

## بهینه‌سازی انرژی مصرفی دو موتور الکتریکی تزویج‌شده بر اساس الگوریتم ژنتیک

مهرداد جعفریلند<sup>(۱)</sup> - محمود زاده باقری<sup>(۲)</sup>

(۱) گروه برق - دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

(۲) گروه برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج

**خلاصه:** دو موتور الکتریکی تزویج‌شده می‌تواند جانشین تک‌موتور نیروی محرک زیردریایی شود. در این صورت با تغییر سرعت زیردریایی، توان پروانه و متعاقباً توان مکانیکی این دو موتور نیز تغییر می‌کند. یکی از مسایل مهم در کنترل‌کننده سیستم تزویج دو موتور الکتریکی نحوه تقسیم مناسب توان بار بین دو موتور است. در مقالات گزارش‌شده قبلی توان بار به صورت غیربهینه بین موتورهای تقسیم شده است. در این مقاله کنترل‌کننده بهینه‌ای طراحی شده که بازده سیستم را حداکثر می‌کند. تخصیص بهینه بار موتورهای مختلف متفاوت است. کنترل‌کننده پیشنهادی این مقاله مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است و قادر است در تمامی سرعت‌ها توان بار را بین موتورهای تقسیم شده تقسیم کند. نتایج شبیه‌سازی رفتار مناسب سیستم و تقسیم بهینه توان بار را نمایش می‌دهد.

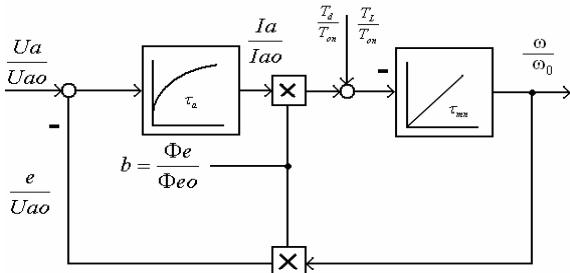
**کلمات کلیدی:** هم‌محور کردن، بهینه‌سازی، نسبت جریان‌ها، الگوریتم ژنتیک (GA)، راندمان و برد سیستم محرک.

### ۱- مقدمه

استفاده از دو موتور به جای یک موتور به دلایل مختلف در صنعت متداول شده است. به دلیل محدودیت در تکنولوژی آهنربای دائم ساخت موتورهای بزرگتر از ۲۰kW مشکل است. در [۱] به جای یک موتور ۲۴۰kW که در سیستم پیل سوختی کاربرد داشته از دو موتور ۱۲۰kW استفاده شده است. این دو موتور مشابه هستند و تقسیم بار بین آنها به سادگی انجام می‌شود و به دلیل فرم فرایند پیل سوختی علی‌رغم جمع شدن توان خروجی موتورها، دو موتور هیچ کوپلاژی با هم ندارند و مبحث دو موتور مختلف مطرح نشده است. در [۲، ۳] برای شناورهای زیرسطحی از تزویج مکانیکی دو موتور جریان مستقیم مختلف استفاده شده است تا بازده سیستم افزایش یابد. یکی از اهداف اصلی در طراحی شناور زیرسطحی افزایش مدت زمان ماندگاری شناور در زیر آب است. تحقق چنین هدفی در گروهی مصرف بهینه انرژی است. بنابراین هرچه بازده سیستم محرک شناور زیرسطحی بیشتر باشد مدت زمان ماندگاری شناور در زیر آب طولانی‌تر است، موتور dc تحریک مستقل یکی از گزینه‌های رایج برای سیستم محرک شناور زیرسطحی میدجت است که باید راندمان آن در تمام سرعت‌ها مطلوب باشد. یکی از روشها برای رسیدن به این هدف تزویج دو موتور جریان

