

شناسایی پارامترهای تابع انتقال موتور DC بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم ازدحام گروه ذرات

احمد شیرزادی، آرش دهستانی کلاگر و محمدرضا علیزاده پهلوانی

موتورهای BLDC به اطلاعات موقعیت روتور و پارامترهای ماشین بستگی دارد. موقعیت روتور از طریق حسگرهای اثر هال و یا روش‌های بدون حسگر تعیین می‌شود؛ در حالی که پارامترها باید از قبل شناخته شوند و یا به صورت برخط تعیین شوند [۲] و [۳]. این پارامترها عبارتند از مقاومت سیم‌پیچی و اندوکتانس نشتی، ممان اینرسی روتور، ثابت نیروی ضد محرکه و ضرایب میرایی یا اصطکاک [۴] و [۵]. در این خصوص، چندین روش برای تعیین پارامترهای موتور وجود دارد. با این حال، یک تخمین دقیق منوط به اطلاعات دقیق از طراحی ماشین می‌باشد. اهم این اطلاعات عبارتند از مواد هسته استاتور و روتور، هندسه استاتور و روتور، نوع آهن‌رباهای دائمی و توزیع سیم‌پیچی. هنگامی که این اطلاعات در دسترس باشد، روش‌های رایجی برای تعیین پارامترهای موتور وجود دارد که عبارتند از مدل‌های کلاسیک مدارهای مغناطیسی و یا تحلیل اجزای محدود (FEA) [۶] تا [۸]. معمولاً اطلاعات دقیقی در مورد نحوه طراحی یک ماشین خریداری شده در دسترس نیست؛ بنابراین انجام آزمایش‌های استاندارد جهت حصول پارامترهای مذکور مدنظر قرار می‌گیرد [۹]. در [۵] و [۱۰] تا [۱۲]، مقاومت سیم‌پیچی و اندوکتانس نشتی استاتور، ممان اینرسی روتور و ضریب میرایی موتور DC با تجزیه و تحلیل پاسخ پله آن و با استفاده از آزمایش‌های روتور قفل شده و بی‌باری تعیین شده‌اند. در [۱۳]، یک آزمایش روتور قفل اصلاح شده برای تعیین اندوکتانس‌های محورهای مستقیم و چهارگانه و ثابت نیروی ضد محرکه یک موتور سنکرون مغناطیس دائم انجام گرفته است. در [۱۴]، موتور با فرکانس متغیر تحریک شده و با استفاده از پاسخ‌های فرکانسی مختلف، پارامترهای تابع انتقال موتور تخمین زده شده است. ایراد اصلی این آزمایش‌ها آن است که در شرایط بسیار خاص (روتور قفل شده، سرعت صفر و بدون بار) پارامترهای موتور را تعیین می‌کنند. این شرایط باعث می‌شود که عملکرد دینامیکی کار عادی موتور به‌طور دقیق نشان داده نشود و بنابراین نتایج این آزمایش‌ها نیاز به اصلاح دارند. پارامترهای الکتریکی و مکانیکی نیز به دلایل مختلف در معرض تغییر هستند. مثلاً مقاومت استاتور، ضریب میرایی و قدرت مغناطیسی آهن‌ربای دائم با دما تغییر می‌کنند. همچنین اندوکتانس‌های ناشی از میدان مؤثر شکاف هوایی به‌طور غیرخطی با دما تغییر می‌کنند. علاوه بر این، ضریب میرایی با سرعت روتور تغییر می‌نماید. این تغییرات با استفاده از طرح‌های شناسایی برخط و بر اساس روش‌های بهینه‌سازی و کنترل‌کننده‌های تطبیقی جبران می‌شود [۲]، [۱۱] و [۱۵]. در [۱۵]، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم غیرمرکب جهت تعیین پارامترهای غیرخطی اصطکاک موتور DC بدون جاروبک استفاده شده است. در [۲]، یک روش شناسایی جبری همراه با یک جستجوی گرادیان کلاسیک

چکیده: تا کنون مطالعات جامع و گسترده‌ای بر روی موتور DC بدون جاروبک (BLDC) صورت گرفته که بخشی از این مطالعات، ناظر بر تخمین پارامترهای تابع انتقال این موتور می‌باشد. تخمین پارامترهای تابع انتقال موتور BLDC امری ضروری جهت بررسی عملکرد موتور و پیش‌بینی رفتار آن است؛ بنابراین به یک روش تخمین پارامتر کارآمد، دقیق و قابل اعتماد احساس نیاز می‌شود. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ازدحام گروه ذرات (PSO)، مسئله تخمین پارامترهای تابع انتقال مجموعه موتور BLDC و اینورتر مربوط به این موتور، حل شده است. نتایج حاصل از به‌کارگیری این الگوریتم با نتایج سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مقایسه شده و بررسی این نتایج نشان داده که الگوریتم PSO برای حل مسئله تخمین پارامتر تابع انتقال، یک روش کارآمد، دقیق و قابل اعتماد است.

کلیدواژه: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام گروه ذرات، موتور DC بدون جاروبک، تابع انتقال، تخمین پارامتر.

۱- مقدمه

در حال حاضر، موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC) از جمله تجهیزات باارزش در صنایع گوناگون به‌شمار می‌آیند و تقریباً با استفاده از این موتورها می‌توان در هزینه‌های هر صنعتی صرفه‌جویی نمود. موتور BLDC در واقع نشان‌دهنده پایان یا حداقل نتیجه نهایی یک تکامل طولانی در فناوری موتورهای الکتریکی است [۱]. تا امروز، مطالعات جامع و گسترده‌ای بر روی موتورهای BLDC صورت گرفته که بخشی از این مطالعات، ناظر بر تخمین پارامترهای تابع انتقال این موتورهاست. محاسبه پارامترهای تابع انتقال موتور BLDC امری ضروری جهت بررسی عملکرد این ماشین و پیش‌بینی رفتار آن می‌باشد؛ بنابراین در روش‌های کنترلی موتور، اطلاع دقیق از مقادیر پارامترهای تابع انتقال موتور یک موضوع اساسی است. در این راستا به یک روش تخمین پارامتر کارآمد، دقیق و قابل اعتماد احساس نیاز می‌شود. این مسئله در استانداردهای مطرح جهانی و در پژوهش‌ها و تحقیقات اخیر بحث شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. عملکرد مطلوب طرح‌های کنترلی معمولی برای

این مقاله در تاریخ ۱۶ مهر ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۲۷ دی ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

احمد شیرزادی، مجتمع برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: shirzadi_ahmad@yahoo.com).

آرش دهستانی کلاگر (نویسنده مسئول)، مجتمع برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: a_dehestani@mut.ac.ir).

محمدرضا علیزاده پهلوانی، مجتمع برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: mr_alizadehp@mut.ac.ir).

شبیه‌سازی‌ها و مقایسه نتایج الگوریتم PSO با نتایج حاصل از سایر روش‌های بهینه‌سازی ارائه می‌گردد.

۲- تابع انتقال موتور DC بدون جاروبک

مدار معادل موتور DC بدون جاروبک سه‌فاز در شکل ۱ آمده است. در این مدار معادل، R مقاومت فاز سیم‌پیچ آرمیچر، L اندوکتانس خودالقایی و M اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های آرمیچر می‌باشد. معادله ولتاژ فاز در مدار معادل فوق به صورت (۱) قابل نوشتن است

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \cdot & \cdot \\ \cdot & R & \cdot \\ \cdot & \cdot & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & \cdot & \cdot \\ \cdot & L-M & \cdot \\ \cdot & \cdot & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

با توجه به اینکه سیم خنثی در مجموعه سیم‌های خروجی از ترمینال این موتور وجود ندارد، تشخیص ولتاژ فازی موتور دشوار است. در نتیجه در (۲)، معادله ولتاژ خط استخراج شده است

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R & \cdot \\ \cdot & R & -R \\ -R & \cdot & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & M-L & \cdot \\ \cdot & L-M & M-L \\ M-L & \cdot & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{bmatrix} \quad (2)$$

در هر لحظه از زمان فقط دو فاز از سه فاز موتور BLDC تحریک می‌شود. بنابراین در لحظه‌ای که ولتاژ فقط به سیم‌پیچ‌های فاز A و B متصل شده است، (۳) در خصوص جریان‌های موتور برقرار می‌باشد

$$\begin{cases} i_A = -i_B = i \\ \frac{di_A}{dt} = -\frac{di_B}{dt} = \frac{di}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

