

Original Research

Designing of PI λ D δ controller for PMBLDC motor using metaheuristic algorithms

Morteza Abdolhosseini¹, Rohollah Abdollahi^{2*}, Meraj Rajaei³

^{1,2} Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Faculty of Qom, Qom Branch, Technical and Vocational University (TVU), Qom, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Dr. Shariaty, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 10.10.2020

Revised: 12.02.2020

Accepted: 01.15.2021

Keyword:

PMBLDC

Fractional Order Proportional
Integral Derivative (FOPID)
Controller

Metaheuristic algorithm

Genetic algorithm

Differential Evolutionary
algorithm

ABSTRACT

Today, vehicles are increasingly equipped with brushless DC permanent magnet motors due to the nature of sensorless operation. BLDC motor controllers can operate the effective speed and position control in a closed loop feedback system without a position sensor mounted on the shaft. The fractional order PID controller is one of the most common examples of a feedback control algorithm used in many control processes. The BLDC sensorless motor drive has better optimal control over the rotor speed and accuracy with the help of PID fractional controller (FOPID). In this paper, using two meta-heuristic optimization algorithms, the FOPID control parameters including sitting time, rising time, overload and step response stability of the mentioned system were optimized. The results show that the PMBLDC stepper motor response using the proposed genetic algorithm provides better control performance compared to other available methods.

***Corresponding Author:**

Rohollah Abdollahi

Email: abdollahi@tvu.ac.ir

طراحی سیستم کنترل کننده PID مرتبه کسری برای کنترل سرعت موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم بدون جاروبک (PMBLDC) با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

مرتضی عبدالحسینی^۱، روح اله عبداللهی^{۲*}، معراج رجایی^۳

۱- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی برق، آموزشکده فنی پسران قم، دانشگاه فنی و حرفه ای استان قم، ایران.
۳- استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده دکتر شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه ای استان تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه وسایل نقلیه، به‌طور روزافزونی با موتورهای DC مغناطیس دائم بدون جاروبک به‌واسطه ماهیت عملکرد بدون سنسور، مجهز شده‌اند. کنترل‌کننده‌های موتور BLDC می‌توانند کنترل سرعت و موقعیت مؤثر را بدون سنسور موقعیت نصب‌شده روی شفت، در سیستم فیدبک حلقه بسته عمل کنند. کنترل‌کننده PID مرتبه کسری، از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی، کاربرد دارد. درایو موتور بدون سنسور BLDC کنترل بهینه بهتری روی سرعت روتور و دقت آن با کمک کنترل‌کننده PID مرتبه کسری (FOPID) دارد. در این مقاله با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، پارامترهای کنترل‌کننده FOPID شامل زمان نشست، زمان خیز، اورشوت و پایداری پاسخ پله سیستم مذکور بهینه شده است. نتایج نشان می‌دهد پاسخ پله موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های موجود، عملکرد کنترلی مناسب‌تری را ارائه می‌کند.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶

کلید واژگان:

PMBLDC
Fractional Order Proportional
Integral Derivative (FOPID)
Controller
الگوریتم‌های فراابتکاری
الگوریتم ژنتیک
الگوریتم تفاضل تکاملی

*نویسنده مسئول: روح اله عبداللهی

پست الکترونیکی:

abdollahi@tvu.ac.ir

مقدمه

امروزه، موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم بدون جاروبک (PMBLDC) به علت دارا بودن مزایای زیادی نسبت به سایر موتورهای مورد استفاده در صنعت، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. موتور PMBLDC، موتور مغناطیس دائم است و سیم‌پیچ استاتور آن مشابه موتورهای معمولی می‌باشد. در این موتور برای کموتاسیون به جاروبک نیاز نیست بلکه این کار به وسیله ادوات الکترونیکی انجام می‌شود. این موتورها می‌توانند یک یا چند قطب داشته باشند. هنگام کار کردن با این موتورها، اینورتر نقش کموتاتور را ایفا می‌کند. از نظر فنی موتور PMBLDC در مقایسه با موتورهای DC معمولی و القایی از مزایای شامل سادگی سیستم کنترل و حداقل نیاز به سنسور، عمر طولانی و نیاز کم به نگهداری، مشخصه گشتاور-سرعت مناسب، پاسخ دینامیکی مناسب، بازده بالا، عملکرد بدون نویز، محدوده سرعت بالا و بالا بودن نسبت گشتاور تولیدی به حجم موتور برخوردار است [۱].

ریاضیات مرتبه کسری (FOC)، از قرن‌ها پیش از محاسبات سیستم مرتبه صحیح ایجاد شده‌اند. لیوویل، اولین مطالعه در مورد FOC را در سال ۱۸۳۲ انجام داد و گرونولد در سال ۱۸۶۷ مطالعات خود را بر سیستم مرتبه کسری ادامه داد. ریمان در سال ۱۸۹۲ تجزیه و تحلیل نظری و توسعه سیستم یکپارچه‌سازی به صورت مرتبه کسری را به دست آورد. سیستم مرتبه کسری، عملکرد بهتری نسبت به سیستم مرتبه صحیح در خصوص اجرای مفاهیم اساسی و پدیده‌های با مدل زمان واقعی دارد. ساختار منعطف کنترلر FOPID را پادلونبی بیان کرده است که در واقع گسترش مفهوم کنترل کننده PID سنتی می‌باشد. کنترل کننده FOPID برای سیستم کنترل فرایند، سیستم کنترل توزیع شده (DCS) یا کنترل نظارت و کسب اطلاعات (SCADA) و همچنین به‌ویژه در کاربردهای کنترل سرعت موتورهای الکتریکی مناسب است. ویناگر با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای تولید مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده FOPID، مطالعه مفصلی در حوزه آنالیز فرکانس و زمان داشت [۲].