مستقیم متفاوت است که کنترل‌کننده آن در [۴] ارائه شده است. به طوریکه توان موتورهای صرفاً به نسبت توان نامی دو موتور تقسیم شده است و یک تقسیم توان بهینه نیست. در این مقاله کنترل‌کننده‌ای بهینه‌ای ارائه شده است که تقسیم توان بار را به صورت بهینه انجام می‌دهد. از آنجا که با تغییر بار هر موتور راندمان آن تغییر می‌کند بایستی بار مکانیکی به نحوی بین دو موتور تقسیم شود که بازده مجموع دو موتور ماکزیمم شود. برای این منظور موتور و کنترل‌کننده‌های آن در محیط سیمولینک مطلب مدل‌سازی شده و به کمک الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه‌ای برای نسبت جریان‌های دو موتور برای بیشینه شدن بازده به دست آمده است. لازم است محدودیت‌هایی بر روی جریان‌ها اعمال شود تا در حالت دائمی جریان‌های دو موتور هم‌محور شده بیش از مقدار نامی نشوند. در این مقاله بر اساس روش الگوریتم ژنتیک طرح نوینی ارائه می‌شود تا با توجه به رعایت قیود سیستم بتوان توان بار را به صورت بهینه بین موتورهای تزویج‌شده تقسیم کرد تا برد زیردریایی افزایش یابد. برای کنترل‌کننده بهینه هیچ نمونه دیگری گزارش نشده است.

می‌توانند بر روی عملکرد کنترلر سرعت تأثیر بگذارند. اگرچه تنها ممان اینرسی و سرعت مرجع تأثیر بیشتری بر روی عملکرد کنترل‌کننده کلاسیک دارند. شکل (۲) دیاگرام سرعت موتور dc با تحریک جداگانه و مدارالکتریکی سیم‌پیچ‌های آرمیچر و میدان را برای یک موتور نشان می‌دهد [۵، ۶، ۷]. شکل (۳) بلوک دیاگرام یک موتور dc با تحریک جداگانه را در حالت دائم نشان می‌دهد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام موتور dc با تحریک جداگانه

۳-۱- طراحی کنترل‌کننده

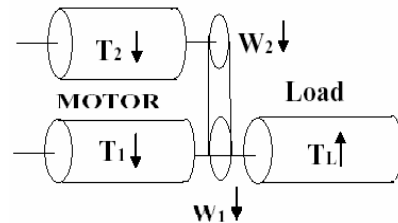
لازم است سرعت موتورها به نحوی باشد که اولاً دو موتور توان بار را به نحو بهینه بین خود تقسیم کنند ثانیاً بتوانند سرعت بار را برای تمامی مقادیر مطلوب تنظیم کنند. از مدار مبدل الکترونیکی مناسب استفاده شده که از طریق کنترل تحریک موتور کوچکتر موفق به تقسیم مناسب توان بار بین دو موتور می‌شود. ابتدا سناریوی کنترل سیستم مطرح می‌شود. لازم است به‌طور پیوسته دو هدف زیر برآورده شوند: هدف اول تقسیم مناسب توان بار بین دو موتور است. از آنجا که ولتاژ آرمیچر موتورها یکسان و ثابت است جریان آرمیچر به عنوان شاخص انتخاب می‌شود و به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۴].

$$I_L / I_S = X_{opt} \quad (1)$$

در اینجا  $I_S$  و  $I_L$  به ترتیب جریان‌های موتورهای بزرگ و کوچک هستند، و  $X$  همان نسبت بهینه جریانها است که در صورت تحقق باعث می‌شود بازده سیستم حداکثر شود. شاخص جریان دارای مزایای زیر است: - از طریق علامت جریان می‌توان از کارکرد موتوری اطمینان یافت و از ژنراتور شدن آنها جلوگیری کرد. - اندازه‌گیری جریان آرمیچر به سهولت امکان‌پذیر است. - الگوی ارائه شده بسیار ساده است. - می‌توان به سهولت از تقسیم مناسب توان بار بین دو موتور اطمینان یافت. - امکان اضافه جریان برای موتورها وجود ندارد. هدف دوم تنظیم سرعت موتورها برای دستیابی سرعت مطلوب بار است. لازم است کنترل‌کننده سرعت موتورها علاوه بر ارضاء هدف اول برای بار سرعت دلخواه را به وجود آورد. به عبارتی کنترل‌کننده بایستی دو هدف را به صورت توأم ارضاء کند. به منظور سهولت در طراحی از روشی ابتکاری استفاده می‌شود. موتورها دارای دو دینامیک اصلی الکتریکی و مکانیکی هستند که ثابت زمانی این دو دینامیک بسیار متفاوت است. به عبارتی قطب‌های این دو دینامیک به اندازه کافی از هم دور هستند که بتوان قبل از هر تغییر محسوس در دینامیک