بر اساس (۲) و (۳) می‌توان ولتاژ خط U_{AB} را به صورت (۴) نوشت

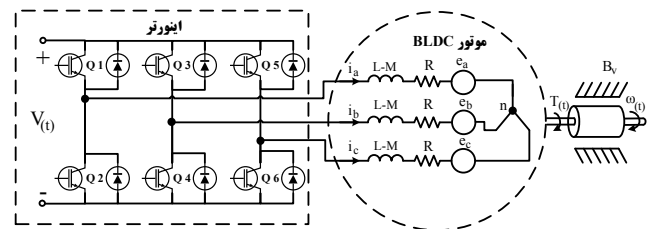
$$u_{AB} = 2Ri + \frac{2(L-M)di}{dt} + (e_A - e_B) \quad (4)$$

با فرض اینکه ولتاژ چرخشی موتور صفر باشد می‌توان گفت e_B و e_A از نظر دامنه برابر هستند و بنابراین (۴) به صورت (۵) قابل بازنویسی است

$$u_{AB} = U_d = 2Ri + 2(L-M) \frac{di}{dt} + 2e_A = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + k_e \Omega \quad (5)$$

که U_d ولتاژ باس DC، r_a مقاومت سیم‌پیچ خط ($r_a = 2R$) و L_a اندوکتانس معادل سیم‌پیچ به صورت $L_a = 2(L-M)$ می‌باشد. همچنین Ω سرعت زاویه‌ای چرخش موتور، $k_e = 4pNSB_m$ ثابت نیروی ضد محرکه، N تعداد دور سیم‌پیچی، S حاصل ضرب شعاع روتور در طول مؤثر هادی‌ها، B_m حداکثر مقدار توزیع چگالی شار مغناطیسی دائم در شکاف هوایی و p تعداد زوج قطب است. گشتاور موتور BLDC نیز به صورت (۶) قابل نوشتن است

$$T_e = 2p\psi_m i_A = K_T i \quad (6)$$



شکل ۱: مدار معادل موتور DC بدون جاروبک و مدار تغذیه آن.

به صورت برخط بر روی یک موتور DC بدون جاروبک جهت تنظیم یک کنترل‌کننده سرعت تطبیقی استفاده شده است. مدل مورد استفاده یک مدل ساده بوده که ضریب میرایی در آن نادیده انگاشته شده است. در تحقیقات پیشین از رهیافت‌های هوشمند مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی، ازدحام ذرات و الگوریتم‌های خفاش نیز در تعیین پارامترهای موتور DC بدون جاروبک استفاده شده است [۱۶] و [۱۷]. در این مقالات، مقادیر پارامترهای تابع انتقال مورد استفاده در مرحله طراحی سیستم کنترل با کمک روش تخمین حداقل مربعات (LS) تعیین شده است. در این رویکرد، خروجی اندازه‌گیری شده با خروجی مدل‌سازی شده مقایسه شده و تفاوت سیگنال‌های خروجی به حداقل می‌رسد. با فرض یک مدل دقیق، روش LS یک روش تخمین پارامتر قدرتمند، کارآمد، قابل اعتماد و آسان جهت پیاده‌سازی می‌باشد [۱۸]. در این روش، امکان تعیین پارامترهای مدل پویا و بهبود عملکرد یک کنترل‌کننده سرعت خطی فراهم شده است [۱۹]. در مقاله حاضر از تابع هدف مجموع خطای مربعات (SSE) جهت تخمین پارامترهای تابع انتقال موتور BLDC استفاده می‌شود. علاوه بر مقدار SSE، مقادیر زمان نشست، زمان صعود، مقدار صعود و زمان گذرا نیز برای مقادیر پاسخ تابع انتقال حاصل از پارامترهای تخمینی تابع انتقال، محاسبه و در نتایج نهایی مقاله آورده شده است. نوآوری اصلی مقاله حاضر عبارت از تخمین پارامترهای مستقل تابع انتقال موتور BLDC و اینورتر مربوط به آن و حل این مسئله با استفاده از الگوریتم‌های نوین بهینه‌سازی بازی گرسنگی^۴ (HGS) [۲۰]، هریس‌هاوکس^۵ (HHO) [۲۱]، رانگ کوتا^۶ (RUN) [۲۲]، کپک مخاطی^۷ (SMA) [۲۳]، ژنتیک^۸ (GA) [۲۴]، تفاضل تکاملی^۹ (DE) [۲۵] و ازدحام گروه ذرات^{۱۰} (PSO) [۲۶] است. در این مقاله نشان داده می‌شود که الگوریتم PSO برای حل مسئله تخمین پارامترهای تابع انتقال، روشی کارآمد، دقیق و قابل اعتماد است.

در سایر مقالات برای مدل‌سازی تابع انتقال موتور BLDC از مدل مورد تأیید استاندارد IEEE استفاده شده است [۲۷]. همچنین در مقاله حاضر نیز از این مدل استفاده شده و به علاوه در این خصوص، توضیحاتی در بخش دوم ارائه گردیده است. در بخش‌های سوم و چهارم به ترتیب مقدار پیچیدگی محاسباتی و تابع هدف مسئله آمده است. بخش پنجم نیز سهم اصلی در این مقاله را به خود اختصاص داده و به تبیین الگوریتم بهینه‌سازی PSO و نحوه به‌کارگیری آن می‌پردازد. در بخش ششم، نتایج

1. Sum of Squared Errors
2. Settling Time
3. Rise Time
4. Hunger Games Search
5. Harris Hawks Optimization
6. Runge-Kutta Optimizer
7. Slime Mould Algorithm
8. Genetic Algorithms
9. Differential Evolution
10. Particle Swarm Optimization

جدول ۱: کران‌ها و تعداد مقادیر متصور برای هر یک از پارامترهای تابع انتقال.

پارامترها	تخمین	دقت	تعداد مقادیر متصور	بیشترین مقدار	کمترین مقدار	مقادیر [۲۷]	پارامترها
K	10^{-6}	10^{-6}	۳۰۰۰۰۰۱	۳	۰	۲,۹۶۴۸	K
τ_a	10^{-6}	10^{-6}	۵۰۰۰۰۰۱	۰,۵	۰	۰,۰۰۱۴	τ_a
τ_e	10^{-6}	10^{-6}	۵۰۰۰۰۰۱	۰,۵	۰	۰,۰۰۰۰۱	τ_e
τ_m	10^{-6}	10^{-6}	۵۰۰۰۰۰۱	۰,۵	۰	۰,۳۱۱	τ_m

$$G_u(s) = \frac{1}{k_e} \frac{1}{t_m t_e s^2 + t_m s + 1} \quad (15)$$

به‌طور کلی، ثابت زمانی مکانیکی بسیار بزرگ‌تر از ثابت زمانی الکترومغناطیسی است ($t_m \gg t_e$) [۱].

موتورهای BLDC با تغذیه توسط اینورتر به حرکت درمی‌آیند. چنین محرکی را می‌توان با تابع انتقال $K_A/(\tau_A s + 1)$ توصیف نمود. بنابراین تابع انتقال مجموعه موتور و اینورتر عبارت است از

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_A}{\tau_A s + 1} \frac{K_e}{t_m t_e s^2 + t_m s + 1} \quad (16)$$

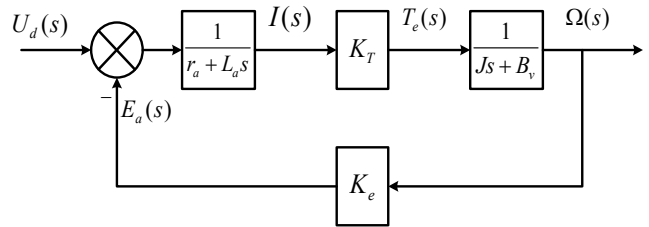
در رابطه فوق، K_A ثابت اینورتر و τ_A ثابت زمانی اینورتر می‌باشد. در [۲۷] علاوه بر تخمین پارامترهای تابع انتقال موتور، پارامترهای تابع انتقال مدار اینورتر نیز تخمین زده شده است. البته در [۲۷]، پارامترهای K_e و K_A به‌صورت مستقل تخمین زده شده‌اند؛ در صورتی که این دو پارامتر در واقعیت از هم مستقل نیستند. پس در مقاله حاضر، پارامترهای $1/K_e$ و K_A به‌صورت یک پارامتر با عنوان K در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، تابع انتقال موتور و اینورتر به‌صورت (۱۷) قابل بیان است

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = K \frac{1}{\tau_A s + 1} \frac{1}{t_m t_e s^2 + t_m s + 1} \quad (17)$$

۳- پیچیدگی محاسباتی PSO و فضای مسئله

در خصوص میزان پیچیدگی محاسباتی الگوریتم PSO، قابل ذکر است که این پیچیدگی وابسته به سه فرایند مقداردهی اولیه، محاسبه تابع هدف و به‌روزرسانی ذرات است. در این راستا می‌توان گفت که با تعداد جمعیت برابر با N ، پیچیدگی زمانی مربوط به فرایند مقداردهی اولیه از مرتبه $O(N)$ بوده و پیچیدگی زمانی مربوط به مکانیزم به‌روزرسانی ذرات نیز از مرتبه $O(TN)$ می‌باشد. در این رابطه، متغیر T بیانگر حداکثر تعداد تکرار بوده و بنابراین میزان پیچیدگی محاسباتی الگوریتم PSO یا تعداد فراخوانی تابع انتقال از رابطه $O(N \times (T + 1))$ قابل استحصال است. مثلاً با فرض اینکه تعداد جمعیت برابر با ۱۰ باشد و همچنین با در نظر گرفتن حداکثر ۹۹۹ تکرار، قابل محاسبه است که تعداد فراخوانی‌های تابع هدف، برابر با ۱۰۰۰۰ بار خواهد بود.