طی سالیان اخیر، کوشش‌هایی برای طراحی کنترل کننده مناسب و بهینه برای موتور PMBLDC انجام شده است [۳-۷]. در این مقالات از روش‌هایی مانند کنترل فازی، سیستم درایو و کنترل کننده PI استفاده شده است. در بسیاری از دستگاه‌های صنعتی از کنترلر PID به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. اگر پارامترهای PID به گونه‌ای تنظیم شده باشد که عملکرد حلقه بسته را به خوبی تضمین کند، می‌تواند برای بسیاری از سیستم‌ها عملکرد مقاوم و قابل اطمینانی را فراهم می‌کند [۸-۹]. کنترل کننده‌های PID و FOPID و همچنین ترکیب آنها با سایر کنترل کننده‌ها همچنان در بسیاری از مقالات جدید برای کنترل سیستم‌ها استفاده می‌شود [۱۰-۱۶]. استفاده از الگوریتم‌های فرایتنکاری، یک روش مناسب برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده FOPID و قابل اجرا روی موتورهای PMBLDC است.

از مزایای کنترل کننده‌های FOPID نسبت به کنترل کننده‌های PID مرتبه صحیح می‌توان به کاهش خطای حالت ماندگار، کاهش نوسانات و اورشوت، کاهش تلاش‌های کنترلی، زمان پاسخ بهتر، مقاومت به تغییر در بهره سیستم (خاصیت ایزو میرایی)، رد اغتشاش خروجی و مشخصات حافظه ذاتی اشاره کرد. کنترل کننده‌های FOPID در چند مکان مانند کنترل سطح مخزن کروی، کنترل سرعت موتور DC جاروبک دار و آهنربا دائمی، کنترل موقعیت سیستم‌های Maglev یا کنترل سیستم‌های آشوبناک آزمایش شده‌اند. الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی روش‌های بهینه‌سازی مؤثر برای کنترل سرعت موتور BLDC بدون سنسور با استفاده از کنترل کننده FOPID است. این الگوریتم‌ها یک تکنیک بهینه‌سازی جستجوی محلی هستند که برای این کار از مقادیر نزدیک به پارامترهای FOPID از طریق همکاری و رقابت بین راه‌حل‌های بالقوه استفاده می‌کنند. الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی تنظیم بهینه پنج پارامتر K_p ، K_i ، K_d ، λ و μ از کنترل کننده FOPID را تعیین می‌کنند [۱۷].

در این مقاله سعی شده است با تنظیم پارامترهای دو الگوریتم بهینه‌سازی و به کارگیری روی سیستم مرتبه دوم PMBLDC، کنترل سرعت مناسب روی این موتورها انجام شود. در این مقاله با استفاده از معیارهای خطا مختلف عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی بررسی شد و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک از لحاظ تابع هزینه و پارامترهای

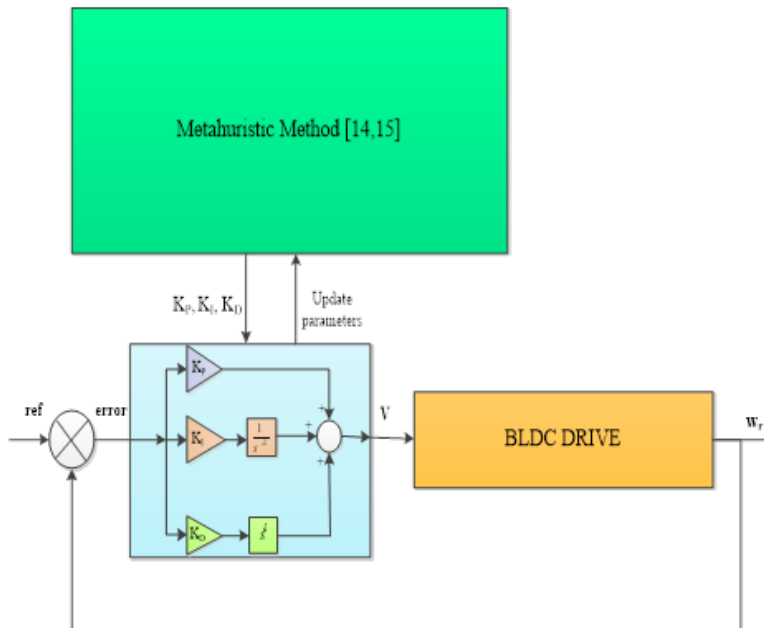
پاسخ پله، بهترین عملکرد را داشته است. در این مقاله، از جعبه ابزار FOMCON در نرم‌افزار متلب برای اجرای کنترل کننده مرتبه کسری استفاده شده است [۱۸]. هدف این مقاله، ارائه یک طرح کنترل جدید با یک کنترل کننده FOPID قابل اجرا برای درایو موتور PMBLDC است. تقریب، تنظیم پارامتر و اجرای کنترلر FOPID در مقاله نشان داده شده است. نتایج، بیانگر بهبود عملکرد گذرا و حالت پایدار سیستم است. مقایسه‌ای با یک کنترل کننده PID معمولی و تجزیه و تحلیل آن برای اثبات اثربخشی طرح کنترل ارائه شده است. اهداف اصلی این مقاله عبارتند از:

۱. مدل‌سازی و طراحی کنترل کننده سرعت موتور PMBLDC مبتنی بر کنترل کننده FOPID
۲. بهینه‌سازی کنترل کننده FOPID از طریق الگوریتم ژنتیک پیشنهادی و سهم آن در بهبود عملکرد کنترل کننده
۳. کاهش زمان نشست، زمان خیز و اورشوت با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی.

معرفی کنترل کننده و سیستم

کنترل کننده FOPID

کنترل کننده FOPID از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار و کنترل دما، کاربرد دارد. کنترل کننده FOPID مقدار «خطا» بین خروجی فرایند و مقدار ورودی مطلوب (setpoint) را محاسبه می‌کند. هدف کنترل کننده، به حداقل رساندن خطا با تنظیم ورودی‌های کنترل فرایند است. کنترل کننده FOPID از سه قسمت مجزا به نام‌های تناسبی (Proportional)، انتگرال‌گیر مرتبه کسری (Integral) و مشتق‌گیر مرتبه کسری (Derivative) تشکیل شده است که هر کدام از آن‌ها سیگنال خطا را به عنوان ورودی می‌گیرند و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت، خروجی آنها با هم جمع می‌شود. خروجی این مجموعه، همان خروجی کنترل کننده FOPID است که برای اصلاح خطا (error) به سیستم فرستاده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. ساختار سیستم کنترل موتور PMBLDC

فرمول استاندارد تابع تبدیل کنترل کننده FOPID به صورت رابطه (۱) است:

$$G_c = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^{\delta} \quad (1)$$

در این مقاله، ضرایب K_p ، K_i ، K_d ، λ و δ با استفاده الگوریتم‌ها فراابتکاری هوشمند، به منظور بهینه کردن تابع هدف طراحی، تنظیم شده است.

