارت شکل (۴) آورده شده است [۲۲].

جمعیت انتخاب شوند. باقیمانده کشور (N_{col}) مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هرکدام به یک امپراطوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه بین استعمارگرها، به هرکدام از آنها، تعدادی از مستعمرات (متناسب با قدرت استعمارگر) نسبت داده می‌شود.

۴-۲. سیاست جذب: حرکت مستعمره‌ها به سمت استعمارگر

سیاست همگون‌سازی (جذب) با هدف تحلیل فرهنگ و ساختار اجتماعی مستعمرات در فرهنگ حکومت مرکزی انجام می‌گرفت. در راستای این سیاست، کشور مستعمره، به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر، حرکت می‌کند و به موقعیت جدید کشانده می‌شود. x عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (یا هر توزیع مناسب دیگر) است. اگر فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شود، معمولاً برای d داریم:

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

که در آن β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به ۲ می‌باشد. وجود ضریب $\beta \geq 1$ باعث می‌شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود. همچنین در کنار این حرکت، انحراف زاویه‌ای کوچکی نیز با توزیع یکنواخت به مسیر حرکت افزوده می‌شود.

۴-۳. انقلاب؛ تغییرات ناگهانی در موقعیت یک کشور

در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابه‌جایی تصادفی کشوری مستعمره به موقعیت تصادفی جدیدی مدل‌سازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از افتادن در دره‌های محلی بهینگی نجات یابد که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آن را به محدوده بهینگی می‌برد.

۵. نتایج شبیه سازی

همانطور که قبلاً نیز بیان شد، برای تعیین پارامترهای دو کنترل کننده FOPID و PID از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. محدوده ضرائب بین ۱۰- تا ۱۰+ و محدوده مرتبه مشتق گیری و انتگرال گیری بین ۰ تا ۱/۵ در نظر گرفته شده است. بهینه سازی ها با سه تابع هدف مختلف ذیل صورت گرفته است:

$$J_1 = \text{ITAE} = \int_0^T t |e| dt \quad (10)$$

$$J_2 = \text{ITSE} = \int_0^T t e^2 dt \quad (11)$$

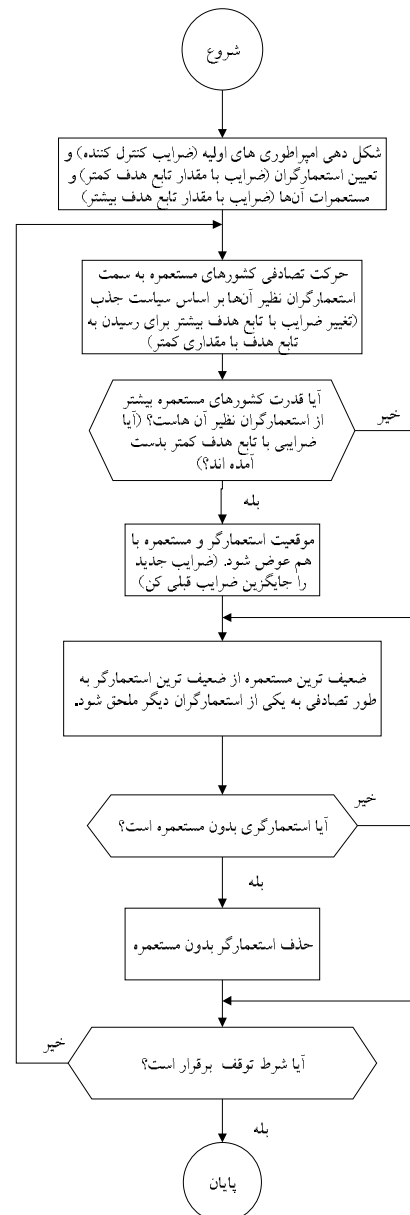
$$J_3 = \text{ISTSE} = \int_0^T t^2 e^2 dt \quad (12)$$

در همه ی شبیه سازی ها، سرعت مرجع برابر با ۱۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شده است. لازم به ذکر است که در این مقاله برای پیاده سازی PID، مقدار δ و λ در تابع $G(s)$ برابر ۱ قرار داده شده است (در تابع $H(s)$ ۱ قرار داده شده است). مقادیر پارامترهای موتور و الگوریتم رقابت استعماری در ضمیمه آورده شده است. شکل (۵) شکل موج سرعت موتور را به ازای مقادیر به دست آمده از تابع هدف ITAE نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، شکل موج سرعت خروجی موتور با کنترل کننده FOPID دارای خطای حالت ماندگار کمتری نسبت به کنترل کننده PID است و پاسخ مطلوب تری را به دست می دهد.