تعداد مقادیر متصور برای هر یک از پارامترهای مسئله تخمین پارامترهای تابع انتقال با فرض این که کران پارامترها محدود و میزان دقت تخمین 10^{-6} باشد، در جدول ۱ آمده است. بنابراین برای محاسبه تمامی حالات ممکن برای پارامترهای ارائه‌شده با فرض استقلال پیشامد حالات پارامترها نسبت به یکدیگر، می‌توان بیان کرد که تعداد کل حالت‌های قابل تصور در این مسئله، برابر با $3,74 \times 10^{37}$ حالت است. در مقاله حاضر نشان داده شده که الگوریتم PSO، صرفاً با در نظرگیری



شکل ۲: مدل‌سازی موتور DC بدون جاروبک، بدون گشتاور بار.

که K_T ثابت گشتاور، i جریان فاز در حالت دائم و همچنین ψ_m حداکثر مقدار پیوند شار مغناطیس دائم با هر سیم‌پیچی است. برای روتور (بخش گردان) که یک سیستم مکانیکی است، (۷) با استفاده از قانون دوم نیوتن برقرار می‌باشد

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} + B_v \Omega \quad (7)$$

که در این رابطه، T_e گشتاور الکترومغناطیسی موتور، T_L گشتاور بار، J ممان اینرسی روتور و B_v نیز ضریب اصطکاک موتور می‌باشد. در ادامه با جایگزینی (۶) در (۷)، (۸) حاصل می‌شود

$$K_T i - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} + B_v \Omega \quad (8)$$

طبق رابطه فوق، جریان بی‌باری در موتور BLDC عبارت است از

$$i = \frac{J}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \Omega \quad (9)$$

با جایگذاری (۹) در (۵)، (۱۰) حاصل می‌شود

$$U_d = r_a \left(\frac{J}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \Omega \right) + \quad (10)$$

$$L_a \frac{d}{dt} \left(\frac{J}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{B_v}{K_T} \Omega \right) + k_e \Omega$$

که می‌توان آن را به‌صورت (۱۱) مرتب نمود

$$U_d = \frac{L_a J}{K_T} \frac{d^2 \Omega}{dt^2} + \frac{r_a J + L_a B_v}{K_T} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{r_a B_v + k_e K_T}{K_T} \Omega \quad (11)$$

با اعمال تبدیل لاپلاس به (۱۱)، تابع انتقال موتور به‌صورت رابطه زیر تعیین می‌شود

$$G_u(s) = \frac{\Omega(s)}{U_d(s)} = \frac{K_T}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_e K_T)} \quad (12)$$

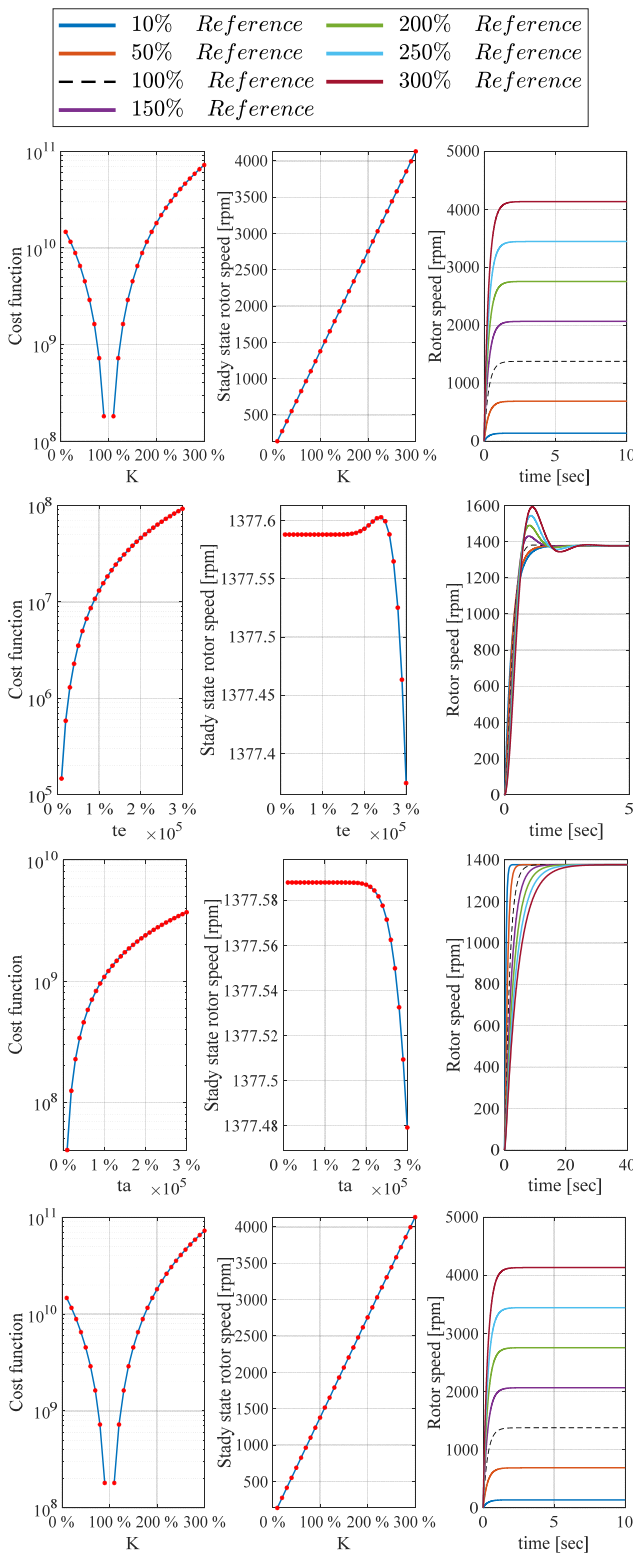
بنابراین مدل بلوک دیگرامی موتور BLDC بدون بار در حوزه لاپلاس، مطابق شکل ۲ قابل نمایش است.

با تعریف ثابت زمانی مکانیکی t_m و ثابت زمانی الکترومغناطیسی t_e به‌صورت زیر

$$t_m = \frac{r_a J + L_a B_v}{r_a B_v + k_e K_T} \quad (13)$$

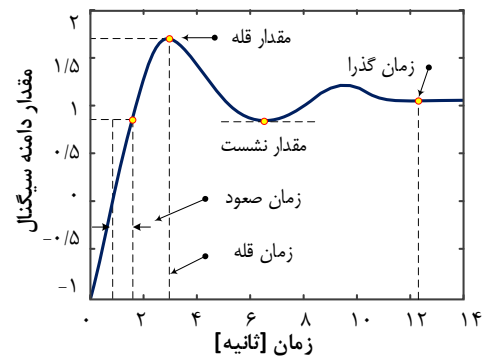
$$t_e = \frac{L_a J}{r_a J + L_a B_v} \quad (14)$$

می‌توان تابع انتقال موتور را که در (۱۲) ارائه شده است به‌صورت (۱۵) بیان نمود



شکل ۴: منحنی سرعت-زمان، سرعت حالت دائم و تابع هزینه بر حسب تغییرات پارامترهای تابع انتقال.

نسبت به سایر پرندگان جمعیت نیز بی توجه نبوده و به حفظ فاصله مناسب با آنها می پردازد. بدین جهت، مشاهده می شود که دسته های پرندگان، بسیار هماهنگ با یکدیگر حرکت می کنند. همچنین حرکت پرندگان متأثر از راهنمایی یک پرنده در جلوی دسته نیز می باشد. مسیر حرکت جلوترین پرنده، تأثیر زیادی در نحوه حرکت دسته دارد و این راهنما در طول مسیر طولانی ثابت نیست و پرندگان به طور مرتب جای خود را با راهنما عوض می کنند [۲۸].