مشخصه سیستم موتور PMBLDC

تابع تبدیل سیستم موتور PMBLDC در رابطه (۲) نشان داده شده است [۱۹]. همچنین مشخصات موتور PMBLDC مورد مطالعه در جدول ۱ ذکر شده است:

$$G(s) = \frac{w_r(s)}{V(s)} = \frac{1}{k_e(s^2\tau_m\tau_e + s\tau_m + 1)} = \frac{1}{k_e(s\tau_m + 1)(s\tau_e + 1)} \quad (2)$$

جدول ۱. مشخصات موتور PMBLDC مورد مطالعه [۱۹].

پارامتر	مقدار	
R	2.8750Ω	مقاومت هر فاز
L_a	2.7mH	سلف خودالقایی هر فاز
k_t	0.0042 Nm/A	ثابت گشتاور
k_e	0.0042 V/rad/s	ثابت نیروی ضد محرکه
J	0.0005 Kg-m ²	اینرسی موتور

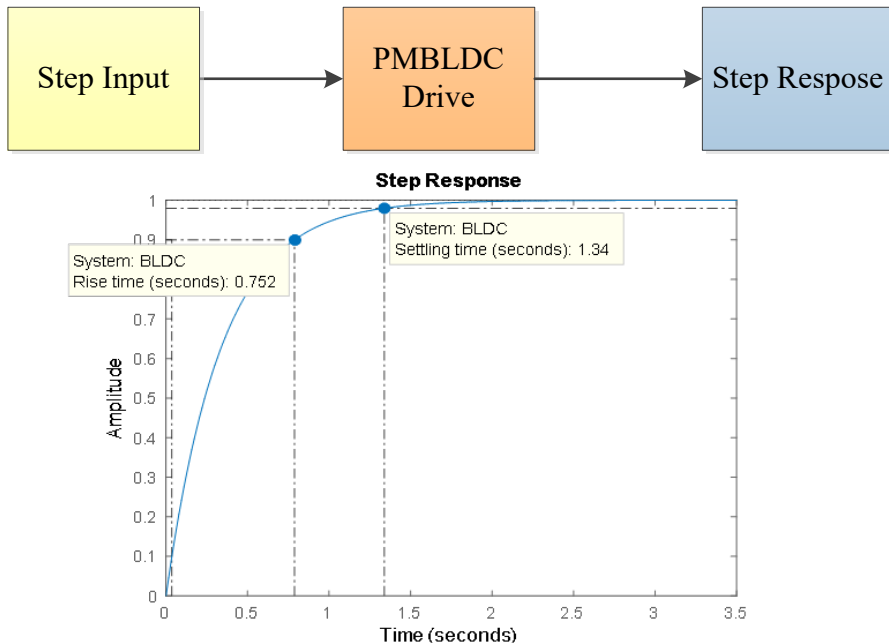
الگوریتم‌های فراابتکاری

یک روش برای حل مسائل بهینه‌سازی این است که تمامی جواب‌های امکان‌پذیر در نظر گرفته و توابع هدف مربوط به آن محاسبه شود و در نهایت، بهترین جواب انتخاب گردد. روشن است که شیوه شمارش کامل، نهایتاً به جواب دقیق مسئله منتهی می‌شود اما در عمل به دلیل زیاد بودن تعداد جواب‌های امکان‌پذیر، استفاده از آن غیرممکن است. با توجه به مشکلات مربوط به روش شمارش کامل، همواره بر ایجاد روش‌های مؤثرتر و کاراتر مانند روش‌های ابتکاری^۱ یا فراابتکاری^۲ یا جستجوی تصادفی^۳ تأکید شده است. روش‌های جستجوی ابتکاری، روش‌هایی هستند که می‌توانند جوابی خوب (نزدیک به بهینه) در زمانی محدود برای یک مسئله ارائه کنند. روش‌های جستجوی ابتکاری عمدتاً بر مبنای روش‌های شمارشی هستند، با این تفاوت که از اطلاعات اضافی برای هدایت جستجو استفاده می‌کنند. این روش‌ها از نظر حوزه کاربرد، کاملاً عمومی هستند و می‌توانند مسائل خیلی پیچیده را حل کنند. عمده این روش‌ها، تصادفی بوده و از طبیعت الهام گرفته شده‌اند. این الگوریتم‌ها به سه دسته کلی الگوریتم‌های بر مبنای هوش جمعی، الگوریتم‌های تصادفی و الگوریتم‌های تکاملی تقسیم می‌شوند. در این مقاله با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری یعنی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تکامل تفاضلی توابع معیار و پارامترهای پاسخ پله سیستم بهینه شده است.

- 1 Heuristic
- 2 Metaheuristic
- 3 Random Method

روش شناسی و معرفی توابع خطا

در این مقاله، مشخصات پاسخ پله سیستم با استفاده از کنترل کننده FOPID مطالعه شده و ضرایب آن به وسیله الگوریتم‌های فراابتکاری تنظیم و بهینه شده است. پارامترهای مهم در پاسخ پله سیستم عبارتند از: زمان خیز^۱، میزان فراجهش^۲، زمان نشست^۳ و پایداری^۴. مشخصه پاسخ پله موتور PMLDC بدون استفاده از کنترل کننده به صورت شکل ۲ است. در این پاسخ مشاهده می‌شود زمان نشست ۱/۳۴ ثانیه، فراجهش صفر درصد و زمان خیز آن ۰/۷۵۲ ثانیه است.