۲- دینامیک سیستم موتور- بار

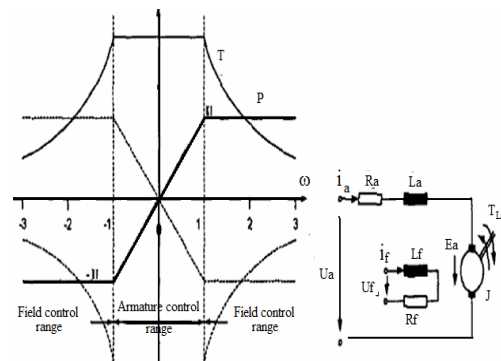
برای آنکه محرک مناسبی برای یک بار یا کاربرد خاص انتخاب شود ابتدا بایستی اطلاعات کاملی از نیازهای بار در دست باشد پس از آن موتوری با مشخصه‌های سرعت - گشتاور و سرعت - جریان متناسب با نیازهای بار انتخاب می‌شود. مشخصه موتور و بار هنگامی متناسب‌اند که بدون تجاوز جریان از مقدار جریان نامی موتور و ظرفیت جریانی منبع، نیازهای گشتاور و سرعت بار تامین شود. معمولاً موتور مکانیکی بار را توسط چند سیستم انتقال میانی به حرکت درمی‌آورد. در حالی که موتور همواره می‌چرخد، ممکن است بار یک حرکت چرخشی یا یک حرکت انتقالی داشته باشد. ممکن است سرعت چرخش بار با سرعت چرخش موتور یکسان نباشد. اگر بار شامل چندین قسمت باشد، سرعت‌های آنها می‌تواند متفاوت باشند و یا در حالیکه برخی از آنها می‌چرخند برخی دیگر می‌توانند حرکت انتقالی داشته باشند. سیستم دو موتور تزویج‌شده مختلف و بار با یک سیستم چرخشی معادل در شکل (۱) نمایش داده شده است [۳].



شکل (۱): سیستم معادل موتور- بار

۳- کنترل‌کننده

در دو موتور تزویج‌شده لازم است موتورها در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی نیز کار کنند. در اینجا به دلیل محدودیت حجم امکان استفاده از کنترل‌کننده ولتاژ آرمیچر وجود ندارد و ولتاژ آرمیچر دو موتور ثابت است و با ولتاژ تحریک سرعت بار کنترل می‌شود.



شکل (۲): محدوده کنترل موتور dc در حالت پایدار

یک کنترل‌کننده کلاسیک از نوع PI و یا PID در یک کنترل حلقه سرعت می‌تواند کنترلی با کیفیت مطلوب را برای تنظیم سرعت فراهم کند. کمیت‌هایی از جمله گشتاور بار، ممان اینرسی و سرعت مرجع،

معیار معینی را حداقل یا حداکثر نماید. بهینه‌سازی یعنی جستجو در فضای جواب‌های ممکن به دنبال بهترین جواب. در روش توزیع موتور جریان مستقیم مختلف دو ورودی سرعت و گشتاور وجود دارد که به ازای این دو ورودی یک خروجی بهینه به دست می‌آید. در واقع به ازای ترکیب‌های مختلف فرمان سرعت و گشتاور نسبت بهینه جریانها پیدا می‌شود، یعنی برای سرعت‌های مشخص در محدوده کارکرد هر موتور نسبت جریانهای بهینه دو موتور را به دست می‌آید. نحوه عمل به این صورت است که یک ثابت  $K$  در نسبت جریان‌های آرمیچر دو موتور (موتور کوچک و موتور بزرگ)  $I_{a1}/I_{a2}$  ضرب می‌شود. هر بار با تعیین  $K$  برای اعداد بزرگتر از یک و کوچکتر از یک نسبت جریان دو موتور تغییر می‌کند و با توجه به بازده محاسبه شده توسط برنامه برای هر سرعت نسبت جریان‌های نامی بهینه تعیین می‌شود. حالت‌های مختلفی که پس از محاسبه  $I_{a1}$  و  $I_{a2}$  (مرجع) به دست می‌آید.

حالت اول: پس از تعیین  $I_{a1}$  و  $I_{a2}$  بهینه هر دو در محدوده مجاز هستند یعنی  $X_{opt} = I_{ref} = I_{a1}^*/I_{a2}^*$

حالت دوم: یکی از جریانها از حد نامی تجاوز کرده، یعنی اگر  $I_{a1}^* > I_{an1}$  آنگاه  $I_{a1}^{**} = I_{an1}$  انتخاب می‌شود.