شکل ۳: ویژگی های مربوط به پاسخ تابع انتقال.

۱۰۰۰۰ حالت از تعداد کل $3,74 \times 10^{13}$ حالت ممکن، قادر است که تخمین مناسبی را از پارامترهای تابع انتقال به دست آورد.

۴- تعریف تابع هدف

جهت ارزیابی پارامترهای تخمینی از تابع هدف (OF) مشخصی استفاده می شود. تابع هدف در این مسئله، میزان انحراف بین داده های اندازه گیری شده از سرعت در واقعیت و سرعت حاصل از تابع انتقال است که توسط پارامترهای تخمین زده شده، مقداردهی گردیده است. مقدار این انحراف با استفاده از مجموع خطای مربعات (۱۸) محاسبه می شود. در این رابطه، عبارت ω و $\hat{\omega}$ به ترتیب سیگنال سرعت تخمینی و سرعت حاصل از اندازه گیری (مرجع) می باشد

$$OF = \sum (\omega - \hat{\omega})^2 \quad (18)$$

منحنی سرعت با استفاده از حل عددی (۱۷) و با در نظر گرفتن مقدار ولتاژ ثابت محاسبه شده است. پاسخ تابع انتقال دارای ویژگی هایی می باشد که به صورت نمایشی در شکل ۳ نشان داده شده اند.

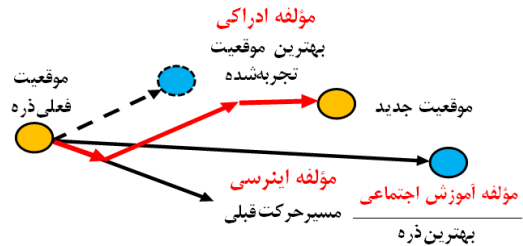
منحنی سرعت و تابع هدف به ازای تغییر مقادیر مرجع جدول ۱ در شکل ۴ ترسیم شده است. در این شکل نشان داده شده که افزایش یا کاهش در مقدار هر یک از پارامترهای تابع انتقال تا چه میزان بر منحنی سرعت و سرعت حالت دائم و تابع هدف اثرگذار است. همچنین در این شکل، پویایی مشخصه سرعت تابع انتقال نسبت به هر یک از پارامترهای تابع انتقال نشان داده شده است. به علاوه با توجه به این شکل مشخص است که هر پارامتر از تابع انتقال توسط کدامیک از حالت های گذرا یا دائم سیگنال سرعت قابل تخمین زدن می باشد. مثلاً تغییر مقدار متغیر K اثری بر مقادیر زمان گذرای پاسخ تابع انتقال نداشته است؛ بنابراین فقط با استفاده از اندازه گیری حالت دائم سرعت می توان پارامتر K تابع انتقال را تخمین زد.

۵- الگوریتم PSO

الگوریتم PSO در سال ۱۹۹۵ توسط کندی^۲ و ابرهارت^۳ ارائه شد [۲۶] و ایده اولیه آن بر اساس شبیه سازی رفتاری پرواز غیرقابل پیش بینی پرندگان است. پرندگان، توانایی پرواز هم زمان و هماهنگ با هم، تغییر جهت دادن های ناگهانی و در عین حال در یک شکل بهینه را دارند. هر کدام از پرندگان، توانایی هایی در ناوبری پرواز خود داشته و مسیر مورد نظر خود را در نظر می گیرند. در عین حال، هر پرنده به موقعیت خود

1. Objective Function
2. Kennedy
3. Eberhart

به صورت حاصل ضرب در این عبارت وجود دارد، یک ثابت مثبت و یک ضریب تنظیم برای پارامتر شناخت فردی محسوب می شود. **مؤلفه آموزش اجتماعی**: عبارت $r_1 c_1 (xg_{Best} - x_i(t))$ در رابطه بردار سرعت (۱۹)، مؤلفه آموزش اجتماعی را نشان می دهد. تأثیر این مؤلفه به صورت هدایت ذره به سوی بهترین موقعیت ذرات (xg_{Best}) می باشد. پارامتر c_1 یک ثابت مثبت و یک ضریب تنظیم برای آموزش اجتماعی محسوب می شود.



شکل ۵: به روزرسانی موقعیت ذره در الگوریتم ازدحام ذرات.

در نهایت مقدار سرعت ذره بر اساس این سه مؤلفه و موقعیت ذره بر اساس سرعت حاصل شده، به روزرسانی خواهد شد. در ادامه مقدار تابع هدف به ازای موقعیت هر ذره با مقدار تابع هدف به ازای بهترین موقعیتی که ذره تا کنون تجربه کرده (xp_{Best}) ، مقایسه شده و اگر مقدار تابع هدف متناظر با موقعیت جدید ذره بهتر از مقدار مربوط به موقعیت قبلی ذره باشد $OF(x_i(t)) < OF(xp_{Best})$ ، آنگاه موقعیت بهترین خاطره ذره به روز می شود. همچنین مقدار تابع هدف به ازای موقعیت هر ذره با مقدار تابع هدف به ازای بهترین موقعیت ذره در میان تمام ذرات (xg_{Best}) ، مقایسه می شود و اگر مقدار تابع هدف موقعیت جدید ذره بهتر از تابع هدف بهترین موقعیت ذره باشد، یعنی $OF(x_i(t)) < OF(xg_{Best})$ ، آنگاه بهترین موقعیت ذره به روز می شود.

۲-۵ فلوجارت الگوریتم PSO

جهت جمع بندی، فلوجارت مربوط به کلیه مراحل فرایند تخمین پارامترهای تابع انتقال با استفاده از الگوریتم PSO در شکل ۶ نشان داده شده است. فلوجارت الگوریتم PSO شامل چهار به روزرسانی است که این به روزرسانی ها عبارت هستند از (۱) به روزرسانی خاطره ذره که مربوط به مؤلفه ادراکی است، (۲) به روزرسانی بهترین ذره که مربوط به مؤلفه اجتماعی است، (۳) به روزرسانی موقعیت سرعت که مربوط به مؤلفه اینرسی است و در آخر با توجه به این سه مؤلفه، (۴) به روزرسانی موقعیت ذره انجام می شود که توضیحات این مؤلفه ها و جزئیات آن در بخش قبل ارائه شده است.

۳-۵ تنظیم پارامترهای الگوریتم PSO

برای اینکه الگوریتم های بهینه سازی بهترین عملکرد را داشته باشند، لازم است که پارامترهای آنها به درستی تنظیم شوند. برای تعیین مقادیر پارامترهای c_1 ، c_2 و ω در الگوریتم PSO از روابط [۲۹] استفاده شده است. در الگوریتم PSO سرعت ذرات باید محدود شود تا بتوان مسیر حرکت آنها را کنترل نمود. در [۲۹] سیر یک ذره در حالت های مختلف، تحلیل شده است. در این مرجع، یک تصویر پنج بعدی ایجاد شده که سیستم الگوریتم PSO را به طور کامل توصیف می کند. در نهایت این تحلیل ها منجر به استخراج یک مدل تعمیم یافته از الگوریتم می گردد که شامل مجموعه ای از ضرایب برای کنترل گرایش های همگرایی پارامترهای الگوریتم PSO می شود. مدل ارائه شده در این مرجع، ضرایب تنظیم پارامتر الگوریتم PSO را محدود می نماید. در این راستا ضرایب الگوریتم PSO به صورت (۲۱) تعریف می شوند

$$\begin{aligned} \omega &= \chi \\ c_1 &= \chi \phi_1 \\ c_2 &= \chi \phi_2 \end{aligned} \quad (21)$$

همه این پدیده های طبیعی در شبیه سازی ریاضی و حل مسائل بهینه سازی به کمک الگوریتم PSO، مدنظر قرار می گیرند. در الگوریتم PSO هر کدام از اعضای اجتماع، یک ذره نامیده می شود. در مقاله حاضر، مقادیر پارامترهای تابع انتقال (۱۷)، متناظر با این ذرات می باشند.

۱-۵ شبیه سازی ریاضی الگوریتم PSO

در الگوریتم PSO به روزرسانی بردار سرعت هر ذره بر اساس رابطه (۱۹) صورت می پذیرد

$$v_i(t+1) = \omega \cdot v_i(t) + r_1 c_1 (xp_{Best_i} - x_i(t)) + r_2 c_2 (xg_{Best} - x_i(t)) \quad (19)$$

با استفاده از (۲۰) نیز موقعیت هر ذره به روزرسانی می شود

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (20)$$

پارامترهای موجود در روابط فوق و مربوط به الگوریتم PSO عبارتند از

- $x_i(t)$: موقعیت ذره i
- $v_i(t)$: سرعت ذره i
- c_1 و c_2 : ضریب تنظیم الگوریتم
- r_1 و r_2 : عددی تصادفی در محدوده $[0, 1]$
- p_{Best_i} : بهترین خاطره ذره i
- g_{Best} : بهترین ذره در میان تمام ذرات

در (۱۹)، سه مؤلفه در به حرکت درآوردن ذرات (به روزرسانی موقعیت ذرات) در هر تکرار نقش آفرینی می کنند که این سه مؤلفه در شکل ۵ نشان داده شده اند. در ادامه، این مؤلفه ها بررسی می شوند.