شکل ۲. پاسخ سیستم PMLDC به پله واحد

به طور کلی سیگنال خطا به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$e(t) = u(t) - y(t) \quad (۳)$$

در مقالات، سیگنال خطای تعریف شده در رابطه (۱۱)، به طور گسترده در چهار معیار عملکرد زیر استفاده می‌شوند. این معیارها عبارتند از:

(۱) معیار انتگرال قدر مطلق خطا (IAE) Integral of Absolute value of Error

(۲) معیار انتگرال مجذور خطا (ISE) Integral of Square value of Error

-
- 1 Rise Time
 - 2 Over Shoot
 - 3 Settling Time
 - 4 Stability

۳) معیار انتگرال قدر مطلق خطا با وزن زمانی (ITAE)

۴) معیار انتگرال مجذور خطا با وزن زمانی (ITSE)

فرمول‌های این معیارهای خطا در روابط (۴-۷) بیان شده‌اند [۲۰]. در این روابط t_{ss} زمانی است که پاسخ به حالت ماندگار رسیده است.

$$IAE = \int_0^{t_{ss}} |e(t)| dt \quad (۴)$$

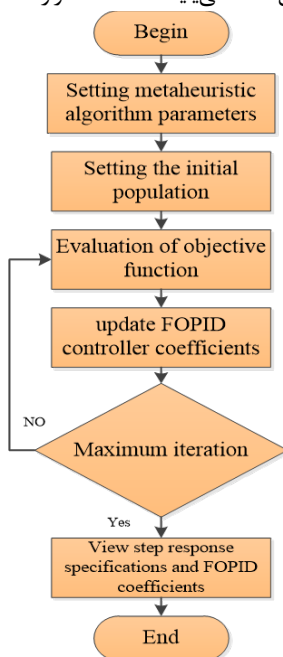
$$ISE = \int_0^{t_{ss}} e^2(t) dt \quad (۵)$$

$$ITAE = \int_0^{t_{ss}} t|e(t)| dt \quad (۶)$$

$$ITSE = \int_0^{t_{ss}} te^2(t) dt \quad (۷)$$

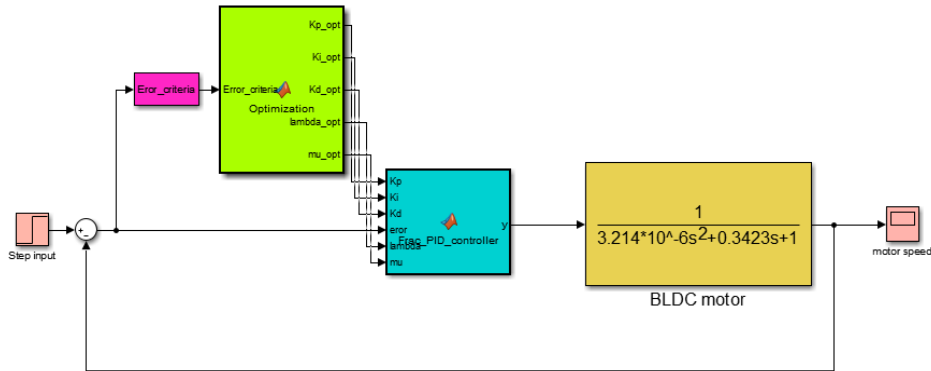
شبیه سازی و ارائه نتایج

شکل ۳ فلوجارت اجرای این مقاله را نشان می‌دهد. ابتدا با انتخاب پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری و تنظیم جمعیت اولیه، تابع هدف ارزیابی می‌شود. با توجه به نتایج ارزیابی، پارامترهای کنترل کننده FOPID، به روز و مجدداً الگوریتم تکرار می‌شود. این الگوریتم تا جایی ادامه می‌یابد که تعداد تکرار مدنظر و در نتیجه خطا به حداقل برسد.



شکل ۳. فلوجارت اجرای الگوریتم

شکل ۴ مدل سیمولینک سیستم کنترل کننده PID مرتبه کسری به منظور کنترل سرعت موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را نشان می‌دهد. در این مدل با توجه به نوع معیار خطا با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA و DE پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری بهینه می‌شود.



شکل ۴. مدل سیمولینک سیستم کنترل کننده PID مرتبه کسری به منظور کنترل سرعت موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

جدول ۲ مشخصات پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری برای دو الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی بیان شده است. پارامترهای مربوط به الگوریتم تکاملی شامل اندازه جمعیت، حداقل مقدار ضریب شتاب، حداکثر مقدار ضریب شتاب و احتمال متقاطع و هم چنین پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل اندازه جمعیت، احتمال متقاطع، عامل تورم متقاطع، احتمال جهش، نرخ جهش، اندازه گام جهش و روش انتخابی می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات الگوریتم‌های فراابتکاری

Parameters of DE algorithm								
Crossover Probability		Maximum Value of Acceleration Coefficient			Minimum Value of Acceleration Coefficient		Population Size	
0.1		0.9			0.1		20	
Parameters of GA algorithm								
Selecti on Pressure	Selecti on Method	Mutati on Step Size Damp	Mutati on Step Size	Mutati on Rate	Mutati on Probability	Crossov er Inflation Factor	Crossov er Probability	Populati on Size
5	Roulette wheel	0.99	0.6	0.1	0.3	0.4	0.7	1000

از این رو، شاخص توقف حداکثر تعداد مجاز برای دستیابی به حداقل مقدار تابع هدف است. در نهایت، با انجام یک تکرار مشخص، برنامه از حلقه خارج می‌گردد و پارامترهای پاسخ پله و هم چنین ضرایب کنترل کننده FOPID تعیین می‌شوند. در این مقاله، با استفاده از دو الگوریتم، تابع هدف، بهینه‌سازی و ضرایب کنترل FOPID تنظیم می‌شوند. فضای جستجوی پارامترهای الگوریتم FOPID به صورت رابطه (۸) در نظر گرفته می‌شود.

$$1 \leq K_p \leq 200, \quad 1 \leq T_i \leq 500, \quad 1 \leq T_d \leq 150, \quad 0 < \lambda, \delta \leq 2 \quad (8)$$

