



KNO-1201-4701

کنترل دینامیکی سرعت موتور BLDC با استفاده از کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم شاهین هریس بر مبنای مدل المان محدود

احسان قنواتی^۱ ehsan1.ghanavati@yahoo.comمحمود مقدسیان^۲ m.moghadasian@scu.ac.ir^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد برق، پردیس صنعتی شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز^۲ استادیار گروه برق، پردیس صنعتی شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده: در این مقاله روشی جهت کنترل سرعت موتور BLDC با استفاده از درایو اینورتر شش سوئیچ ارائه شده است. در این روش جهت کنترل رفتار دینامیکی موتور (سرعت، جریان و گشتاور) از کنترلرهای PID و فازی استفاده شده و جهت تعیین پارامترهای کنترلرها از الگوریتم HHO به علت سرعت و دقت بالا در حل مسایل بهینه سازی بهره گرفته شده است. برای بررسی عملکرد کنترل کننده والگوریتم پیشنهادی شبیه سازی با تابع هدف ITAE و در محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB صورت گرفته و نتایج شبیه سازی برای کنترلرهای PID و فازی با الگوریتمهای TLBO، GWO و HHO با هم مقایسه شده است. بررسی نتایج شبیه سازیها بیانگر برتری کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم HHO نسبت به سایر روشها می باشد. همچنین جهت اطمینان از صحت نتایج بدست آمده در MATLAB، مدل موتور در ANSYS/Maxwell نیز بر مبنای مدل المان محدود بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: موتور BLDC، کنترلر فازی، الگوریتم شاهین هریس

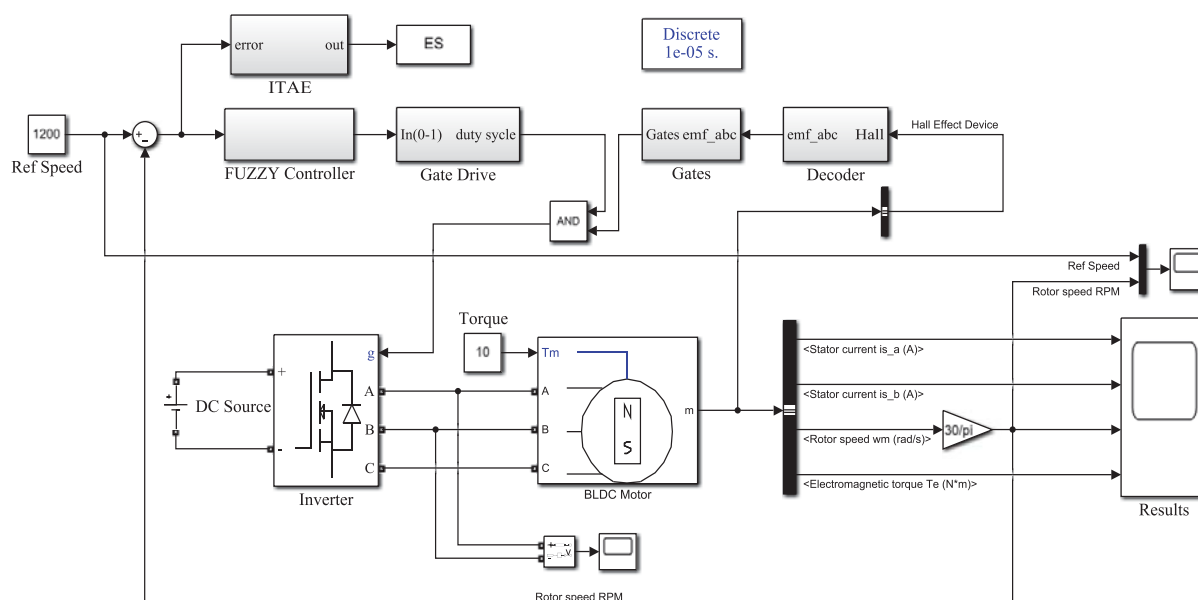
۱. مقدمه

یک موتور، انرژی الکتریکی مصرفی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند. انواع مختلفی از موتورها در صنعت مورد استفاده قرار میگیرند که در بین آنها، موتورهایی جریان مستقیم بدون جاروبک^۱ به دلیل ویژگیهای بارزی همچون قابلیت کنترل پذیری، بهره وری و راندمان بالا، حذف کماتاتور^۲ مکانیکی و بهره‌مندی از کموتاسیون الکترونیکی و در نتیجه کاهش تلفات اصطکاک و سایر مشکلات کماتاتور مکانیکی و علاوه بر قابلیت استفاده در سرعت‌های بالا، گشتاور بالا با وابستگی کمتر گشتاور خروجی نسبت به دور موتور و... با استقبال فراوانی در کاربردهای متنوع از جمله لوازم خانگی، رباتیک، صنایع سخت افزار کامپیوتر، صنایع نظامی، حمل و نقل، دستگاه‌های CNC و... روبرو شده اند. لذا یافتن روش‌های کنترل سرعت دقیق و بهینه این موتورها به عنوان یک مسئله مهم همواره مورد توجه محققان این حوزه قرار دارند. با این حال، کنترل دینامیکی سرعت در این موتورها به دلیل ماهیت غیرخطی سیستم، تغییرات بار، اغتشاشات محیطی و پارامترهای متغیر موتور با چالش‌های فراوانی روبرو است [1],[2],[3]. در گذشته به علت عدم پیشرفت مباحث الکترونیک قدرت و انواع مبدل‌ها و متعاقباً محدودیت در تولید ولتاژ با فرکانس‌های مختلف و قابل کنترل، موتورهایی BLDC چندان مورد توجه نبوده اند ولی امروزه با پیشرفت در حوزه الکترونیک قدرت و امکان تولید ولتاژ با فرکانس‌های متنوع مورد نیاز امکان راه اندازی و کنترل موتورهایی BLDC فراهم شده و این موتورها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته اند. نمای کلی کنترل دور موتور BLDC در یک سیستم کنترل حلقه بسته در شکل-۱ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل-۱ مشخص است جهت تولید میدان قابل