مؤلفه اینرسی^۱: عبارت $(\omega \cdot v_i(t))$ در رابطه بردار سرعت (۱۹)، مؤلفه اینرسی را نشان می دهد و این مؤلفه به سرعت حرکت قبلی ذره $(v_i(t))$ و یک ضریب ثابت (ω) بستگی دارد. پارامتر ω ثابت وزن اینرسی است و مقدار آن مثبت و ثابت می باشد. این ضریب ثابت برای متوازن کردن فازهای جستجوی الگوریتم حائز اهمیت است و تغییر وضعیت الگوریتم از فاز اکتشاف به جستجوی محلی توسط این ضریب تنظیم خواهد شد.

مؤلفه ادراکی^۲: عبارت $r_1 c_1 (xp_{Best_i} - x_i(t))$ در رابطه بردار سرعت (۱۹)، مؤلفه ادراکی را نشان می دهد. این مؤلفه مانند حافظه ای است که بهترین موقعیت ذره (xp_{Best_i}) را حفظ می کند. تأثیر این مؤلفه به صورت هدایت ذره به سوی موقعیت بهترین خاطره ذره می باشد. این مؤلفه به شکل تفاضل بین بهترین موقعیتی که ذره تجربه نموده با موقعیت کنونی ذره، محاسبه می شود. شایان توجه است که هرچه موقعیت کنونی ذره فاصله بیشتری از موقعیت بهترین خاطره ذره داشته باشد، تفاضل این عبارت افزایش پیدا کرده و در نتیجه، مقدار این عبارت باعث می شود که ذره به موقعیت بهترین خاطره خود جذب شود. همچنین پارامتر c_1 که

3. Social Learning Term
4. Constraint Coefficient

1. Inertia Term
2. Cognitive Term

جدول ۲: نتایج الگوریتم ازدحام گروه ذرات به ازای تعداد جمعیت‌های مختلف.

تعداد جمعیت	۱۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۱۰
انحراف معیار تابع هدف	۰٫۵۹۴۴۵	۰٫۰۲۰۷۹	$۱٫۰۰۴ \times ۱۰^{-۳}$	$۱٫۱۵۲ \times ۱۰^{-۶}$
میانگین تابع هدف	۰٫۴۴۱۹۵	۰٫۰۲۳۱۳	$۳٫۶۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۷٫۳۴۷ \times ۱۰^{-۷}$
کمترین مقدار تابع هدف	۰٫۰۷۴۹۵	$۱٫۷۷۳ \times ۱۰^{-۳}$	$۲٫۱۲۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۵٫۴۷۵ \times ۱۰^{-۱۰}$
مقدار شروع تابع هدف	۶٫۷۵۲	۱۴٫۱۱۵	۱۲۸٫۴۹۱	۴۰۱٫۸۷۸
میانگین زمان اجرا	۱۷۸٫۵۴۰	۱۷۹٫۷۷۶	۱۷۵٫۴۶۶	۱۷۸٫۲۷۰
مقدار فراخوانی تابع هزینه	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
ماکسیمم تعداد تکرار	۹	۱۹	۹۹	۹۹۹

قسمت اعشاری و صحیح تمام اعداد اعشاری جابه‌جا شد.

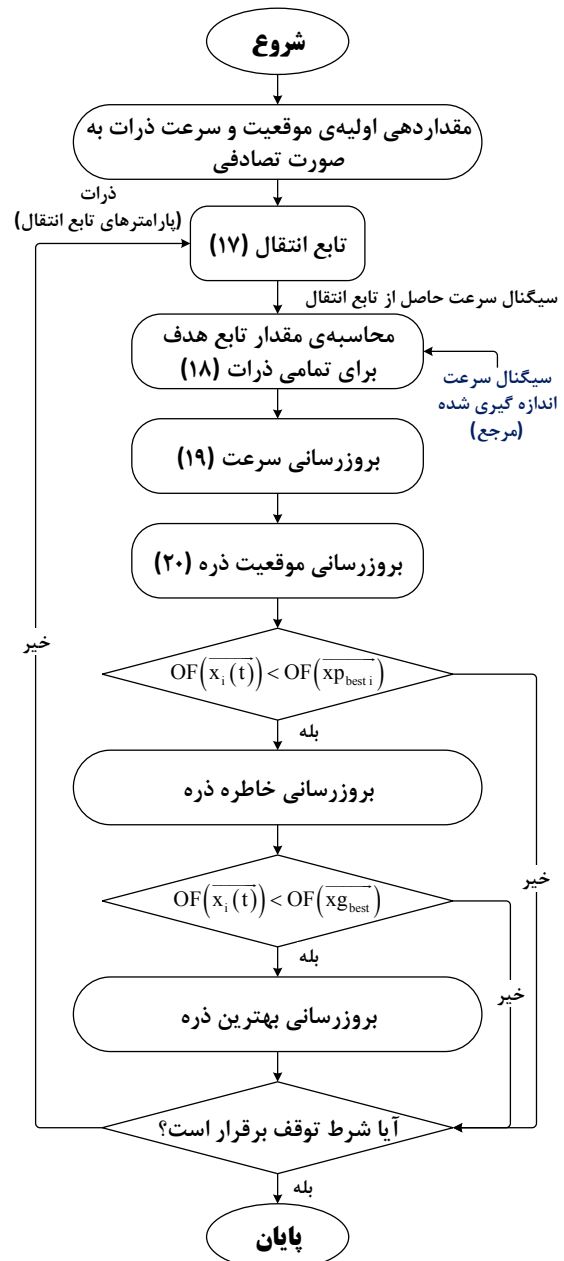
قسمت اعشاری و صحیح تمام اعداد اعشاری جابه‌جا شد. $c_p = ۱٫۴۱۶۲$ و $c_r = ۲٫۰۵$. علاوه بر تنظیم ضرایب الگوریتم PSO، انتخاب جمعیت الگوریتم نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً در مسائل بهینه‌سازی اگر تعداد جمعیت کم تعیین گردد، مسأله دچار همگرایی زود هنگام می‌شود و جواب مورد نظر (بهینه سراسری) به دست نخواهد آمد. همچنین اگر تعداد جمعیت زیاد باشد، زمان زیادی لازم است تا همگرایی حاصل شود. بنابراین باید تعداد جمعیت در حد مناسبی قرار داشته باشد تا بتوان در زمان قابل قبول به نتایج مطلوب دست یافت. برای تنظیم تعداد جمعیت از مقدار اولیه ۱۰ شروع شده و مقادیر ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نیز برای جمعیت الگوریتم مورد سنجش قرار گرفته است.

بدین منظور به ازای هر یک از مقادیر جمعیت، ده شبیه‌سازی مستقل با شرط توقف ۱۰۰۰۰ فراخوانی از تابع هدف، جهت تنظیم پارامتر تعداد جمعیت انجام گردیده که در ادامه، نتایج این شبیه‌سازی‌ها به ازای جمعیت‌های ۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ در جدول ۲ نشان داده شده است. برای بررسی عملکرد و تنظیم پارامتر جمعیت الگوریتم، دو مورد حائز اهمیت است. مورد اول، عملکرد کلی الگوریتم در تمامی شبیه‌سازی‌ها است که به کمک میانگین تابع هدف مشخص می‌شود و مورد دوم، برقراری یکنواختی در پاسخ است. یعنی در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده، تابع هدف نتایج تقریباً یکسانی داشته باشد. مثلاً اگر مقدار انحراف معیار صفر باشد، بنابراین نتایج تابع هدف در تمامی شبیه‌سازی‌ها مقادیر یکسانی دارند که برابر با مقدار میانگین بوده و پراکندگی در پاسخ نهایی الگوریتم بهینه‌سازی (نتایج تابع هدف) وجود ندارد. تأثیر پارامتر تعداد جمعیت الگوریتم بر کمترین مقدار، میانگین و انحراف معیار تابع هدف و شاخص‌های دیگر در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به شاخص‌های ذکر شده، مشخص است که تعداد جمعیت ۱۰ عضوی، مجموعاً عملکرد بهتری را برای حل مسئله نسبت به مقادیر دیگر تعداد جمعیت داشته است. همچنین قابل ذکر است که این پارامتر، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و کارایی الگوریتم دارد.