حالت سوم: اگر  $I_{a1}^* > I_{an1}$  و  $I_{a2}^* > I_{an2}$  یعنی بار اضافی به سیستم اعمال شده باشد که در لحظه راه‌اندازی همیشه این حالت رخ می‌دهد پس در زمان کوتاه راه‌اندازی از رابطه  $X_{opt} = I_{ref} = I_{an1}/I_{an2}$  استفاده می‌شود که در آن  $I_{an1}$  و  $I_{an2}$  به ترتیب جریانهای نامی آرمیچرهای دو موتور هستند [۱۱، ۱۲].

### ۳-۴- تابع هدف

تابع هدف شاخصی از نحوه عملکرد افراد در فضای مسئله به ما می‌دهد. در این مسئله تابع هدف بازده کل سیستم است و از رابطه (۲) به دست می‌آید. یعنی مساوی نسبت جمع توان خروجی دو موتور به جمع توان ورودی دو موتور که باید ماکزیمم شود. در تابع هدف باید کمترین متغیرها را داشته باشیم و با توجه به کوچک بودن تلفات تحریک معمولاً از تلفات تحریک صرف‌نظر می‌شود.

$$\eta = \frac{\frac{P_{out1} + P_{out2}}{P_{out1}} + \frac{P_{out2}}{P_{out2}}}{\eta_1 + \eta_2} \quad (2)$$

در اینجا  $P_{out1}$  و  $P_{out2}$  به ترتیب توان‌های خروجی دو موتور هستند و  $\eta_1$  و  $\eta_2$  به ترتیب راندمان موتور اول و دوم است.

### ۴- بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک

از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن مقدار  $X_{opt}$  استفاده می‌شود به این منظور برنامه الگوریتم ژنتیک در محیط Matlab تهیه شد تا مشخصات موردنظر از اجرای برنامه سیمولینک تعیین شوند. تنظیمات فایل‌ها مطابق مدل سیمولینک اجراشد.  $I_{a1}$  و  $I_{a2}$  به عنوان دو متغیر انتخاب شدند و هر کدام از بازه  $0/01$  تا مقدار نامی جریان موتور متناظر تغییر می‌کند و در هر ارزیابی تابع برازندگی نسبت آن دو را به جای

مکانیکی، دینامیک الکتریکی را برای شرایط دلخواه تطبیق داد. این ویژگی اساس ارائه روش ابتکاری است که از دو کنترل‌کننده تفکیک‌شده برای اهداف متفاوت فوق استفاده نمود. در این روش از دو کنترل‌کننده مجزای کلاسیک استفاده شده است. اولین کنترل‌کننده از دومی مستقل است و از طریق تنظیم ولتاژ تحریک موتور بزرگتر فقط سرعت موتور بزرگتر را برای تحقق سرعت دلخواه بار تنظیم می‌کند (دینامیک فرکانس پایین). عملکرد این کنترل‌کننده بر اساس خطای سرعت موتور اصلی از سرعت مطلوب است و دومین کنترل‌کننده وابسته به عملکرد کنترل‌کننده اول است و بر اساس خطای مشخص شده در رابطه  $e = (I_{aL} - x_{opt} / I_{aS})$  عمل کرده و ولتاژ تحریک موتور کوچکتر را تنظیم می‌کند (دینامیک فرکانس بالا).  $X_{opt}$  به عنوان ورودی مطلوب کنترل‌کننده و تحریک موتور کوچک به کار می‌رود. در اینجا هدف  $X_{opt}$  است و برای تعیین آن از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