^۱ Brushless DC motor (BLDC)^۲ Commutator



کنترل در استاتور موتور BLDC از یک اینورتر (Inverter) شش سوئیچ جهت ایجاد کماتاسیون الکتریکی استفاده شده است [4]. جهت تنظیم Duty Cycle این مبدل، در یک سیستم کنترلی حلقه بسته استفاده شده است. جهت انتخاب کنترلر مناسب در سیستم کنترلی حلقه بسته از کنترلرهای PID کلاسیک و فازی^۳ استفاده شده است و در نهایت با مقایسه رفتار کنترلرهای بهترین و مناسب ترین کنترلر انتخاب خواهد شد. در روش‌های متداول کنترلی، مانند استفاده از کنترلر PID توانایی لازم برای پاسخ‌دهی سریع، مقاوم بودن در برابر اغتشاشات، و تطابق با شرایط دینامیکی متغیر موتور محدود است. به همین علت، استفاده از کنترلرهای فازی به عنوان یکی از رویکردهای هوشمند کنترل، در سال‌های اخیر گسترش یافته است. کنترلر فازی، با بهره‌گیری از قواعد زبانی و استنتاج انسانی، قابلیت تطبیق‌پذیری بالا در محیط‌های غیرخطی و نادقیق را دارد. با این وجود، طراحی بهینه ساختار و پارامترهای این کنترلر نقش بسزایی در عملکرد نهایی آن دارد و بهینه‌سازی این پارامترها با روش‌های کلاسیک با موانعی مانند گیر افتادن در کمینه‌های محلی مواجه می‌شود. جهت یافتن ضرایب مناسب کنترلرها روش‌های متنوعی وجود دارد که یکی از بهترین روش‌ها استفاده از هوش مصنوعی از طریق الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد [5], [6], [7], [8], [9], [10]. در نهایت با بررسی رفتار دینامیکی موتور شامل پاسخ مناسب به تغییرات سرعت و کنترل نوسانات جریان موتور حین تغییر سرعت و گشتاور بار با استفاده از کنترلرهای ذکر شده در شرایط یکسان و مقایسه نمودارهای سرعت و جریان، کنترلر مناسب تر پیشنهاد خواهد شد [2], [3], [6], [8].



شکل-۱: نمای سیستم کنترل موتور BLDC در MATLAB

روش‌های زیادی جهت یافتن ضرایب کنترلرها در حوزه زمان و لاپلاس وجود دارد که برترین این روش‌ها استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری از قبیل GA, TLBO, PSO, GA, GWO و الگوریتم‌های جدیدتر مانند HHO^۵ باشند [3], [6], [8], [11]. اکثر الگوریتم‌های بهینه‌سازی قدیمی تر دارای مشکلاتی از قبیل گیر کردن الگوریتم در حلقه‌های تکرار، زمان طولانی جهت پاسخ به سیستم، ساختار پیچیده و حجیم، جواب‌های متنوع، مشکل در همگرایی و... می‌باشند. در الگوریتم بهینه‌سازی HHO اکثر مشکلات ذکر شده رفع گردیده و یکی از مناسب ترین روش‌ها جهت بهینه‌کردن ضرایب کنترلرها می‌باشد. در این تحقیق جهت یافتن بهترین الگوریتم،

³ proportional-integral-derivative controller

⁴ Fuzzy controller

⁵ Hawk's Harris Optimizer



الگوریتم های فراابتکاری TLBO، GWO و HHO باهم مقایسه شده اند و از میان این الگوریتم ها، الگوریتم HHO راهکاری مناسب برای یافتن تنظیمات بهینه کنترلر می باشد [11],[6],[3],[2],[1].

۲. معرفی سیستم

۱.۲. موتور BLDC

در این بخش به بیان مدل ریاضی موتور BLDC پرداخته می شود. با در نظر گرفتن فرضیات ذیل معادلات ولتاژ یک موتور BLDC بصورت رابطه (۱) بیان می گردد.

- ماشین در حالت اشباع نمی باشد.

- مقاومت و اندوکتانس خودی هر فاز استاتور با دیگر فازهای آن برابر است.

- اندوکتانس متقابل فازهای مختلف نیز با یکدیگر برابرند.

- تلفات هسته ناچیز است.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در معادله فوق e_a, e_b, e_c ولتاژهای ضدمحرکه دوزنقه ایی شکل می باشند. همچنین گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده و سرعت موتور نیز از روابط (۲) و (۳) بدست می آیند.

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3)$$

که در آن، T_L گشتاور بار بوده و J, B نیز به ترتیب ضریب اصطکاک بار و ممان اینرسی ارجاعی به شافت روتور می باشند. مشخصه های سرعت و گشتاور موتور BLDC از معادله (۴) می تواند با صرف نظر از میرایی به صورت بیان گردد.

$$\omega_r = \frac{1}{J} \int (T_e - T_L).dt = \frac{1}{J} \int [(T_a + T_b + T_c)].dt \quad (4)$$

رابطه بین توان الکتریکی (P_e) و توان مکانیکی (P_m) در موتورهای BLDC به صورت رابطه (۵) است.

$$P_e = E. I_{m_{e \max}} \quad (5)$$

همچنین گشتاور به طور مستقیم با تغییر دامنه جریان مطابق با رابطه (۶) قابل کنترل می باشد.



$$T_e = \frac{E}{\omega_r} I t \left(K_t = \frac{E}{\omega_r} = \frac{K_e \cdot \omega_r}{\omega_r} \approx K_e \right)_{max} \quad (۶)$$

که در آن K_t ثابت گشتاور است. در این مدل، وضعیت روتور (θ_r) با استفاده از سرعت زاویه‌ای روتور (ω_r) بدست می‌آید که مقدار آن از ۰ تا 2π رادیان در هر سیکل الکتریکی تغییر می‌نماید. بنابراین جریان‌های سه‌فاز موتور می‌توانند برحسب ولتاژهای خط به خط بیان شوند و معادله (۷) بین ولتاژ و جریان خط به خط موتور برقرار خواهد بود.

$$\begin{cases} V_{ab} = R_{LL} i_1 + (L - M)_{LL} \cdot \frac{di_1}{dt} + e_{ab} \\ V_{bc} = R_{LL} i_2 + (L - M)_{LL} \cdot \frac{di_2}{dt} + e_{bc} \\ V_{ca} = R_{LL} i_3 + (L - M)_{LL} \cdot \frac{di_3}{dt} + e_{ca} \end{cases} \quad (۷)$$

ولتاژ ضدمحرکه تابعی از وضعیت روتور (θ_r) می‌باشد و دامنه‌ای برابر با $e = K_e \cdot \omega_r$ دارد. در این گزارش در مدلسازی ولتاژ ضدمحرکه فرض شده‌است که همه فازها شکل موج ولتاژ ضدمحرکه یکسانی دارند و جهت ساخت آنها سیگنال‌های منطقی دریافت شده از سنسورهای اثر هال مطابق جدول تنظیم گیت‌های مقایسه‌گر به سه ولتاژ ضدمحرکه موتور تبدیل می‌گردند. ولتاژ ضد محرکه موتور BLDC بر مبنای وضعیت روتور از روابط (۸) بدست می‌آیند.