در این مقاله، کنترل کننده مرتبه کسری، اجرا و سپس با استفاده از تقریب استالوپ [۲۱] به مرتبه صحیح تبدیل شده است. تابع تبدیل تقریب استالوپ در رابطه (۹) بیان شده است. پارامترهای این تابع، تبدیل شامل قطب‌ها، صفرها و بهره در رابطه (۱۰) بیان گردیده است. بازه فرکانس مورد انتظار $w \in [w_b, w_h]$ است و N مرتبه تقریب را نشان می‌دهد.

$$A(s) = k \prod_{i=1}^N \frac{s + w'_i}{s + w_i} \quad (9)$$

$$w'_i = w_b w_u^{(2i-1-\alpha)/N}, \quad w_i = w_b w_u^{(2i-1+\alpha)/N}, \quad K = w_h^\alpha, \quad w_u = \sqrt{\frac{w_h}{w_b}} \quad (10)$$

جدول ۳ و اشکال ۵-۷، مقدار تابع هزینه، پارامترهای کنترل کننده FOPID و مشخصات پاسخ پله سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد. در این جدول برای الگوریتم ژنتیک و همچنین برای الگوریتم تکامل تفاضلی هر چهار تابع هزینه ITAE، IAE، ITSE و ITAE در نظر گرفته شده و در هر مورد پارامترهای کنترل کننده مرتبه کسری نیز به دست آمده است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در هر کدام از چهار معیار خطا، الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم تکامل تفاضلی تابع هزینه (Z) مقدار کمتر و عملکرد بهتری دارد.

جدول ۳. مقدار تابع هزینه، ضرایب کنترل FOPID و مشخصات پاسخ پله سیستم حلقه بسته

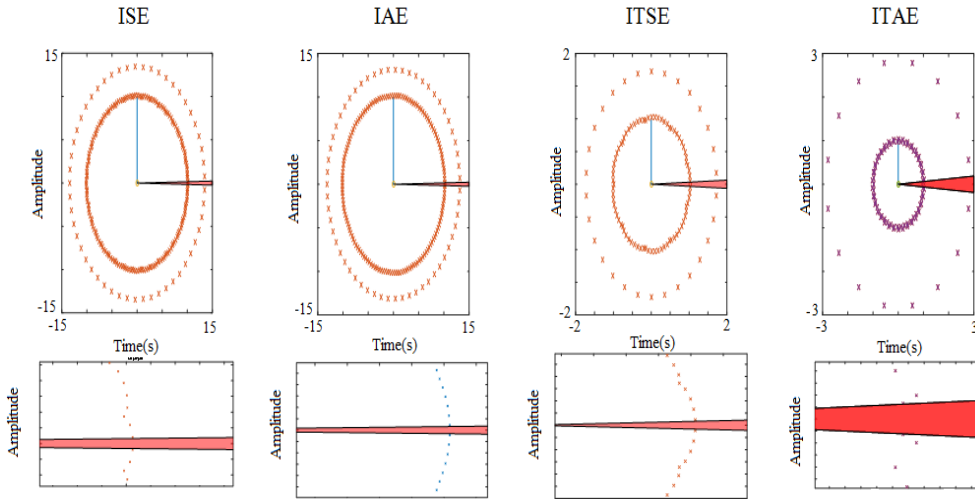
δ	Λ	K_d	K_i	K_p	Z	
1.4688	0.3645	22.7078	111.1140	93.4415	3.9208e-07	ISE (GA)
1.4123	0.1365	34.8495	367.0355	129.9276	5.4308e-07	IAE (GA)
1.3995	0.1814	42.8632	173.2260	168.6936	3.9211e-13	ITSE (GA)
1.3570	1.8053	56.3248	74.0164	162.0778	5.4314e-12	ITAE (GA)
1.6004	0.0109	6.8002	465.8016	11.6419	3.9103e-07	ISE (DE)
1.3035	1.0000e-03	94.1657	58.9362	1.3480	5.4107e-07	IAE (DE)
1.4491	1.0000e-03	27.2739	9.9096	200	3.9009e-13	ITSE (DE)
1.4965	2	1	277.9794	1	4.7206e-11	ITAE (DE)

در این مقاله با توجه به اهمیت شاخص پایداری، با استفاده از سه روش پایداری کنترل کننده، مرتبه کسری بررسی شده است. در روش اول با استفاده از قطب‌های حلقه بسته و در روش دوم و سوم به ترتیب به وسیله نمودار بود^۱ و دیاگرام نایکوئیست^۲ پایداری کنترل کننده پیشنهادی تحلیل شده است. شکل ۵ با استفاده از روش اول وضعیت پایداری موتور PMBLDC با کنترل کننده مرتبه کسری را با در نظر گرفتن چهار تابع خطا نشان می‌دهد. شرط پایداری در سیستم‌های مرتبه کسری، قطب در یک قطاع مشخص است؛ لذا همان طور که در شکل‌های زوم

1 Bode

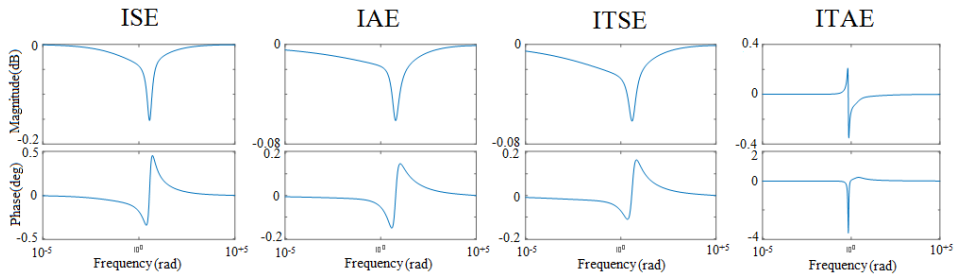
2 Nyquist

شده در قسمت پایینی شکل ۵ مشاهده می‌شود در هیچ حالی، قطبی در قطاع وجود ندارد؛ بنابراین کنترل کننده پیشنهادی، کاملاً پایدار است.