### ۳-۲- مفاهیم پایه الگوریتم ژنتیک (GA)

از الگوریتم ژنتیک در این مقاله برای تعیین مقدار  $X_{opt}$  یا همان نسبت بهینه جریانهای آرمیچر دو موتور استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی موثر در فضاهای بسیار وسیع و بزرگ است که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت جواب بهینه می‌گردد. الگوریتم‌های ژنتیک با یک سری متغیرهای کدشده کار می‌کنند. مزیت کار با متغیرهای کدشده در این است که اصولاً کدها قابلیت تبدیل فضای پیوسته به فضای گسسته را دارند. یکی از تفاوت‌های اصلی روش GA با روشهای قدیمی بهینه‌سازی در این است که در GA با جمعیت یا مجموعه‌ای از نقاط در یک لحظه خاص کار می‌شود. درحالی که در روش‌های قدیمی بهینه‌سازی تنها برای یک نقطه خاص عمل می‌کند. یعنی GA تعداد زیادی از طرح‌ها را در یک زمان مورد پردازش قرار می‌دهد. نکته جالب دیگر این است که اصول GA بر پردازش تصادفی یا به تعبیر صحیح‌تر پردازش تصادفی هدایت شده استوار است. بنابراین عملگرهای تصادفی فضای جستجو را به صورت تطبیقی موردبررسی قرار می‌دهند. اصولاً برای استفاده از GA باید سه مفهوم مهم زیر مشخص شود: تعریف تابع هدف یا تابع هزینه - تعریف و پیاده‌سازی فضای ژنتیک - تعریف و پیاده‌سازی عملگرهای GA. الگوریتم‌های ژنتیک براساس اصل ادامه حیات بهترین‌ها و تکثیر نوع برتر پی‌ریزی شده است. برای یک زیردریایی مشخصی می‌توان برای هر سرعت خاص از روش GA مقدار  $X_{opt}$  را تعیین کرد و با ذخیره‌سازی مقادیر در جدول سرعت، هنگام بهره‌برداری بر اساس سرعت پروانه، مقدار  $X_{opt}$  از جدول تعیین‌شده به کنترل‌کننده کلاسیک اعمال کرد [۸-۱۰].

### ۳-۳- کنترل‌کننده بهینه

هدف سیستم کنترل بهینه تعیین سیگنالهای کنترل است تا در محدودیت‌ها یا قیود فیزیکی صدق کرده و در ضمن نحوه عملکرد یا

پس زمینه خاکستری نشان داده شده‌اند و برای آن حالت راندمانی محاسبه نشده است.

جدول (۱): مقایسه سه روش برای سرعت ۱۰۳ rad/s

سرعت ۱۰۳ rad/s										روش
T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	V <sub>f2</sub>	V <sub>f1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a1</sub>	η%		
۴/۸۸	۳/۳۷	۲۰۰	۱۷۳/۱	۵۵۷	۷۰۱/۲	۲/۸	۳/۵	۷۲/۹		پیشنهادی
۵/۴۵	۳/۱	۱۹۶/۹	۱۷۴/۷	۶۲۱/۱	۶۲۱/۱	۳/۲	۳/۲	۷۳/۶		KIa=1
۶/۷۷	۲/۳۵	۱۸۹/۸	۱۷۸/۲	۸۱۳/۵	۴۷۴/۶	۴	۲/۴	۷۲/۱۵		KIa=I <sub>an1</sub> /I <sub>an2</sub>

جدول (۲): مقایسه سه روش برای سرعت ۱۱۰ rad/s

سرعت ۱۱۰ rad/s										روش
T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	V <sub>f2</sub>	V <sub>f1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a1</sub>	η%		
۶/۷	۳/۲	۱۷۵/۸	۱۶۲	۸۶۶	۷۰۳	۴/۳	۳/۵	۷۲/۲		پیشنهادی
-	-	-	-	-	-	۳/۹	۳/۹	-		KIa=1
۷/۵	۲/۷	۱۷۴/۶	۱۶۴/۵	۱۰۰۹	۵۸۹	۵	۲/۹	۷۰/۸		KIa=I <sub>an1</sub> /I <sub>an2</sub>

جدول (۳): مقایسه سه روش برای سرعت ۱۱۵ rad/s

سرعت ۱۱۵ rad/s										روش
T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	V <sub>f2</sub>	V <sub>f1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	I <sub>a2</sub>	I <sub>a1</sub>	η%		
۷/۹۷	۳	۱۵۸	۱۵۵	۱۱۵۰	۷۰۴	۵/۷۵	۳/۵	۶۹/۸		پیشنهادی
-	-	-	-	-	-	۴/۵	۴/۵	-		KIa=1
۸/۱	۲/۹۵	۱۵۷/۳	۱۵۵/۴	۱۱۷۶	۶۸۶	۵/۸۸	۳/۴۳	۶۹/۴		KIa=I <sub>an1</sub> /I <sub>an2</sub>