علاوه بر نتایج جدول ۲، منحنی همگرایی به ازای تعداد جمعیت‌های مختلف در شکل ۷ آمده است. مشخصه همگرایی الگوریتم، مؤید تلاش الگوریتم جهت یافتن مقدار بهینه مطلق می‌باشد. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که یک جمعیت ۱۰ عضوی نسبت به سایر مقادیر جمعیتی، توانسته که الگوریتم بهینه‌سازی را سریع‌تر به همگرایی برساند.

۶- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی و مطالعات بر روی کامپیوتر با مشخصات ویندوز ۱۱، ۶۴ بیت، پردازنده اینتل ۷،۲ GHz، ۱۲ گیگابایت DDR۳ و با استفاده از نرم‌افزار متلب ۲۰۲۲ نسخه آلفا انجام گرفته است. به علاوه، سیگنال سرعت مرجع جهت تخمین پارامتر از [۲۷] اخذ شده است.



شکل ۶: فلوچارت الگوریتم ازدحام ذرات PSO.

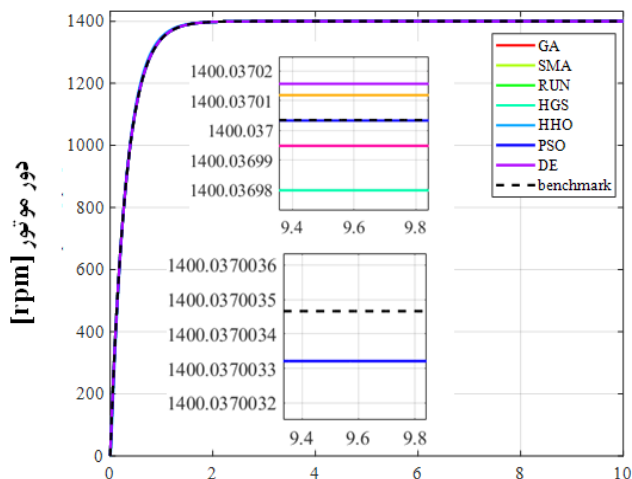
که در آن φ_1 و φ_2 دو متغیر با مقادیر بزرگ‌تر از صفر هستند. همچنین متغیر φ نیز طبق (۲۲) تعریف می‌شود

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \quad \varphi_1, \varphi_2 > 0, \quad \varphi > 4 \quad (22)$$

در [۲۹] برای پارامتر $\varphi > 4$ شرط قید شده است. مدل ارائه شده در این مرجع با استفاده از تحلیل ریاضی اثبات گردیده که عبارت است از

$$\chi = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (23)$$

توجه شود که کاهش پارامتر وزن اینرسی ω باعث می‌شود تا نواحی بیشتری توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجو شود و این یعنی که شانس پیدا کردن بهینه سراسری افزایش پیدا می‌کند. البته در حالتی که از مقادیر ω کوچک‌تر استفاده شود، با هزینه زمان بردن شبیه‌سازی‌ها مواجه خواهیم شد. در این خصوص، طبق (۲۱) و بر اساس مصالحه‌ای که در [۲۹] انجام شده است، مقداری بهینه برای پارامترهای الگوریتم PSO ارائه شده که این مقادیر عبارت هستند از $\omega = ۰٫۷۲۹۸$ ، $c_1 = ۱٫۴۱۶۲$ ،



زمان [ثانیه]

شکل ۹: مشخصه سرعت تابع انتقال عددی حاصل از الگوریتم PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی.

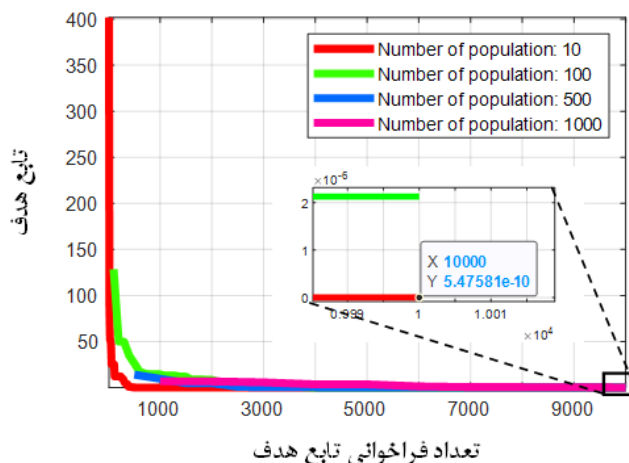
جدول ۳: تنظیمات مربوط به الگوریتم‌های بهینه‌سازی.

الگوریتم	مراجع	مقادیر تنظیم پارامترهای الگوریتم
DE	[۲۵]	Scaling factor : ۰.۵ , Crossover probability : ۰.۵
GA	[۲۴]	Crossover probability = ۰.۸ , Mutation probability = ۰.۰۵
HGS	[۲۰]	$l : ۰.۷$, $LH : ۱۰۰۰$, $SHungry : ۰$
HHO	[۲۱]	$\beta : ۱.۵$
RUN	[۲۲]	$a = ۲۰$, $b = ۱۲$
SMA	[۲۳]	$z = ۰.۳$
PSO	[۲۹]	$\omega = ۰.۷۲۹۸$, $c_1 = ۱.۴۱۶۲$, $c_2 = ۱.۴۱۶۲$

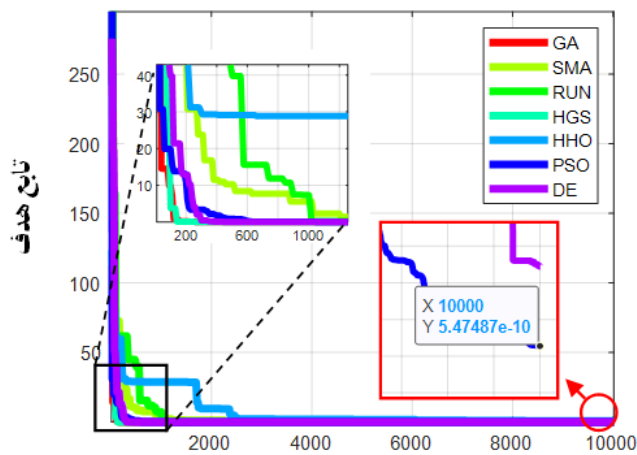
می‌توان مشخصه‌های همگرایی این الگوریتم‌ها را به صورت یک‌به‌یک با هم مقایسه نمود. بنابراین در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مشخصه همگرایی PSO توانسته که نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، سریع‌تر به همگرایی برسد و همچنین این الگوریتم توانسته نتیجه نهایی دقیق‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ارائه دهد.

با توجه به نتایج مشخصه همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مشخص و منطقی است که مشخصه سرعت حاصل از پارامترهای تخمین زده شده توسط الگوریتم PSO، نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، توانسته به منحنی مرجع شبیه‌تر باشد که در شکل ۹ این موضوع نشان داده شده است. در این شکل مشخصه سرعت مرجع و مشخصه سرعت حاصل از تابع انتقال با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی نشان داده شده است. همچنین برای بررسی دقیق‌تر مشخصه سرعت شکل ۹، ویژگی‌های پاسخ تابع انتقال این مشخصه در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج این جدول به خوبی نشان می‌دهد که الگوریتم PSO نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی توانسته در تخمین پارامترهای تابع انتقال نتایج بهتری را حاصل نماید؛ به طوری که سیگنال پاسخ تابع انتقال حاصل از این الگوریتم، کمترین اختلاف را با سیگنال مرجع دارد.

نتایج تخمین پارامترهای تابع انتقال توسط روش‌های بهینه‌سازی PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. در جدول ۵ بر اساس نتایج میانگین مقدار تابع هدف، الگوریتم‌ها رتبه‌بندی شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، بهترین عملکرد را بین نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم HGS دارد. بعد از آن، الگوریتم PSO



شکل ۷: مشخصه همگرایی الگوریتم PSO به ازای جمعیت‌های مختلف.



تعداد فراخوانی تابع هدف

شکل ۸: مشخصه همگرایی الگوریتم PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی.

نویزهای این سیگنال توسط تابع میانگین متحرک ساده (SMA) حذف گردیده و همچنین در مقاله حاضر، سیگنال سرعت مرجع بر اساس واحد رایج دور بر دقیقه نشان داده شده است.