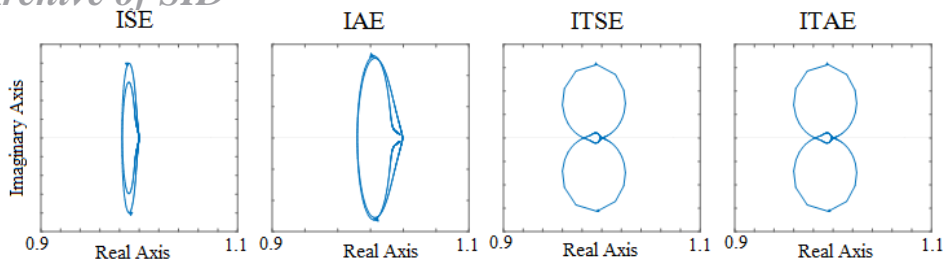
شکل ۵. بررسی پایداری کنترل کننده مرتبه کسری در چهار شاخص خطا

روش دیگری که بتوان به کمک آن، پایداری کنترل کننده پیشنهادی را بررسی کرد، دیاگرام‌های بود و نایکوئیست است که در اشکال ۶-۵ بیان شده است. همان‌طور در دیاگرام بود (شکل ۶) مشاهده می‌شود در هر دو نمودار فاز و اندازه، حالت حدی در فرکانس‌های بالا و پایین محدود است؛ از این رو کنترل کننده، دچار ناپایداری نشده است.



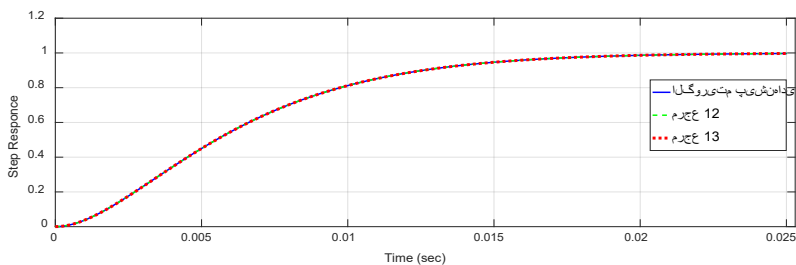
شکل ۶. نمودار Bode برای چهار شاخص خطا

در دیاگرام نایکوئیست شکل ۷ مشاهده می‌شود که در هیچ کدام از شاخص‌های خطا، منحنی نایکوئیست نقطه -1 را دور نزده است و همه نمودارها در بازه 0.9 تا 1.1 می‌باشند؛ لذا شرط پایداری نایکوئیست برای کنترل کننده مرتبه کسری پیشنهادی نیز برقرار است.

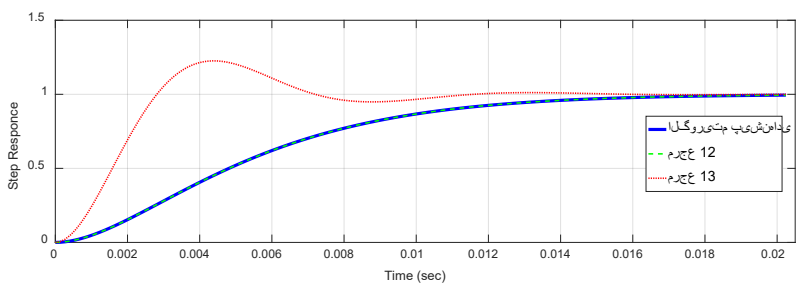


شکل ۷. نمودار نایکوئیست برای چهار شاخص خطا

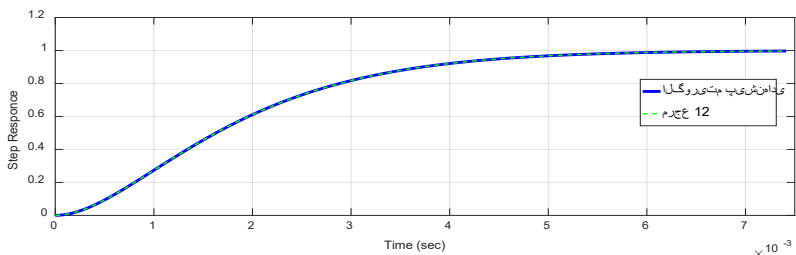
در شکل‌های ۸-۱۱ نتایج پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۲۲] و [۲۳] نشان داده است. این نتایج برای چهار معیار خطا ISE، IAE، ITSE و ITAE به تفکیک رسم شده است.



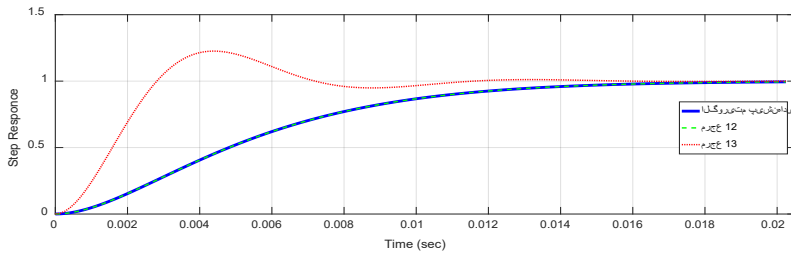
شکل ۸. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۲-۱۳] با معیار ISE