### ۶- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم ژنتیک برای محدوده‌ای از سرعت انجام می‌شود تا زمانی که در سرعتی تابع هدف ۰/۰۱ شود که نشان می‌دهد دیگر در این سرعت جریان‌ها از محدوده مجاز بیشتر می‌شوند. ابتدا محدوده سرعت صفر تا ۱۵۰ رادیان بر ثانیه را توسط الگوریتم ژنتیک بررسی شد. شکل (۴) بهترین مقدار برازندگی کروموزم‌ها را در سرعت عادی مختلف نشان می‌دهد ملاحظه می‌شود که حداکثر سرعت ۱۱۵/۵ رادیان بر ثانیه است و بیشتر از آن جریان‌ها از حدود خود خارج شده و تابع برازندگی عدد ۰/۰۱ را نشان می‌دهد.

در نتیجه تا سرعت ۱۱۵/۵ rad/s بهترین نسبت با الگوریتم ژنتیک محاسبه می‌شود. برای محاسبه سریع‌تر تعداد جمعیت اولیه و تعداد نسل کم انتخاب می‌شود. در اینصورت ممکن است در برخی نقاط بهینه مطلق به دست نیاید ولی برای به دست آوردن حدود نسبت جریان کافی است. منحنی شکل (۵) برای نسبت بهینه جریانها به دست آید. مشاهده می‌شود که پوش این منحنی از یک بخش تقریباً ثابت تشکیل شده است که به دلیل وجود محدودکننده‌ها ولتاژ تحریک به وجود آمده است و در این قسمت سرعت نمی‌تواند از ۱۰۳ rad/s کمتر شود با توجه به منحنی بار که به صورت توان سوم از سرعت

نسبت جریان دو موتور در برنامه قرار می‌گیرد. در ادامه جریان‌های دو موتور استخراج شده و مقدار میانگین دائمی آن که از میانگین‌گیری از یک بازه پس از گذر کردن از حالت گذرا به دست می‌آید بررسی می‌شود. در این حالت اگر جریان دو موتور در محدوده مجاز باشد مقدار برازندگی برابر مقدار بازده انتخاب می‌شود و اگر جریان‌ها از مقدار مجاز خارج بود مقدار تابع برازندگی به یک عدد بسیار کوچک‌تر از مقدار راندمان مثلاً ۰/۰۱ محدود می‌شود. به این ترتیب عملاً این جواب‌ها کنار گذاشته خواهند شد یا شانس کمتری دارند. تابع برازندگی با توجه به مطالب بیان شده به صورت زیر خواهد بود:

$$F = \begin{cases} \text{efficiency} & 0 \leq I_{a1} \leq I_{an1} \ \& \ 0 \leq I_{a2} \leq I_{an2} \\ 0.01 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

تابع برازندگی تابعی است که برای تبدیل مقادیر تابع هدف به مقیاسی برای سازگاری و کارایی نسبی بکار می‌رود. نسبت جریان‌ها در محدوده نمایش داده شده زیر تغییر می‌کنند.

$$\frac{0.01}{I_{an2}} \leq \frac{I_{an1}}{I_{an2}} \leq \frac{I_{an1}}{0.01} \quad (4)$$

دقت تغییرات دو متغیر نیز کنترل می‌شود و در این مساله بازه هر متغیر به ۲۵۶ قسمت تقسیم شده است. با این دقت بالا روش جستجوی معمول با توجه به محدوده وسیع نسبت امکان‌پذیر نیست زیرا اطلاعی از ایده‌ای در مورد مقدار مناسب این نسبت وجود ندارد. اگر پس از اجرای الگوریتم ژنتیک مقدار نسبت بهینه نزدیک مرز رابطه (۳) بود باید محدوده متغیرها را وسیع‌تر کرد.