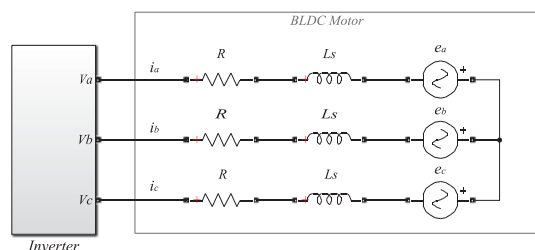
$$e_a = \begin{cases} (6E/\pi) \cdot \theta_r, 0 < \theta_r < \pi/6 \\ E\pi/6 < \theta_r < 5\pi/6 \\ -(6E/\pi) \cdot \theta_r + 6E5\pi/6 < \theta_r < 7\pi/6 \\ -E7\pi/6 < \theta_r < 11\pi/6 \\ (6E/\pi) \cdot \theta_r - 12E11\pi/6 < \theta_r < 2\pi \end{cases}$$

$$e_a = \begin{cases} (6E/\pi) \cdot \theta_r, 0 < \theta_r < \pi/6 \\ E\pi/6 < \theta_r < 5\pi/6 \\ -(6E/\pi) \cdot \theta_r + 6E5\pi/6 < \theta_r < 7\pi/6 \\ -E7\pi/6 < \theta_r < 11\pi/6 \\ (6E/\pi) \cdot \theta_r - 12E11\pi/6 < \theta_r < 2\pi \end{cases} \quad (۸)$$

$$e_a = \begin{cases} (6E/\pi) \cdot \theta_r, 0 < \theta_r < \pi/6 \\ E\pi/6 < \theta_r < 5\pi/6 \\ -(6E/\pi) \cdot \theta_r + 6E5\pi/6 < \theta_r < 7\pi/6 \\ -E7\pi/6 < \theta_r < 11\pi/6 \\ (6E/\pi) \cdot \theta_r - 12E11\pi/6 < \theta_r < 2\pi \end{cases}$$



مدار معادل یک موتور BLDC در شکل ۲- نمایش داده شده است.



شکل ۲: مدار معادل موتور BLDC

۲.۲. کنترلر PID

این سیستم کنترل کلاسیک به عنوان یکی از کنترلرهای قدیمی با کارکرد مطلوب و ارزان قیمت در بسیاری از سیستم‌های کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کنترلر یک کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی بوده که مقدار خطا بین خروجی فرآیند و مقدار مطلوب را به حداقل می‌رساند. روابط حاکم بر کنترلر PID در رابطه (۹) نمایش داده شده است.

$$U(t) = Kp * e(t) + Ki \int e(t)dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

که در آن $e(t)$ مقدار خطای سیستم، Kp ، Ki و Kd به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی و مشتقی کنترلر و $U(t)$ خروجی مطلوب کنترلر می‌باشند.

۳.۲. کنترلر فازی

منطق فازی در سال ۱۹۶۵ توسط پروفسور لطفی زاده، استاد دانشگاه کالیفرنیا در برکلی، معرفی شد. هدف از این نظریه، ارائه روشی برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌هایی بود که اطلاعات ورودی آن‌ها مبهم، نادقیق یا ناقص هستند. برخلاف منطق کلاسیک که مفاهیم را به صورت کاملاً دقیق و دوحالته (صفر یا یک، درست یا غلط) در نظر می‌گیرد، منطق فازی اجازه می‌دهد که درجاتی از عضویت در مفاهیم و دسته‌بندی‌ها وجود داشته باشد؛ به طوری که یک پدیده می‌تواند هم‌زمان به چندین دسته با شدت‌های مختلف تعلق گیرد. این کنترلر شکلی از منطق‌های چندارزشی بوده که در آن ارزش منطقی متغیرها می‌تواند هر عدد حقیقی بین ۰ و ۱ و خود آن‌ها باشد. این منطق به منظور به کارگیری مفهوم درستی جزئی به کارگیری می‌شود، به طوری که میزان درستی می‌تواند هر مقداری بین کاملاً درست و کاملاً غلط باشد. منطق فازی دارای چهار بخش اصلی فازی سازی^۶، پایگاه قوانین^۷، موتور استنتاج فازی^۸ و برگرداندن از فازی^۹ می‌باشد. در این پژوهش از روش ممدانی برای فازی سازی و از روش گرانیگاه برای غیر فازی سازی استفاده در روش گرانیگاه سطح بدست آمده در مرحله استنتاج را بدست آورده، آن را بر محور افقی تصویر میکنیم، بنابراین میانگین وزندار شده تمام مقادیر متغیر خروجی را بدست می آوریم به عبارت دیگر وزن هر خروجی، درجه عضویت آن است. یکی از بهترین روش های غیرفازی سازی روش فوق می باشد زیرا تمام نقاط حوزه تعریف و درجه عضویت آنها را در بر میگیرد. توابع عضویت و روابط فازی استفاده شده به منظور انجام تنظیمات و تعریف کنترلر فازی استفاده شده در این مقاله به ترتیب در جدول ۱- و شکل ۲- نشان داده شده اند.

⁶ Fuzzifier

⁷ Rule Base

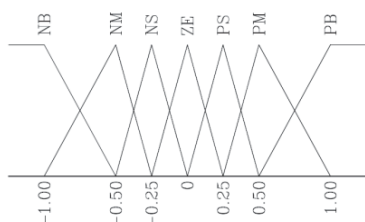
⁸ Inference engine

⁹ De fuzzifier



جدول ۱- روابط فازی (Fuzzy rules)

$\Delta\epsilon/\epsilon$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZE



شکل ۲- توابع عضویت کنترل فازی (Membership function)