اندازه جمعیت و شرط توقف برای تمامی الگوریتم‌های بهینه‌سازی به ترتیب برابر با ۱۰ عضو و ۱۰۰۰۰ فراخوانی تابع هدف در نظر گرفته شده و به علاوه، هر الگوریتم بهینه‌سازی ۱۰ مرتبه به طور مستقل اجرا گردیده است. همچنین تنظیمات مربوط به پارامترهای الگوریتم‌های HGS [۲۰]، HHO [۲۱]، RUN [۲۲]، SMA [۲۳]، GA [۲۴] و DE [۲۵] نیز مشابه با تنظیمات به کار گرفته شده در مقاله مرجع متناظر بوده و یا طوری تنظیم شده که به طور گسترده توسط محققان مختلف استفاده شده است. در جدول ۳، تنظیمات مربوط به الگوریتم‌های بهینه‌سازی به کار گرفته شده در مقاله حاضر آمده است.

جهت انتخاب بهتر الگوریتم حل مسئله باید نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه شوند. پس از تحلیل و بررسی نتایج می‌توان نقاط قوت و ضعف الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف را در خصوص این مسئله جمع‌بندی کرد. در شکل ۸ مشخصه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی نشان داده شده است.

با توجه به اینکه این مشخصه‌ها به ازای تعداد جمعیت یکسان (۱۰ عضو) و همچنین بر مبنای تعداد فراخوانی تابع هدف ترسیم شده‌اند،

جدول ۴: ویژگی‌های پاسخ تابع انتقال حاصل از الگوریتم PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی.

ویژگی‌های پاسخ تابع انتقال	سیگنال مرجع	GA		SMA		RUN		HGS	
		اندازه	اختلاف	اندازه	اختلاف	اندازه	اختلاف	اندازه	اختلاف
زمان صعود	۰.۶۸۳۰۴	۰.۶۸۲۹۳	1.16×10^{-4}	۰.۶۸۱۳۲	۰.۰۰۱۷۲	۰.۶۸۲۹۰	1.41×10^{-4}	۰.۶۸۳۰۴	1.05×10^{-6}
زمان گذرا	۱.۲۱۷۳۵	۱.۲۱۷۲۳	1.17×10^{-4}	۱.۲۱۴۲۸	۰.۰۰۳۰۷	۱.۲۱۷۰۶	2.84×10^{-4}	۱.۲۱۷۳۵	1.24×10^{-6}
زمان قله	۹.۷۲۱۰۰	۹.۶۷۶۰۰	۰.۰۴۵۰۰	۹.۷۱۰۰۰	۰.۰۱۱۰۰	۹.۶۱۷۰۰	۰.۱۰۴۰۰	۹.۶۲۰۰۰	۰.۱۰۱۰۰
مقدار قله	۱۴۰۰.۰۳۷۰۰	۱۴۰۰.۰۳۰۰۳	۰.۰۰۶۹۷	۱۴۰۰.۰۸۵۱۴	۰.۰۴۸۱۴	۱۴۰۰.۰۳۹۰۹	۰.۰۰۲۰۸	۱۴۰۰.۰۳۶۹۸	2.37×10^{-5}
مقدار نشست	۱۲۶۰.۳۱۳۶۴	۱۲۶۰.۳۵۱۴۶	۰.۰۳۷۸۲	۱۲۶۰.۰۷۰۴۶	۰.۲۴۳۱۸	۱۲۶۰.۳۸۷۸۵	۰.۰۷۴۲۱	۱۲۶۰.۳۱۳۹۳	2.92×10^{-4}
ویژگی‌های پاسخ تابع انتقال	سیگنال مرجع	HHO		PSO		DE			
		اندازه	اختلاف	اندازه	اختلاف	اندازه	اختلاف	اندازه	اختلاف
زمان صعود	۰.۶۸۳۰۴	۰.۶۵۲۸۴	۰.۰۲۹۲۰	۰.۶۸۳۰۴	1.00×10^{-7}	۰.۶۸۳۰۴	1.87×10^{-7}	۰.۶۸۳۰۴	1.87×10^{-7}
زمان گذرا	۱.۲۱۷۳۵	۱.۱۷۹۱۶	۰.۰۲۸۱۹	۱.۲۱۷۳۵	1.14×10^{-7}	۱.۲۱۷۳۵	2.51×10^{-7}	۱.۲۱۷۳۵	2.51×10^{-7}
زمان قله	۹.۷۲۱۰۰	۹.۲۷۰۰۰	۰.۴۵۱۰۰	۹.۷۰۷۰۰	۰.۰۴۱۰۰	۹.۶۸۰۰۰	۰.۰۴۱۰۰	۹.۶۸۰۰۰	۰.۰۴۱۰۰
مقدار قله	۱۴۰۰.۰۳۷۰۰	۱۳۹۹.۵۹۵۲۵	۰.۴۴۱۷۵	۱۴۰۰.۰۳۷۰۰	1.45×10^{-7}	۱۴۰۰.۰۳۷۰۲	1.33×10^{-5}	۱۴۰۰.۰۳۷۰۲	1.33×10^{-5}
مقدار نشست	۱۲۶۰.۳۱۳۶۴	۱۲۶۰.۱۵۴۰۷	۰.۱۵۹۵۷	۱۲۶۰.۳۱۳۶۶	1.86×10^{-5}	۱۲۶۰.۳۱۳۶۵	1.06×10^{-5}	۱۲۶۰.۳۱۳۶۵	1.06×10^{-5}

* مفهوم این ویژگی‌ها، به صورت نمایشی در شکل ۳ نشان داده شده است.

فرم جدول به علت طول زیاد تغییر کرد. درستی اعداد اعشاری توسط مولف چک شود.

جدول ۵: نتایج میانگین، انحراف معیار و کمترین مقدار تابع هدف و میانگین زمان اجرای الگوریتم بهینه‌سازی PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی.

	[۲۷] ICS	[۲۷] ATS	GA	SMA	RUN	HGS	HHO	PSO	DE
رتبه عملکرد (میانگین تابع هدف)	۳	۴	۵	۶	۷	۱	۹	۲	۸
انحراف تابع هدف	-	-	0.144048	0.2039315	0.629339	6.813×10^{-8}	13.489264	1.152×10^{-6}	0.2420601
میانگین تابع هدف	0.0009	0.001	0.0078689	0.0820414	0.0509707	2.150×10^{-7}	11.290370	7.347×10^{-7}	0.1046628
کمترین مقدار تابع هدف	-	-	1.259×10^{-5}	2.246×10^{-3}	4.863×10^{-5}	2.412×10^{-8}	0.8237	5.475×10^{-10}	4.879×10^{-9}
میانگین زمان اجرا	۱۲۴.۷۸	۲۴۳.۴۶	۱۸۱.۸۸۲	۱۷۷.۳۵۲	۱۷۷.۳۶۳	۱۷۶.۷۹۹	۱۷۷.۰۲۹	۱۷۸.۲۷۰	۱۷۶.۵۷۵

درستی اعداد اعشاری توسط مولف چک شود.

جدول ۶: نتایج تخمین پارامترهای تابع انتقال با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO و سایر روش‌های بهینه‌سازی.

پارامترهای تابع انتقال	[۲۷] ICS	[۲۷] ATS	GA	SMA	RUN	HGS	HHO	PSO	DE
τ_m	۰.۳۱۱۲	۰.۳۱۱۰	۰.۳۱۰۹۲۰	۰.۳۱۱۷۲۳	۰.۳۱۰۹۸۶	۰.۳۱۰۹۴۳	۰.۳۰۳۱۱۴	۰.۳۱۲۳۰۱	۰.۳۱۰۹۰۹
τ_e	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۰۲۱	۰.۰۰۰۰۱۰	۰.۰۰۰۰۱۰	۰.۰۰۰۰۴۴	۰.۰۰۰۳۸۶۰	۰.۰۰۰۱۳۹۵	۰.۰۰۰۰۱۰
τ_a	۰.۰۰۰۱	۰.۰۰۰۱۴	۰.۰۰۰۱۴۷۹	۰.۰۰۰۰۸۵۸	۰.۰۰۰۱۳۲۹	۰.۰۰۰۱۴۵۷	۰.۰۰۰۸۶۲۳	۰.۰۰۰۰۹۹	۰.۰۰۰۱۴۹۰
K	-	-	60.040293	70.04257	697.18613	590.64249	694.42451	526.60370	689.15901

مرزبندی نمود: موارد مربوط به جنبه‌های کلی مسئله تخمین پارامترهای تابع انتقال در سایر مراجع بیان شده است؛ اما جهت تکمیل این محور تحقیقاتی، جنبه‌های استانداردسازی مسئله در قالب یک مسئله مدون بهینه‌سازی با در نظرگیری ویژگی‌های مختلف تابع پله و همچنین توسعه روش‌های حل این مسئله به کمک الگوریتم‌های نوین و هوشمند بهینه‌سازی در مقاله حاضر مطرح گردیده و به انجام رسیده است. نتایج روش PSO با نتایج سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی اعم از الگوریتم‌های نوین HGS، HHO، RUN و SMA که به تازگی معرفی شده‌اند و همچنین الگوریتم‌های GA و DE مقایسه شده است. این مقایسه نشان داده که الگوریتم‌های PSO و HGS، روش‌هایی هستند که برای حل این مسئله مناسب هستند. البته نتایج الگوریتم PSO نشان داده که یک روش بسیار مؤثر و دقیق جهت تخمین پارامترهای تابع انتقال مجموعه موتور و اینورتر می‌باشد.