### ۴-۱- قیدهای حاکم بر طراحی

قیدهای حاکم بر سیستم باید در مدلسازی و شبیه‌سازی موردتوجه قرار گیرد در اینجا قیود به صورت زیر مشخص شده‌اند.

$$PL = P_{out1} + p_{out2}$$

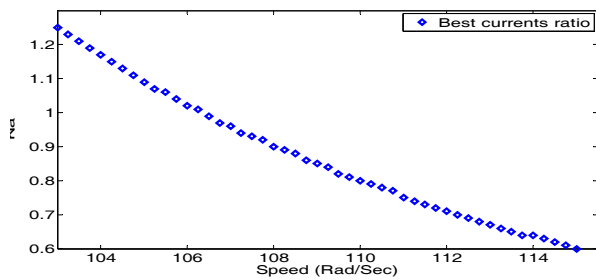
$$I_{a1} \leq I_{an1}$$

$$I_{a2} \leq I_{an2} \quad (5)$$

$$I_{ref} = \frac{I_{an1}}{I_{an2}}$$

### ۵- مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی دو موتور توزیع‌شده در حالت بهینه

در اینجا مقایسه برای چند سرعت مرجع ۱۱۵rad/sec, ۱۰۳rad/sec, ۱۱۰rad/sec انجام شده است و کل نتایج در جدول‌های زیر برای سه روش (روش پیشنهادی، روش KIa=1 و روش خطای سرعت، سرعت، جریان موتور کوچک، جریان موتور بزرگ، توان خروجی، توان ورودی، راندمان و زمان، با توجه به محدودکننده‌های طراحی شده در کنترل‌کننده‌ها فقط سرعت بین ۱۰۳ تا ۱۱۵/۵ قابل تغییر است. در جداول زیر مقادیری که از محدوده مجاز خارج‌اند با



شکل (۶): منحنی نسبت بهینه جریان با سرعت

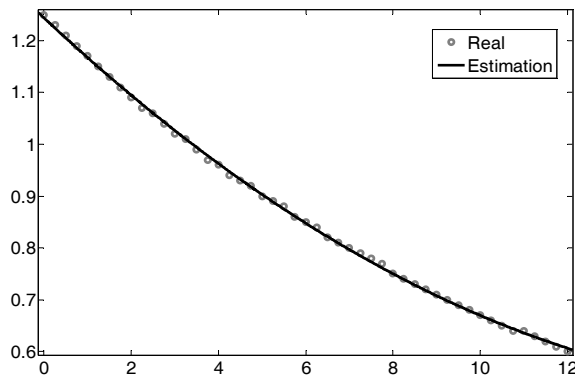
$$P_1=0.002152$$

$$P_2=-0.07894$$

$$P_3=1.244$$

(۷)

شکل (۷) نقاط واقعی و تابع به دست آمده برای آنها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این تابع به خوبی با نقاط واقعی مطابقت دارد.



شکل (۷): مقایسه داده واقعی و تخمین زده شده

در نتیجه تابع نسبت بهینه جریان بر حسب سرعت به صورت (۸) به دست می‌آید. در این رابطه سرعت بر حسب رادیان بر ثانیه محاسبه می‌شود.

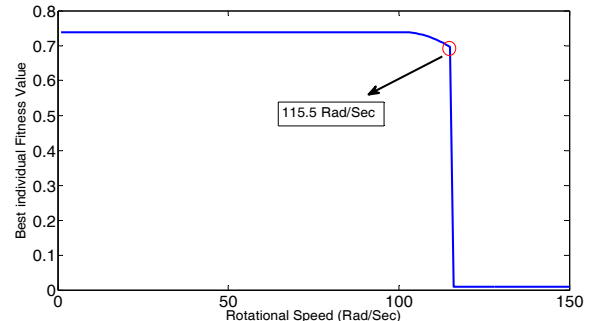
$$Kla(\omega) = 0.002152 \omega^2 - 0.07894 \omega + 1.244$$

(۸)