۴.۲. سیستم درایو موتور BLDC

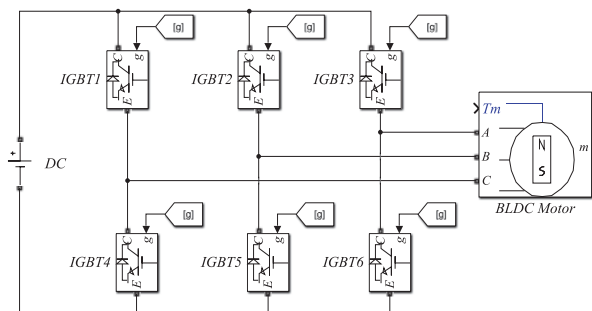
کنترل موتور BLDC در حالت کلی، به دو دسته سنسوری و بدون سنسور (Sensor less) تقسیم می‌شوند. در کنترل سنسوری برای اندازه‌گیری موقعیت روتور از سنسورهای اثر هال تعبیه شده در استاتور استفاده می‌شود که موقعیت نسبی را اندازه می‌گیرند. سنسورهای اثر هال در بازه‌های برابری (معمولاً ۶۰ یا ۱۲۰ درجه الکتریکی) چیده شده‌اند. در کنترل سنسوری، از ترکیب سنسور اثر هال با ترانزیستورهای قدرت استفاده می‌شود که به عنوان کلید الکترونیکی در اینورتر سه فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. سنسور اثر هال یک سیگنال منطقی صفر یا یک تولید می‌کند. شکل ۳- یک نمونه از سیستم کنترل یک موتور BLDC را نمایش می‌دهد. سوئیچ‌های Q1 تا Q6 کلید قدرت بوده که می‌توانند از نوع Mosfet نیز باشند. جدول ۲- نیز ترتیب کلیدزنی سوئیچ‌ها را براساس ورودی‌های A و B و C سنسورهای هال و برای گردش در جهت عقربه‌های ساعت نشان می‌دهند.

¹ metal-oxide semiconductor field-effect transistor



جدول ۲- کلید زنی جهت چرخش ساعتگرد موتور BLDC

Sequence	Hall Sensor Signal			Active PWM		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM(Q2)	PWM(Q5)	DC+	Off	DC-
2	0	0	0	PWM(Q2)	PWM(Q3)	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	PWM(Q6)	PWM(Q3)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM(Q6)	PWM(Q1)	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	PWM(Q4)	PWM(Q1)	DC-	DC+	Off
6	0	1	1	PWM(Q4)	PWM(Q5)	Off	DC+	DC-



شکل ۳- بلوک دیاگرام کنترل موتور BLDC با استفاده از اینورتر شش سوئیچ سه فاز

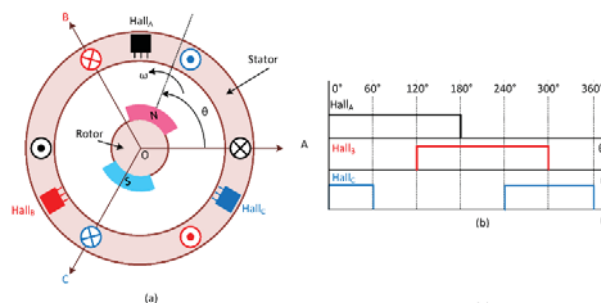
اگر سیگنال‌های نامگذاری شده با نام PWM مطابق با ترتیب کموتاسیون سوئیچ‌زنی گردند، موتور در سرعت نامی خواهد چرخد. با تغییر دوره کاری^۱ موج PWM، ولتاژ متوسط تغذیه استاتور کاهش یافته و لذا جریان، گشتاور و در نتیجه سرعت روتور کاهش می‌یابند. سرعت موتور می‌تواند در یک حلقه بسته و با اندازه‌گیری سرعت واقعی موتور تنظیم شود. خطای بین سرعت مرجع و واقعی توسط کنترل کننده تقویت گردیده و برای تنظیم دوره کاری سیگنال‌های PWM بکار رود.

۵.۲. تعیین موقعیت روتور

برخلاف موتور DC جاروبک‌دار، کموتاسیون یک موتور BLDC به‌صورت الکترونیکی صورت می‌گیرد. برای چرخش موتور، سیم‌پیچ‌های استاتور باید با ترتیبی مناسب تحریک گردند. برای تحریک سیم‌پیچ‌های استاتور، دانستن وضعیت روتور بسیار اهمیت دارد. تعیین وضعیت روتور توسط سنسور اثر هال^۲ می‌باشند. هر زمان که قطب‌های مغناطیسی روتور از نزدیکی یک سنسور هال عبور می‌نمایند یک سیگنال High یا Low که مبین عبور قطب N یا S از نزدیکی سنسور می‌باشد، ایجاد می‌نمایند. براساس ترکیب سیگنال‌های ایجاد شده توسط این سه سنسور ترتیب دقیق کموتاسیون قابل تعیین است. شکل ۴- نحوه جاسازی سنسورهای اثر هال و سیگنال‌های خروجی آن‌ها را در یک موتور BLDC نمایش می‌دهد. جاسازی سنسورهای هال بر روی استاتور فرآیند ساده‌ای نمی‌باشد زیرا غیر هم محور بودن سنسورها نسبت به مگنت‌های روتور منجر به ایجاد خطا در تعیین وضعی روتور می‌شود. برای سهولت عمل جاسازی سنسورهای هال بر روی استاتور از سه عدد مگنت کوچک بر روی روتور استفاده می‌شود که این مگنت‌ها نزدیک به سنسورهای هال قرار دارند. براساس مکان فیزیکی، سنسورهای هال دو نوع آرایش وجود دارد. سنسورهای هال در مکان‌های ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار گیرند.

¹ Duty Cycle

² Hall effect sensor



شکل ۴: سنسورهای اثرهال و سیگنال تولیدی آنها

۶.۲. الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس

در این مقاله استفاده از الگوریتم بهینه سازی «بهینه ساز هریس هاوکس» به عنوان یک روش کارآمد جهت یافتن ضرایب کنترلرها مطرح شده است لذا در این بخش به تشریح این الگوریتم و روش بهینه سازی آن پرداخته شده است، همچنین در بخش نتایج شبیه سازی به مقایسه عملکرد این الگوریتم با سایر الگوریتمها به منظور مشخص شدن برتری عملکرد آن پرداخته خواهد شد. این الگوریتم که در رده ی الگوریتمهای مبتنی بر جمعیت قرار می گیرد، برگرفته از رفتار گروهی و شگرد تعقیب شاهین های هریس می باشد که به «حمله غافل گیرانه» مشهور است. در این استراتژی هوشمند، چندین شاهین به صورت گروهی یک طعمه را از جهت های مختلف مورد حمله قرار داده و سعی می کنند آن را غافل گیر کنند. شاهین های هریس می توانند بسته به الگوی فرار طعمه، از الگوهای تعقیب مختلفی استفاده کنند که با استفاده از روابط ریاضی این الگوها و رفتارهای پویا فرمول بندی شده تا یک الگوریتم بهینه سازی حاصل شود. کارآمدی بهینه ساز HHO، با سایر روش های الهام گرفته از طبیعت از جمله GWO مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج آماری و نتایج بدست آمده از مقایسات نشان می دهند که عملکرد الگوریتم HHO بسیار امیدوار کننده بوده و با روش های فراابتکاری نوین قابل رقابت است.