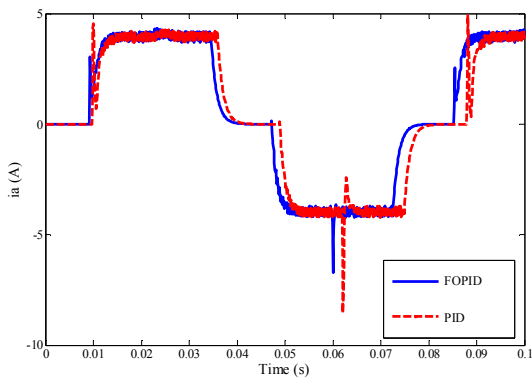
در شکل (۶)، گشتاور موتور نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، پاسخ کنترل کننده FOPID نسبت به PID بهتر می باشد، به گونه ای که دامنه ی اعوجاج گشتاور به دست آمده از کنترل کننده ی FOPID دارای دامنه ی کمتری نسبت به گشتاور ناشی از کنترل کننده ی PID است.

در شکل (۷)، جریان های هر سه فاز آورده شده است. می توان مشاهده کرد که کنترل جریان فازها نیز با استفاده از کنترل کننده FOPID نسبت به PID بهتر صورت گرفته است و در نتیجه ریبیل گشتاور کمتری ایجاد شده است.

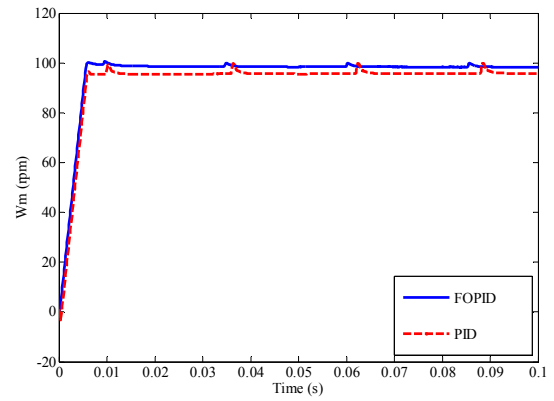
شکل (۸) و (۹) به ترتیب شکل موج های سرعت موتور را به ازای مقادیر به دست آمده از دو تابع هدف J_2 و J_3 نشان می دهند. همان طور که در این شکل ها می توان مشاهده کرد، سرعت خروجی موتور با کنترل کننده FOPID به ازای مقادیر به دست آمده از هر دو تابع هدف، نسبت به کنترل کننده PID سنتی بهتر می باشد، به گونه ای که FOPID دارای زمان پاسخ سریع تر، خطای حالت ماندگار کمتری نسبت به PID است.



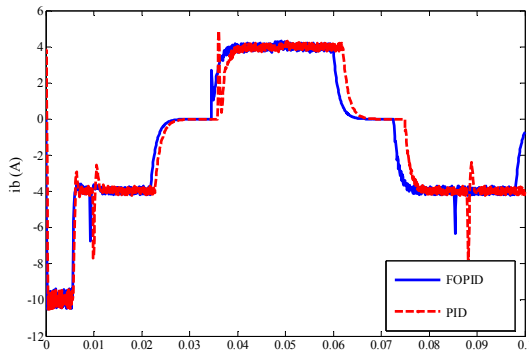
شکل (۸): فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری



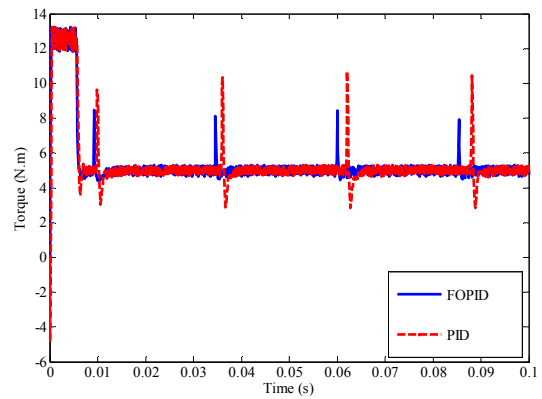
الف



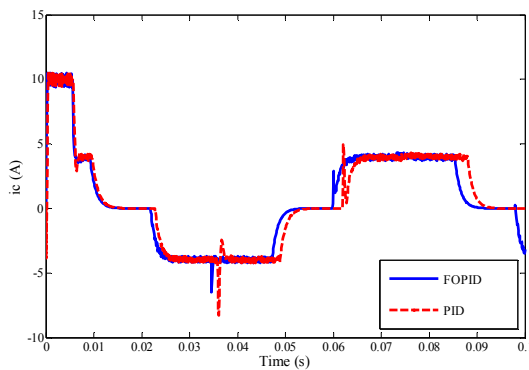
شکل (۵): سرعت خروجی موتور به‌ازای مقادیر به‌دست‌آمده از تابع J_1



ب



شکل (۶): گشتاور موتور



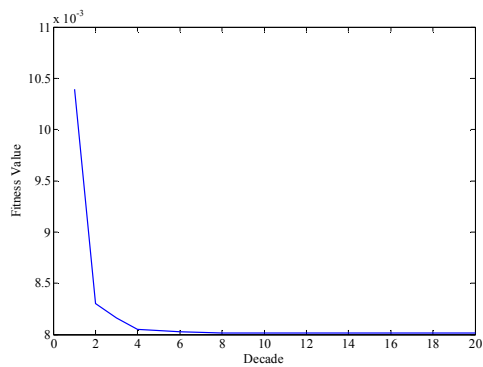
ج

شکل (۷): شکل موج جریان سه فاز موتور. الف) فاز a ب) فاز b ج) فاز c

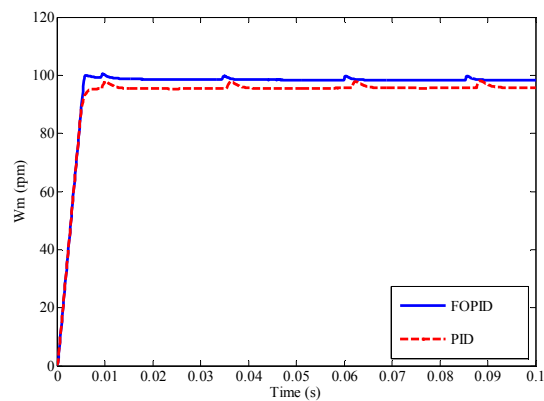
خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول می‌توان دید همه‌ی توابع هدف به‌ازای کنترل‌کننده‌ی FOPID به مقدار کمتری نسبت به PID رسیده‌اند که نشان از برتری FOPID به PID دارد. نمودار همگرایی فرآیند بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌های FOPID و PID به‌ازای تابع هدف J_1 به‌ترتیب در شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) در شکل (۱۰) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت همگرا شدن در کنترل‌کننده FOPID بیشتر از کنترل‌کننده PID است.

جدول (۱): نتایج شبیه سازی

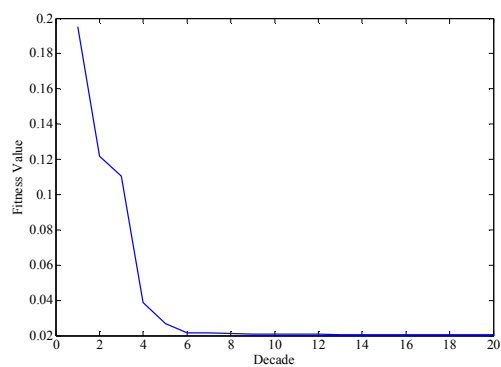
Fitness Function	Controller	Kp	Ki	Kd	Δ	Λ	Fitness Value
ITAE	FOPID	10	10	10	0	0.1094	0.0080
	PID	10	10	-0.003	1	1	0.0207
ITSE	FOPID	10	10	10	0	0.0945	0.0401
	PID	9.77	10	0.0018	1	1	0.1159
ISTSE	FOPID	10	10	10	0.0003	0.0607	0.0009
	PID	10	10	0.0344	1	1	0.0053