شکل ۹. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۲-۱۳] با معیار IAE

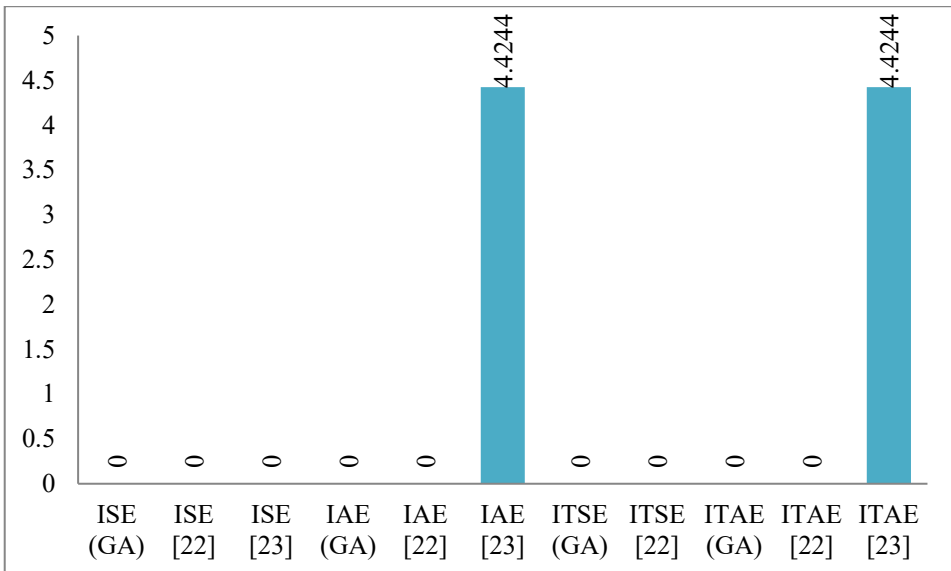


شکل ۱۰. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۲] با معیار ITSE

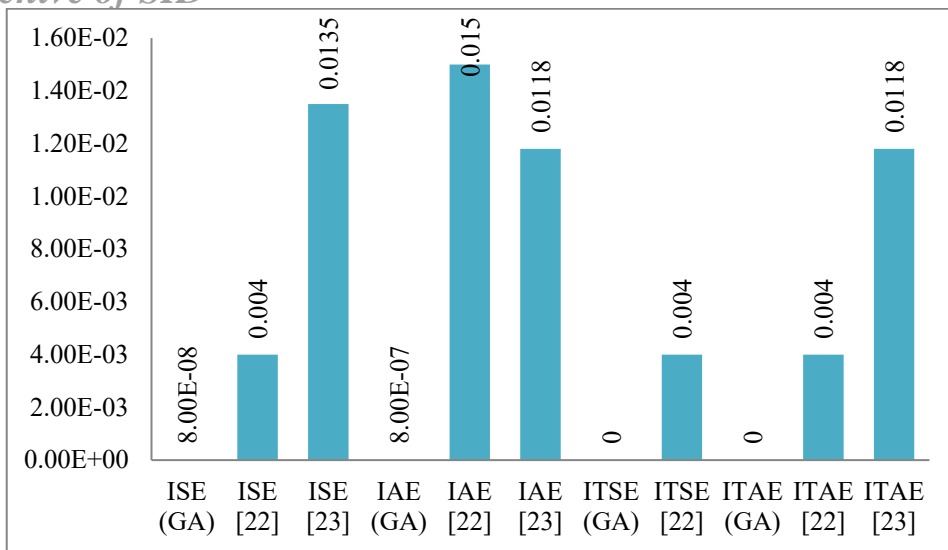


شکل ۱۱. مقایسه پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی با مراجع [۱۲-۱۳] با معیار ITAE

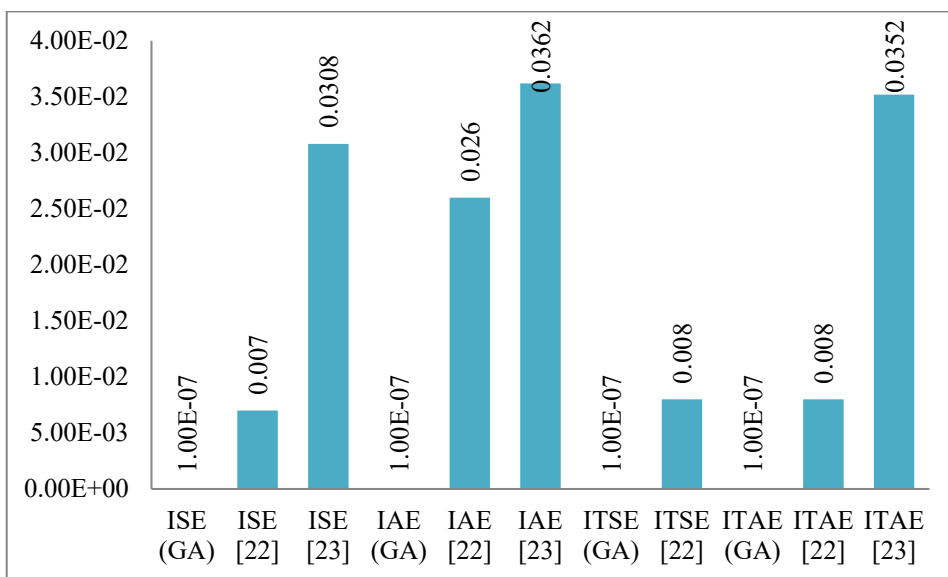
شکل‌های ۱۲-۱۴ عملکرد کنترل کننده پیشنهادی را با سایر کنترل کننده‌ها [۲۲-۲۳] از لحاظ پارامترهای پاسخ پله مقایسه کرده است. در شکل ۱۲ به وضوح مشاهده می‌شود که الگوریتم GA-FOPID دارای فراجهش صفر است در حالی که در مرجع [۲۳] مقدار فراجهش برابر ۴/۴۲۴۴ است. با توجه به شکل ۱۳، با در نظر گرفتن معیار ISE، زمان خیز در الگوریتم پیشنهادی 8×10^{-8} ثانیه، در حالی که در مرجع [۲۲] برابر 0.004 ثانیه و در مرجع [۲۳] برابر 0.135 ثانیه است. با در نظر گرفتن معیار IAE، زمان خیز در الگوریتم پیشنهادی 8×10^{-7} ثانیه، در حالی که در مرجع [۲۲] برابر 0.015 ثانیه و در مرجع [۲۳] برابر 0.118 ثانیه است. در معیار ITSE، در کنترل کننده مرتبه کسری زمان خیز برابر صفر ولی در مرجع [۲۲]، 0.004 ثانیه است و در معیار ITAE، روش پیشنهادی دارای زمان خیز صفر ولی در مراجع [۲۲] و [۲۳] این زمان به ترتیب 0.004 ثانیه و 0.118 ثانیه است.