۳. شبیه سازی و نتایج آن

شبیه سازی های انجام شده در این پژوهش با استفاده از نرم افزار MATLAB-R2021b صورت گرفته است. همچنین مشخصات سیستم لپتاپ استفاده شده جهت انجام شبیه سازی ها در جدول ۳ آورده شده است. همچنین جهت اعتبار خروجی های شبیه سازی ابتدا رفتار کنترلر کننده های فاز ی و PID را در کنترل دینامیکی سرعت با الگوریتم های مختلف مقایسه کرده تا مزیت استفاده از الگوریتم HHO مشخص گردد. و در قسمت های بعدی به بررسی رفتار سیستم شامل کنترل گشتاور، کنترل جریان و بین دو کنترلر فاز ی و PID بهینه شده با الگوریتم HHO پرداخته شده است. مشخصات و پارامترهای اینورتر استفاده شده در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است و مشخصات موتور نیز در جدول ۵ بیان شده است. همچنین نمای کلی شبیه سازی در MATLAB/Simulink پیشتر در شکل ۱- نمایش داده شده بود.



جدول ۳- مشخصات سیستم کامپیوتری

Device Specifications	
Device name	ASUS-CR25K5T
Device Processor	12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12500H 2.50 GHz
Installed RAM	16.0 GB (15.6 GB usable)
System type	64-bit operating system, x64-based processor
Windows Edition	Windows 11 Pro
Windows Version	23H2
Windows OS build	22631.5189
Windows Experience	Windows Feature Experience Pack 1000.22700.1077.0

جدول ۴- مشخصات اینورتر

Number of bridge arms	3
Number of switches	6
Snubber resistance R_s (Ohms)	100000
Snubber capacitance C_s (F)	inf
Power Electronic device	MOSFET / Diodes

جدول ۵- مشخصات موتور BLDC

Back EMF waveform	Trapezoidal
Number of phases	3
Mechanical input	Torque T_m
Stator phase resistance R_s (Ohm)	0.0485
Stator phase inductance L_s (H)	0.0085
Back EMF flat area (degrees)	120
Inertia- J (kg.m^2)	0.0027
viscous damping- F (N.m.s)	0.0004924
pole pairs	4
static friction- T_f (N.m)	0
Discrete solver model	Trapezoidal non iterative

۱.۳. عملکرد کنترلرها در کنترل سرعت

در این بخش به ارائه نتایج شبیه سازی جهت کنترل سرعت موتور BLDC با استفاده از کنترلرهای فازی و PID و الگوریتمهای HHO، GWO و TLBO پرداخته شده است.

جدول ۶- تنظیمات اولیه الگوریتمهای HHO، GWO و TLBO

Upper Band	0
Lower Band	5000
Max Iterations	100
Population Size	50

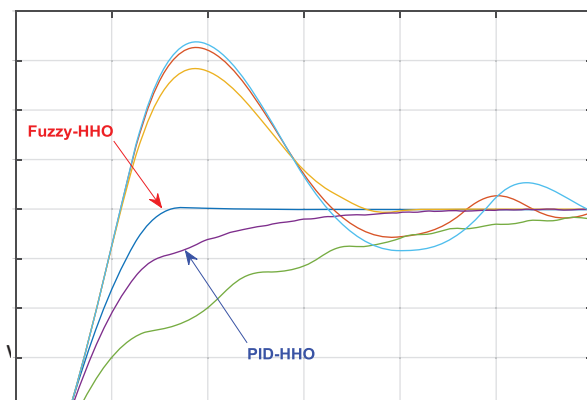
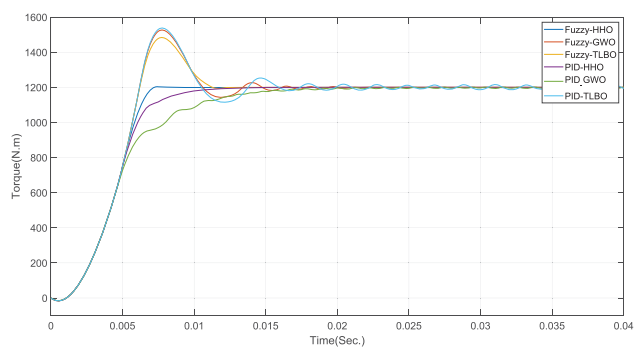


جهت بررسی عملکرد الگوریتم‌ها پارامترهای تمام آن‌ها به صورت مشابه و مطابق مندرجات جدول ۶- انجام شده است و همچنین نتایج تنظیمات الگوریتم‌ها رو پارامترهای کنترلی در جدول ۷- ارائه شده است. با توجه به توضیحات مذکور و تنظیم پارامترهای کنترلهای فازی و PID مطابق جدول ۷- نتایج کنترل سرعت موتور BLDC در ۶ وضعیت در شکل ۵- نشان داده شده است.

جهت وضوح بهتر تصویر و امکان مقایسه عملکرد کنترلهای و الگوریتم‌های بهیته سازی تصویر نمای نزدیکتر شکل ۵- نیز نمایش داده شده است.

جدول ۷- : تنظیمات پارامتر کنترلهای با الگوریتم‌های مختلف

Controller	Controller Parameters	HHO	GWO	TLBO
PID	Proportional (P)	3.13E+03	1.16E+03	2.21E+00
	Integral (I)	2.01E+03	8.51E+02	1.21E+00
	Derivative (D)	5.12E+00	3.21E+00	1.33E+00
	Filter coefficient (N)	4.85E+03	1.47E+03	6.54E-02
Fuzzy	K1	8.20E+02	2.02E+03	1.21E+03
	K2	1.06E+00	9.08E-02	3.22E-01
	K3	2.59E+01	1.93E+03	1.43E+03