مراجع

- [1] C. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*, Wiley, 2012.
- [2] J. Cortés-Romero, A. Luviano-Juarez, R. Alvarez-Salas, and H. Sira-Ramírez, "Fast identification and control of an uncertain brushless DC motor using algebraic methods," in *Proc. 12th IEEE Int. Power*

توانسته نتایج خوبی را ارائه دهد. اما نکته قابل توجه در خصوص نتایج الگوریتم HGS، کمترین مقدار تابع هدف است که الگوریتم مذکور در این خصوص نتوانسته عملکرد مناسبی داشته باشد. همچنین کمترین مقدار تابع هدف الگوریتم DE نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد خوبی داشته است ولی نتوانسته میانگین و انحراف تابع هدف خوبی نیز داشته باشد. به عبارتی، الگوریتم DE توانایی عبور از بهینه‌های محلی و رسیدن به جوابی نزدیک به بهینه سراسری را در هر اجرای مستقل ندارد. بنابراین با در نظر گرفتن مقادیر انحراف معیار، میانگین و کمترین مقدار تابع هدف جدول ۵، الگوریتم‌های PSO و HGS می‌توانند برای حل این مسئله مناسب باشند.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله برای تخمین پارامترهای تابع انتقال موتور DC بدون جاروبک و اینورتر مربوط به تغذیه آن از الگوریتم PSO استفاده شده است. این روش تخمین پارامترها از طریق به حداقل رساندن اختلاف بین سیگنال اندازه‌گیری شده از سرعت واقعی و سرعت خروجی مدل تابع انتقال، با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد. همچنین می‌توان دستاوردهای این مقاله را با دیگر مراجع و تحقیقات پیشین به این صورت

- [21] A. A. Heidari, et al., "Harris Hawks optimization: algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849-872, Aug. 2019.
- [22] I. Ahmadianfar, A. A. Heidari, A. H. Gandomi, X. Chu, and H. Chen, "RUN beyond the metaphor: an efficient optimization algorithm based on Runge Kutta method," *Expert Systems with Applications*, vol. 181, Article ID: 115079, Nov. 2021.
- [23] S. Li, H. Chen, M. Wang, A. A. Heidari, and S. Mirjalili, "Slime mould algorithm: a new method for stochastic optimization," *Future Generation Computer Systems*, vol. 111, pp. 300-323, Oct. 2020.
- [24] A. H. Wright, "Genetic algorithms for real parameter optimization," *Foundations of Genetic Algorithms*, vol. 1, pp. 205-218, 1991.
- [25] J. Ronkkonen, S. Kukkonen, and K. V. Price, "Real-parameter optimization with differential evolution," in *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 506-513, Edinburgh, UK, 2-5 Sept. 2005.
- [26] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks, ICNN'95*, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [27] D. Kumpanya, S. Thaiparnat, and D. Puangdownreong, "Parameter identification of BLDC motor model via metaheuristic optimization techniques," *Procedia Manufacturing*, vol. 4, pp. 322-327, 2015.
- [28] P. Erdogmus, *Particle Swarm Optimization with Applications*, IntechOpen, 2018.
- [29] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, Feb. 2002.
- [30] C. L. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*, John Wiley & Sons, 2012.
- [31] T. Li and J. Zhou, "High-stability position-sensorless control method for brushless DC motors at low speed," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 5, pp. 4895-4903, May 2019.
- [32] J. U. Liceaga-Castro, I. I. Siller-Alcalá, J. Jaimes-Ponce, R. A. Alcántara-Ramírez, and E. Arévalo Zamudio, "Identification and real time speed control of a series DC motor," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, Article ID: 7348263, 2017.
- [33] A. K. Wallace and R. Spee, "The effects of motor parameters on the performance of brushless DC drives," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 2-8, Jan. 1990.
- [34] Y. A. Apatya, A. Subiantoro, and F. Yusivar, "Design and prototyping of 3-phase BLDC motor," in *Proc. 15th IEEE Int. Conf. on Quality in Research (QiR): Int. Symp. on Electrical and Computer Engineering*, pp. 209-214, Nusa Dua, Bali, Indonesia 24-27 Jul. 2017.
- [35] B. Vaseghi, N. Takorabet, and F. Meibody-Tabar, "Fault analysis and parameter identification of permanent-magnet motors by the finite-element method," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 45, no. 9, pp. 3290-3295, Sept. 2009.
- [36] IEEE Std. 1812-2014, *IEEE Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines*, pp. 1-56, 2015.
- [37] R. Beloiu, "Dynamic determination of DC motor parameters-simulation and testing," in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI'14*, pp. 13-18, Bucharest, Romania, 23-25 Oct. 2014.
- [38] R. Shanmugasundram, K. M. Zakariaiah, and N. Yadaiah, "Effect of parameter variations on the performance of direct current (DC) servomotor drives," *J. of Vibration and Control*, vol. 19, no. 10, pp. 1575-1586, 2013.
- [39] I. Virgala and M. Kelemen, "Experimental friction identification of a DC motor," *International J. of Mechanics and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 26-30, 2013.
- [40] S. A. Odhano, et al., "Identification of three-phase IPM machine parameters using torque tests," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 1883-1891, May/June. 2017.
- [41] C. Xiang, X. Wang, Y. Ma, and B. Xu, "Practical modeling and comprehensive system identification of a BLDC motor," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, Article ID: 879581, 2015.
- [42] S. Cong, G. Li, and X. Feng, "Parameters identification of nonlinear DC motor model using compound evolution algorithms," in *Proc. of the World Congress on Engineering*, vol. 1, 6 pp. 15-20, London, UK, 30 Jun.-2 Jul. 2010.
- [43] I. Anshory, I. Robandi, and M. Ohki, "System identification of BLDC motor and optimization speed control using artificial intelligent," *International J. of Civil Engineering and Technology*, vol. 10, no. 7, pp. 1-13, 2019.
- [44] K. Balamuruga and R. Mahalakshmi, "Parameter identification in BLDC motor using optimization technique," *J. of Applied Science and Engineering Methodologies*, vol. 3, no. 2, pp. 465-470, 2017.
- [45] I. D. Landau and G. Zito, *Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation*, Springer, 2006.
- [46] E. B. Siqueira, J. L. Mor, R. Z. Azzolin, and V. M. de Oliveira, "Algorithm to identification of parameters and automatic re-project of speed controller of BLDC motor," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 19, pp. 256-261, 2015.
- [47] Y. Yang, H. Chen, A. A. Heidari, and A. H. Gandomi, "Hunger games search: visions, conception, implementation, deep analysis, perspectives, and towards performance shifts," *Expert Systems with Applications*, vol. 177, Article ID: 114864, Sept. 2021.

احمد شیرزادی در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه دولتی شهید مهاجر اصفهان و در سال ۱۴۰۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران دریافت نمود. زمینه‌های علمی و کاری مورد علاقه ایشان عبارتند از: شناسایی سیستم‌ها، بهینه‌سازی به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری، تحلیل و طراحی میدل‌های الکترونیک قدرت، هوش محاسباتی در مهندسی برق.

آرش دهستانی کلاگر در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه اصفهان و مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۹۳ به‌عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، میدل‌های توان بالا، فیلترهای اکتیو، کوره‌های قوس الکتریکی و سیستم‌های مغناطیسی.

محمدرضا علیزاده پهلوانی در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۷۷ الی ۱۳۸۸ نام‌برده به عنوان محقق سیستم‌های قدرت در مرکز تحقیقات کنترل دانشگاه صنعتی مالک اشتر مشغول به کار بود. در سال ۱۳۸۲ به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه علم و صنعت ایران وارد گردید و در سال ۱۳۸۸ موفق به اخذ درجه دکتری مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. ایشان از سال ۱۳۸۸ در مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه با مرتبه استادی می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، سیستم پالسی، شبکه‌های الکتریکی و کنترل می‌باشد.