شکل ۱۲. مقایسه فراجهش برای معیارهای خطا



شکل ۱۳. مقایسه زمان جهش برای معیارهای خطا



شکل ۱۴. مقایسه زمان نشست برای معیارهای خطا

هم چنین، روش پیشنهادی دارای زمان نشست 1×10^{-7} ثانیه در همه معیارهای می باشد، در حالی که مطابق شکل ۱۴ زمان نشست در مراجع [۲۲] و [۲۳] با معیار JSE، به ترتیب $0/007$ و $0/0308$ ثانیه، با معیار IAE، $0/026$ و $0/0362$ ثانیه، با معیار ITSE، $0/008$ و 1×10^{-7} ثانیه و در نهایت با معیار ITAE، برابر $0/008$ و $0/0352$ ثانیه می باشد. نتایج نشان می دهد که الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی پارامترهای کنترل FOPID برای موتور BLDC عملکرد خوبی دارد. بنابراین، کنترل کننده پیشنهادی فراجهبش، زمان خیز و زمان نشست کمتری در مقایسه با سایر روش ها دارد. همچنین روش پیشنهادی از پایداری خوبی نیز برخوردار است.

نتیجه گیری

در این مقاله، به طراحی بهینه کنترل کننده FOPID برای موتور PMBLDC پرداخته شده است. هدف از بهینه سازی کاهش زمان خیز، زمان نشست، فراجهبش و افزایش پایداری است. با اجرای دو الگوریتم فراابتکاری، ضرایب کنترل FOPID تنظیم می شود و مقدار بهینه تابع هدف به دست می آید. نتایج نشان می دهد پاسخ پله موتور PMBLDC با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش ها، مشخصات بهتری دارد.

Reference

1. Taher, S. A, Shibani, M. R., & Lalehzar, G. (2015). "Optimization of BLDC Motor using the Pareto Method Based on SOA", Computational intelligence in electrical engineering, vol. 3, pp. 55-66.
2. Khubalkar, S., Junghare, A., Aware, M., & Das, S., (2017). "Modeling and control of a permanent-magnet brushless DC motor drive using a fractional order proportional-integral-derivative controller", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 25, 4223 – 4241.
3. Singh, A. K., & Pattnaik, S. (2020). "Matrix Converter Operated Hysteresis Current Controlled BLDC Motor Drive for Efficient Speed Control and Improved Power Quality", Procedia Computer Science, vol. 167, pp. 541–550.
4. García, M., Ponce, P., Soriano, L. A, Molina, A., Cleery, B. M., & Romero, D. (2019). "Lifetime Improved in Power Electronics for BLDC Drives using Fuzzy Logic and PSO", IFAC Papers OnLine, vol. 52, pp. 2372–2377.
5. Bhuiyan, M. F., Uddin, M. R., Tasneem, Z., Hasan, M., & Salim, K. M. (2018). "Design, Code Generation and Simulation of a BLDC Motor Controller usuing PIC Microcontroller", International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering - (ICRIEECE), pp. 1427-1431.
6. Bhuiyan, M. F., Sakib, N., Uddin, M. R., & Salim, K. M. (2019). "Experimental Results of a locally developed BLDC Motor Controller for electric tricycle", 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology.
7. Walekar, M. V. R., & Murkute, Prof. S. V. (2018). "Speed Control of BLDC Motor using PI & Fuzzy Approach: A Comparative Study", International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology, Aug 29-31.
8. Ardestani, M., A. & Vakili, A., (2020). "Output feedback Controller design for HVAC system with delayed based Robust control approach", Quarterly Research Journal of Technical and Vocational University, 17, 89-100.
9. Sabri, M., (2017) "Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms", Quarterly Research Journal of Technical and Vocational University, 14, 33-55.
10. Quwaider, M., & Shatnawi, Y. (2020). "Neural Network Model as Internet of Things Congestion Control using PID Controller and Immune-Hill-Climbing Algorithm", Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 101.
11. Shia, Q., Lama, H.K., Xuana, C., & Chena, M. (2020). "Neural Network Model as Internet of Things Congestion Control using PID Controller and Immune-Hill-Climbing Algorithm", Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 101, April.
12. Quwaider, M., & Shatnawi, Y. (2020). "Neural Network Model as Internet of Things Congestion Control using PID Controller and Immune-Hill-Climbing Algorithm", Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 101, May.

13. Farahani, M., & Ganjefar, S., (2012). "Intelligent control of static synchronous series compensator via an adaptive self-tuning PID controller for suppression of torsional oscillations" *International Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS)*, 10, 744-752.
14. Taghizadeh, M., & Yarmohammadi, M. J., (2018). "Development of a Self-tuning PID Controller on Hydraulically Actuated Stewart Platform Stabilizer with Base Excitation", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 16, 2990-2999.
15. Merrikh-Bayat, F., Mirebrahimi, N. & Khalili, M.R., (2015). "Discrete-time fractional-order PID controller: Definition, tuning, digital realization and some applications", *International Journal of Control, Automation, and System*, 13, 81-90.
16. Memon, F., & Shao, C., (2020). "An Optimal Approach to Online Tuning Method for PID Type Iterative Learning Control", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 18, 1926-1935.
17. Vanchinathan, K. & Valluvan, K., R., (2018). "A Metaheuristic Optimization Approach for Tuning of Fractional-Order PID Controller for Speed Control of Sensorless BLDC Motor", *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 27, 1-19.
18. Tepljakov A., Petlenkov, E. & Belikov, J., (2011). "FOMCON: a MATLAB toolbox for fractional-order system identification and control", *International Journal of Microelectronics and Computer Science*, 2(2):51-62.
19. Khubalkar, S. W., Chopade, A. S., & Junghare, A. S., (2016). "Design and Tuning of Fractional Order PID Controller for Speed control of Permanent Magnet Brushless DC Motor", *IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)*, 8-10 Jan.
20. Krohling, R.A., & Rey, J.P. (2001). "Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol5 (1), pp78-82.
21. Oustaloup, A., Levron, F., Nanot, F.M., & Mathieu, B., (2000). "Frequency band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis", *IEEE Transactions on Circuits and Systems. I*, 47(1), pp. 25-39.
22. Momani, S., Khazali, E., & Batiha, I. M., (2019). "Tuning PID and PI λ D δ Controllers Using Particle Swarm Optimization Algorithm via El-Khazali's Approach", *AIP Conference Proceedings*.
23. Premkumar, K., & Manikandan, B.V., (2016). "Bat algorithm optimized fuzzy PD based speed controller for brushless direct current motor", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol 19, pp 818-840.