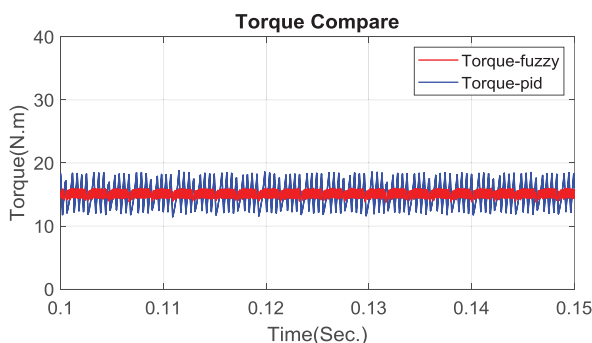
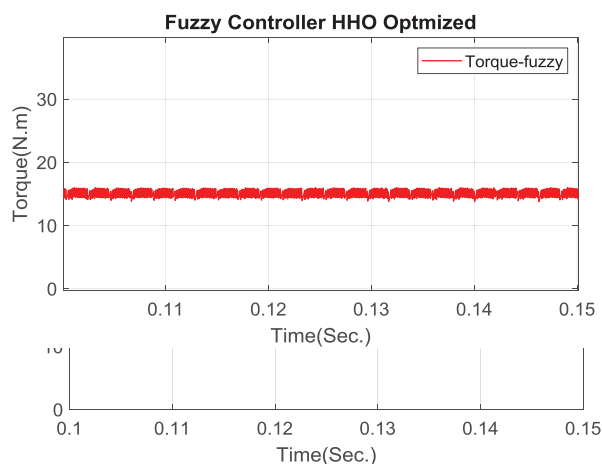
شکل-۵: کنترل سرعت کنترلر فازی و PID با الگوریتم‌های مختلف

با توجه به عملکرد نزدیک کنترلر فازی و PID بهینه شده با الگوریتم HHO در فرآیند کنترل سرعت، جهت مشخص شدن کنترلر برتر در بخش‌های بعدی به بررسی سایر پارامترها از جمله ریبیل گشتاور بار و جریان استاتور می‌پردازیم تا کارایی بهتر کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم HHO مشخص گردد.

۲.۳. عملکرد کنترلرها در کنترل گشتاور

گرچه هدف اصلی این مقاله متمرکز بر کنترل سرعت موتور می‌باشد، اما به دلیل اهمیت بالای کنترل گشتاور، این موضوع نیز به عنوان یکی از اهداف کنترلی فرعی مورد توجه قرار گرفته است.

موتورهای BLDC به دلیل برخورداری از دانسیته گشتاور و توان بالا، در مقایسه با بسیاری از موتورهای جریان متناوب، از راندمان بالاتری برخوردارند. با این حال، به واسطه شکل موج غیرسینوسی جریان و فرآیند کموتاسیون میان فازها، این موتورها ذاتاً دچار ریبیل گشتاور می‌شوند. این ریبیل در سرعت‌های بالا به یک معضل جدی تبدیل شده و موجب کاهش گشتاور متوسط، کاهش توان خروجی و در نتیجه افت راندمان کلی موتور می‌گردد. بنابراین در این پروژه، کاهش ریبیل گشتاور موتور عنوان دومین هدف کنترلی مهم در نظر گرفته. لذا در این بخش به بررسی کنترل دینامیکی گشتاور بار در کنترلرهای فازی و PID پرداخته شده است. به این منظور گشتاور مکانیکی 15 N.m به سیستم اعمال شده و سرعت تنظیمی برابر 1200 rpm می‌باشد. عملکرد کنترل گشتاور دو کنترلر در شکل-۶ نمایش داده شده است. همانگونه میدانیم گشتاور موتور BLDC دارای ریبیل ذاتی می‌باشد، گشتاور خروجی با کنترلر فازی بسیار نرم تر و با ریبیل کم می‌باشد در حالیکه کنترلر PID اعوجاجات بیشتر و قابل توجهی در گشتاور بار ایجاد نموده است. لذا علیرغم رفتار نزدیک به هم دو کنترلر در کنترل سرعت، کنترلر فازی در کنترل گشتاور بار عملکرد به مراتب بهتری نسبت به کنترلر PID دارد.

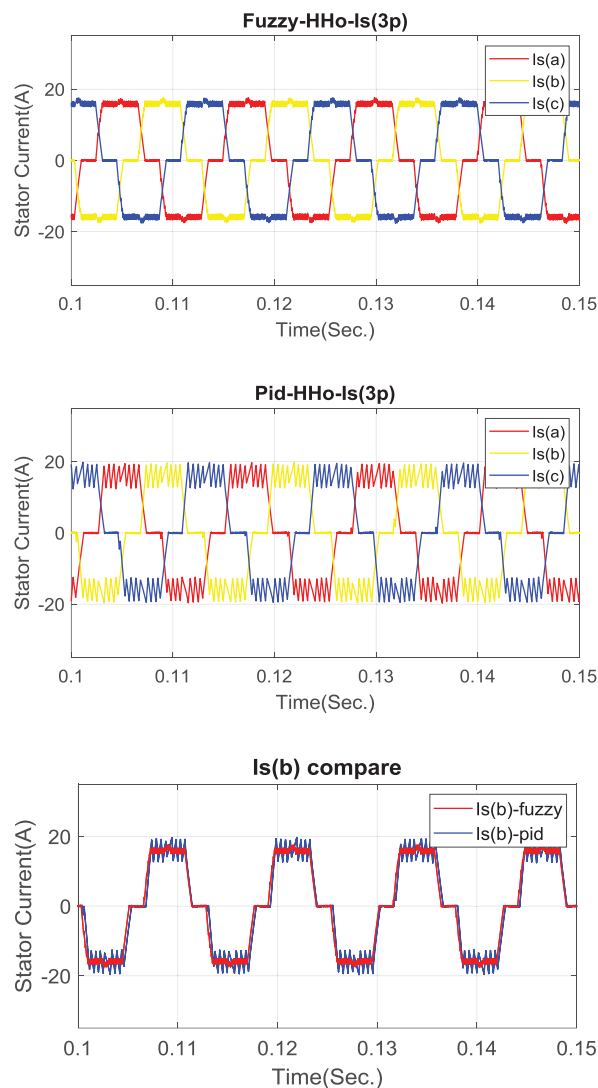


شکل-۶: نمودار عملکرد کنترلرها در کنترل دینامیکی گشتاور



۳.۳. عملکرد کنترلرها در کنترل جریان استاتور

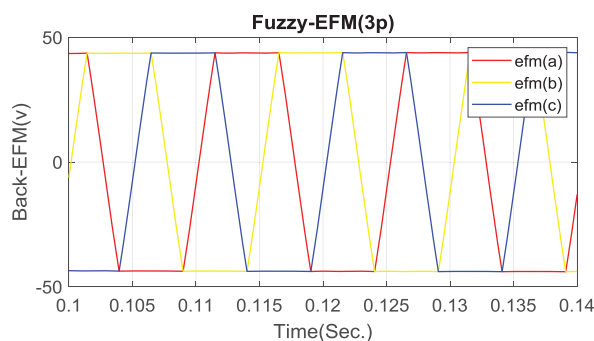
علاوه بر اهداف ذکر شده نظیر کنترل سرعت و کنترل گشتاور، کنترل جریان استاتور را می‌توان از اهداف مهم دیگر یک سیستم کنترل کارآمد بیان کرد. زیرا کنترل اعوجاجات جریان می‌تواند از آسیب به استاتور و اینورتر جلوگیری نماید. لذا در شکل-۷ ابتدا جریان استاتور ۳ فاز موتور با کنترلر فازی و بعد جریان ۳ فاز موتور با کنترلر PID آورده شده و جهت روشن تر شدن موضوع جریان فاز-b هردو کنترلر نیز با هم مقایسه شده است. همانگونه که در شکل-۷ مشخص است کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم HHO عملکرد بسیار مناسبی در کنترل جریان استاتور نسبت به کنترلر PID بهینه شده با الگوریتم HHO داشته است.