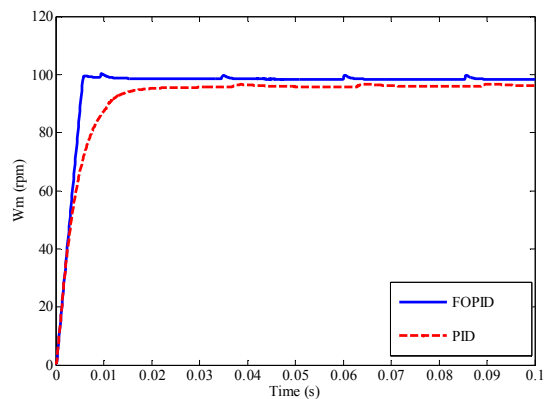
الف



شکل (۸): سرعت خروجی موتور به ازای مقادیر به دست آمده از تابع هدف J_2



ب



شکل (۹): سرعت خروجی موتور به ازای مقادیر به دست آمده از تابع هدف J_3

شکل (۱۰): نمودار همگرایی کنترل کننده های الف (FOPID) و ب (PID)

ضمایم:

جدول (۲): پارامترهای موتور BLDC

P_n	180 W
K_e	0.066 V/krpm
T_n	5.7 N.M
J	0.0005 kg.m ²
K_t	1.25 N.m/A
K_e	0.066 V/rpm
L	0.001 mH
M	0.25 mH
V_{dc}	60 V

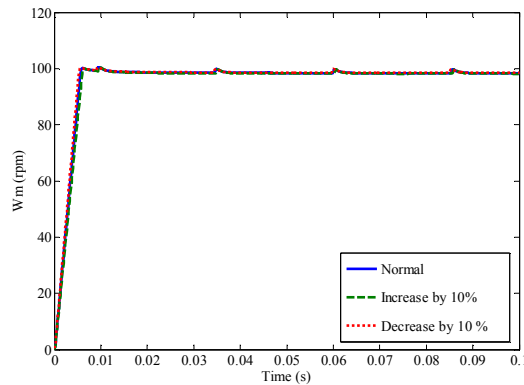
جدول (۳): پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری

Number of countries	30
Number of empires	2
Maximum of decades	20
B	2
ξ	0.1
Probability of revolution	0.1

مراجع

- [1] Krishnan, R., *Permanent-Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, John-Wiley Press, 2002.
- [2] Ozturk, S.B., Toliyat, H.A., "Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-sinusoidal Back-EMF", IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp. 165-171, 2007.
- [3] Lin, C.L., Jan, H.Y., "Multi objective PID control for a linear brushless DC motor: an evolutionary approach", IEE Proc. of Electric Power Applications, Vol. 149, No. 6, pp. 397-406, Nov. 2002.
- [4] Dobra, P., Trusca, M., Lazea, G., "Robust controller for a brushless DC motor based on the gain and phase margin", IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), pp. 197-202, 2002.
- [5] Sozer, Y., Kuafman, H., Torrey, D.A., "Direct Model Reference Adaptive Control of Permanent Magnet Brushless Dc Motors", IEEE International Conference on Control Applications (CCA), pp. 633-638, 1997.

برای بررسی میزان مقاوم بودن کنترل کننده FOPID فرض می کنیم که میزان گشتاور بار در یک مرحله ۱۰ درصد افزایش و در مرحله بعد ۱۰ درصد کاهش یابد. در شکل (۱۱) عملکرد کنترل کننده FOPID در هر دو حالت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، کنترل کننده FOPID دارای پاسخ مقاوم خوبی در برابر تغییرات داده شده، می باشد.