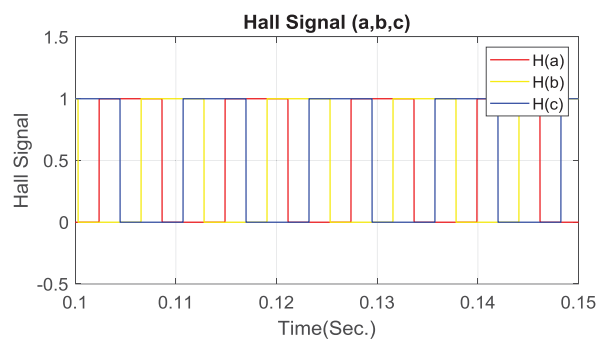
شکل-۷: نمودار عملکرد کنترلرها در کنترل جریان استاتور

۴.۳. سیگنال هال و ولتاژ ضد محرکه

با توجه به اینکه صحت عملکرد سیستم شبیه سازی شده و کلیه نمودارهای قبلی در گرو عملکرد صحیح سنسورهای اثرهال جهت نمایش دقیق موقعیت روتور و شکل گیری صحیح ولتاژهای ضد محرکه (Back emf) لذا در این بخش نمودارهای مربوط به ولتاژ ضد محرکه در شکل-۸ و نمایش سیگنالهای اثرهال در شکل-۹ ارائه شده اند. با مقایسه این نمودارها به نمودارهای نظری مشخص میگردد سیستم شبیه سازی به درستی عمل نموده است.



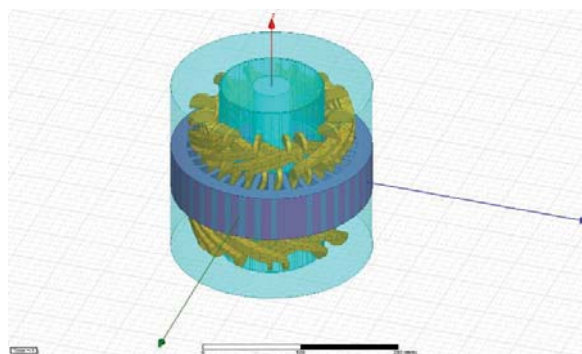
شکل-۸: ولتاژ ضد محرکه موتور BLDC



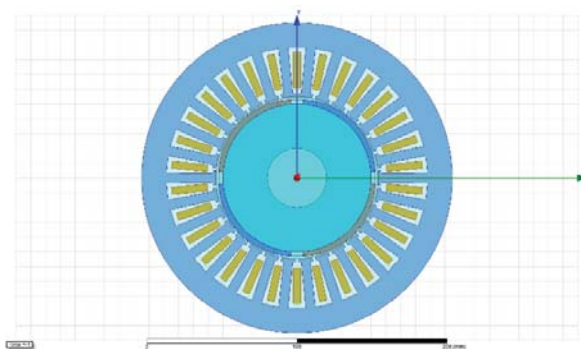
شکل-۹: سیگنال سنسورهای اثر هال

۵.۳. مدل المان محدود (FEM) موتور BLDC

در بخش‌های قبل به بررسی عملکرد کنترلرها در محیط MATLAB/Simulink پرداخته شد. با توجه به امکان مدلسازی دقیق‌تر مدل موتور BLDC به صورت مدل المان محدود در Ansys/Maxwell به منظور مطابقت خروجی‌های MATLAB، مدل موتور در Ansys/Maxwell پیاده سازی شده است و نمودار سرعت و گشتاور موتور با مدل MATLAB مقایسه گردیده است. در شکل ۴-۱۰ و ۴-۱۱ به ترتیب نمای دو بعدی و یه بعدی موتور BLDC مدل شده در Ansys/Maxwell نشان داده شده است. شایان ذکر است جهت بررسی دقیق‌تر، پارامترهای طراحی موتور BLDC در Ansys/Maxwell عیناً مشابه موتور طراحی شده در MATLAB انتخاب گردیده اند.



شکل-۱۰: نمای سه بعدی موتور BLDC شبیه سازی شده در Ansys/Maxwell

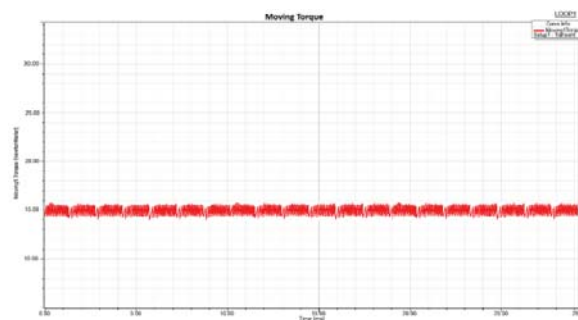


شکل-۱۱: نمای دو بعدی موتور BLDC شبیه سازی شده در Ansys/Maxwell

با توجه به اینکه هدف از ارائه مدل المان محدود موتور مقایسه کنترل سرعت و کنترل گشتاور موتور BLDC با مدل ارائه شده در MATLAB می باشد، لذا نمودار سرعت و گشتاور بار در مدل المان محدود به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده اند.



شکل-۱۲: سرعت موتور BLDC در Ansys/Maxwell



شکل-۱۳: گشتاور موتور BLDC در Ansys/Maxwell

با توجه به اینکه مشخصات موتور طراحی شده در Ansys/Maxwell و موتور طراحی شده در MATLAB دقیقاً مشابه می باشد لذا گشتاور بار 15N.m در سرعت تنظیمی 1200 rpm به موتور اعمال شده است. با مقایسه شکل-۱۳ با شکل-۶ مشخص است که گشتاور بار مدل MATLAB و ANSYS بسیار نزدیک به هم بوده و این امر دقت مدل MATLAB را تأیید می کند. همچنین با مقایسه نمودار سرعت مدل ANSYS ارائه شده در شکل-۱۲ با نمودار سرعت مدل MATLAB ارائه شده در شکل-۵ به وضوح مشخص است که هر دو مدل از دقت مطلوب برخوردار می باشند.