شکل (۱۱): پاسخ مقاوم کنترل کننده FOPID به تغییرات بار

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، از کنترل کننده FOPID برای کنترل سرعت موتور BLDC استفاده شده است. جهت تعیین پارامترهای کنترل کننده از بهینه سازی و الگوریتم رقابت استعماری بهره گرفته شده و شبیه سازی ها به ازای سه تابع هدف مختلف در محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB صورت گرفته است. به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی شبیه سازی ها با کنترل کننده PID سنتی نیز انجام پذیرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی ها، عملکرد مطلوب کنترل کننده ی پیشنهادی را در کنترل سرعت موتور BLDC نشان دادند. همچنین نشان داده شد که با استفاده از کنترل کننده ی FOPID می توان به مقدار تابع هدف کمتری نسبت به PID رسید. برای بررسی میزان مقاوم بودن کنترل کننده FOPID، تغییرات گشتاور بار به میزان ۱۰ درصد افزایش و کاهش به موتور اعمال شد و مشاهده شد که کنترل کننده ی پیشنهادی، دارای پاسخ مقاوم مطلوبی می باشد.

- [6] Choi, H.S., Park, Y.H., Cho, Y., Lee, M., "Global sliding-mode control", IEEE Control Systems Magazine, pp. 27-35, June 2001.
- [7] Hu, J., Burk, T., Dawson, D., "Nonlinear tracking controllers for brushless DC motors", IEEE Industry Applications Society (IAS), pp. 480-487, 1994.
- [8] Halvaei Niasar, A., Moghbelli, H., Vahedi, A., "ANFIS-Based Controller with Fuzzy Supervisory Learning for Speed Control of 4-Switch Inverter Brushless DC Motor Drive", IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 1323-1327, 2006.
- [9] Karimi Ghartemani, M., Zamani, M., Sadati, N., Parniani, M., "An Optimal Fractional Order Controller for an AVR System Using Particle Swarm optimization Algorithm", Conference on Power Engineering Large Engineering Systems, pp. 244-247, 2007.
- [10] Tang, Y., Cui, M., Hua, C., Li, L., Yang, Y., "Optimum design of fractional order $PI^{\delta}D^{\delta}$ controller for AVR system using chaotic ant swarm", Expert System Applications, Vol. 39, No. 8, pp. 6887-6896, 2012.
- [11] Karami, A., Rezaei, E., Shahhosseni, M., Aghakhani, M., "Optimization of heat transfer in an air cooler equipped with classic twisted tape inserts using imperialist competitive algorithm", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 38, pp. 195-200, 2012.
- [12] Kaveh, A. Talatahari, A. S., "Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm", Computers & Structures, Vol. 88, pp. 1220-1229, 2012.
- [13] Nazari-Shirkouhi, S., Eivazy, H., Ghodsi, R., Rezaei, K., Atashpaz-Gargari, E., "Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the imperialist competitive algorithm", Expert Systems with Applications, Vo. 37, No. 12 7615-7626, 2010.
- [14] Halvaei Niasar, A., Moghbelli, H., Vahedi, A., "Modeling and Simulation Methods for Brushless DC Motor Drives", International Conf. on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), pp.05-11/05-17, 2005.
- [15] Podlubny, I., "Fractional-order systems and $PI^{\delta}D^{\delta}$ Controllers", IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 44, No. 1, pp. 208-214, 1999.
- [16] Petras, I., "The fractional order controllers: methods for their synthesis and application", Journal of Electrical Engineering, Vol. 50, No. 9-10, pp. 284-288, 1999.
- [17] Vinagre, B.M., Podlubny, I., Dorack, L., Feliu, V., "On fractional PID controllers: a frequency domain approach", IFAC Workshop on Digital Control-PID", Terrassa, 2000.
- [18] Dorcak, I., Petras, I., Kostical, I., Terpak, J., "State-space controller design for the fractional-order regulated systems", International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 15-20, 2001.
- [19] Chengbin, M., Hori, Y., "The application of fractional order PID controller for robust two-inertia speed control", International Power Electronic and Motion Control Conference, Vo. 3, pp. 1477 - 1482, 2004.
- [20] Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., Nanot, F.M., "Frequency-band complex non-integer differentiator: characterization and synthesis", IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Application, Vol. 47, No. 1, pp. 25-39.
- [21] Mehra V., Srivastava, S., Varshney, P., "Fractional-Order PID Controller Design for Speed Control of DC Motor", International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, pp. 422 - 425, 2010.
- [22] Gargari, E.A., Lucas, C., "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 4661-4667, 2007.