۴. نتیجه گیری



در این مقاله هدف اصلی ارائه روش مناسب جهت کنترل سرعت موتور BLDC بود که در قالب یک سیستم کنترل حلقه بسته متشکل از اجزاء مختلف از جمله موتور، درایو، سیستم کنترل و الگوریتم بهینه سازی مطرح گردید. در بخش‌های قبلی ساختمان و نحوه عملکرد هریک از اجزاء سیستم کنترل حلقه بسته تشریح گردید. ابتدا موتور BLDC به عنوان سیستم تحت کنترل و اصول عملکردی آن به طور کامل تشریح گردید، سپس به معرفی درایو کنترل دور موتور (اینورتر شش سوئیچ) و روش عملکرد آن پرداخته شد. همچنین به بحث و بررسی در خصوص کنترل سرعت موتور و انواع روش‌های مختلف کنترل و بررسی کنترلرهای PID و فازی پرداخته شد. همچنین عملکرد الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس تشریح و عملکرد آن با سایر الگوریتم‌ها مقایسه گردید که بیانگر عملکرد بهتر این الگوریتم بود و روش کنترل دور موتور BLDC با استفاده از کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم شاهین هریس به عنوان موضوع اصلی بحث و روش کنترلی مدنظر مطرح گردید. این روش به دلیل توانایی بالای آن در پیش‌بینی رفتار سیستم و پاسخ‌دهی سریع به تغییرات، به یکی از گزینه‌های مطلوب برای بهبود عملکرد موتور در شرایط مختلف تبدیل شده است. علاوه بر این، به تشریح روش کنترل سنسوری از طریق سنسورهای اثرهال به عنوان یک روش مرسوم، ارزان قیمت و در دسترس مورد بررسی قرار گرفت که این تکنیک در کنار کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم شاهین هریس قادر است جهت انجام کماتاسیون الکتریکی به‌طور دقیق وضعیت روتور را تخمین بزند و در عین حال دقت بالایی را در عملکرد حفظ سرعت موتور داشته باشد. در نهایت نتایج شبیه سازی در فصل چهارم مشخص نمود این ترکیب سیستم کنترلی (کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم شاهین هریس) نسبت به کنترلرهای کلاسیک قدیمی کارایی مناسب تری مخصوصاً در زمینه کنترل دینامیکی سرعت موتور، گشتاور بار و جریان استاتور داشته است. استفاده از سیستم کنترلی اشاره شده انعطاف‌پذیری سیستم کنترلی را در برابر تغییرات بار، تغییر پارامترهای سیستم و ورودی‌های اغتشاش افزایش می‌دهد و به سیستم این امکان را می‌دهد که به سرعت به تغییرات واکنش نشان دهد و عملکرد خود را بهینه کند. این امر به سیستم اجازه می‌دهد تا کنترل مناسبی از سرعت و گشتاور را در محدوده‌های مختلف سرعت فراهم کند و عملکرد بهتری در شرایط متغیر ارائه دهد. این کنترل‌کننده قادر است در سرعت‌های مختلف موتور عملکرد بهینه‌ای داشته باشد و خطای تخمین را در حالت‌های ماندگار و گذرا کاهش دهد. در نتیجه، استفاده از کنترلر فازی نه تنها کارایی سیستم را افزایش می‌دهد بلکه به بهبود پایداری و دقت در کنترل دور موتور BLDC کمک می‌کند. در این مقاله علاوه بر اجرای سیستم کنترل در نرم افزار MATLAB جهت صحت سنجی نتایج بدست آمده، مدل موتور به صورت مدل المان محدود در ANSYS نیز اجرا گردید که مقایسه نتایج نشان می‌دهد عملکرد مدل MATLAB دقیق و قابل قبول می‌باشد.



۵. مراجع

- [1] Shenbagalakshmi, R., Mittal, S. K., Subramaniam, J., Vengatesan, V., Manikandan, D., & Ramaswamy, K. (2025). Adaptive speed control of BLDC motors for enhanced electric vehicle performance using fuzzy logic. *Scientific Reports*, 15(1), 12579.
- [2] Shi, J., Mi, Q., Cao, W., & Zhou, L. (2022). Optimizing BLDC motor drive performance using particle swarm algorithm-tuned fuzzy logic controller. *SN Applied Sciences*, 4(11), 293.
- [3] He, M., Zhang, T., Huang, J., & Luo, C. (2020, March). Speed control study of brushless DC motor based on fuzzy optimization PID. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 768, No. 4, p. 042013). IOP Publishing.
- [4] Farhan, S. A. (2021). Optimization of DC motor speed control based on fuzzy logic-PID controller. *Системы анализа и обработки данных*, (3 (83)), 143-153.
- [5] Balamurugan, K., & Mahalakshmi, R. (2020). ANFIS—fractional order PID with inspired oppositional optimization-based speed controller for brushless DC motor. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 18(01), 1941004.
- [6] Anshory, I., Hadidjaja, D., & Sulistiyowati, I. (2021). Measurement, modeling, and optimization speed control of BLDC motor using fuzzy-PSO based algorithm. *Journal of Electrical Technology UMY*, 5(1), 17-25.
- [7] Wang, T., Wang, H., Hu, H., Lu, X., & Zhao, S. (2022). An adaptive fuzzy PID controller for speed control of brushless direct current motor. *SN Applied Sciences*, 4(3), 71.
- [8] Kristiyono, R., & Wiyono, W. (2021). Autotuning fuzzy PID controller for speed control of BLDC motor. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(5), 400-407.
- [9] Kroičs, K., & Būmanis, A. (2024). BLDC motor speed control with digital adaptive PID-fuzzy controller and reduced harmonic content. *Energies*, 17(6), 1311.
- [10] Maghfiroh, H., Ramelan, A., & Adriyanto, F. (2022). Fuzzy-PID in BLDC motor speed control using MATLAB/Simulink. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(1), 8-13.
- [11] Ali Asghar Heidari a,b, Seyedali Mirjalili c, Hossam Faris d, Ibrahim Aljarah d, Majdi Mafarja e, Huiling Chen f. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Elsevier Future Generation Computer Systems* 97 (2019) 849–872