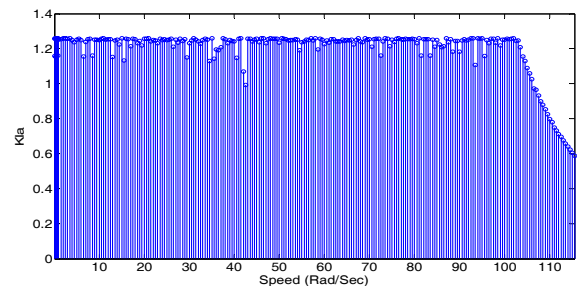
$$103 < \omega \leq 115.5$$

بررسی صحت رابطه در ادامه انجام شده است. به این منظور در سه نقطه دلخواه بین سرعت ۱۰۳ تا ۱۱۵/۵ رادیان بر ثانیه راندمان سیستم به سه روش محاسبه می‌شود. روش اول تقسیم مساوی دو جریان، روش دوم تقسیم بار به نسبت جریان نامی موتورها و روش سوم روش پیشنهادی این مقاله است. اولین نقطه در همان سرعت ابتدایی یعنی ۱۰۳ انتخاب شده است و نتیجه در شکل (۸) ترسیم شده است مشاهده می‌شود پس از رسیدن به حالت دائمی بازده سیستم در روش پیشنهادی از سایر روشها بیشتر است. در شکل‌های (۹) و (۱۰) جریان‌های موتورها ترسیم شده‌اند که در حالت دائمی در محدوده مجاز هستند.

است حداقل بار مجاز متناظر با سرعت ۱۰۳ rad/s است و بخش دیگر پوش منحنی به صورت سهمی است. تغییراتی که در بخش اول است به دلیل تعداد کم نسل‌هاست و پاسخ به نقطه بهینه مطلق نرسیده است.



شکل (۴): بهترین راندمان بر حسب سرعت



شکل (۵): بهترین نسبت جریان بر حسب سرعت

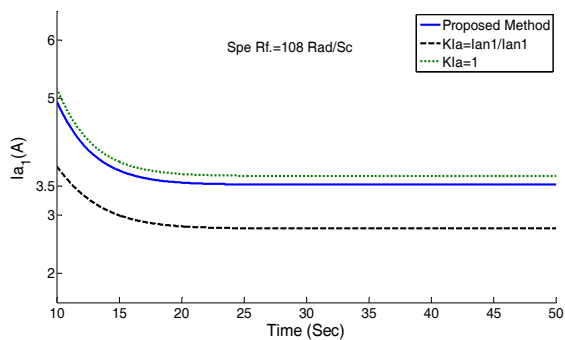
حال که حدود نسبت بهینه جریان‌ها به دست آمد می‌توان با جستجوی مستقیم برای بازه محدودی نسبت منحنی دقیق را به دست آورد. ابتدا مرز بین منطقه ثابت و سهمی پوش منحنی با جستجوی دقیق در محدوده کوچکی از سرعت انجام می‌شود که نتیجتاً سرعت ۱۰۳ رادیان بر ثانیه به عنوان این مرز به دست می‌آید. سپس برای قبل و بعد از این سرعت در محدوده کوچکی از نسبت جریان‌ها جستجوی مستقیم انجام می‌شود نتایج در شکل (۶) مشخص شده است.

در ادامه با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی نرم‌افزار Matlab یک منحنی درجه دو روی داده‌ها انطباق داده می‌شود. برای این منظور ابتدا منحنی به اندازه ۱۰۳ واحد سرعت به عقب منتقل می‌شود و سپس یک تابع به صورت زیر برازش می‌شود.

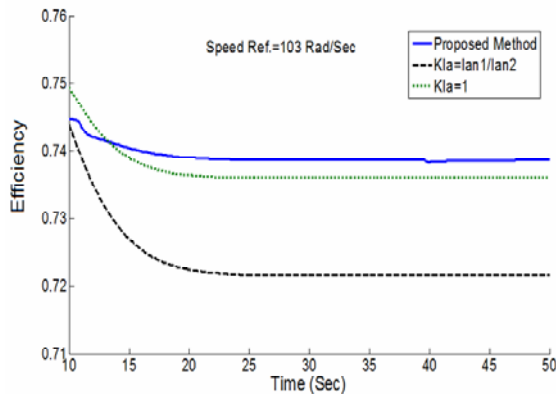
$$F(x) = P_1 X^2 + P_2 X + P_3$$

(۶)

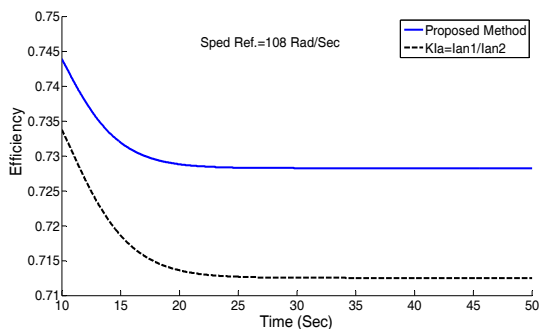
که با برازش منحنی ضرایب زیر به دست می‌آید:



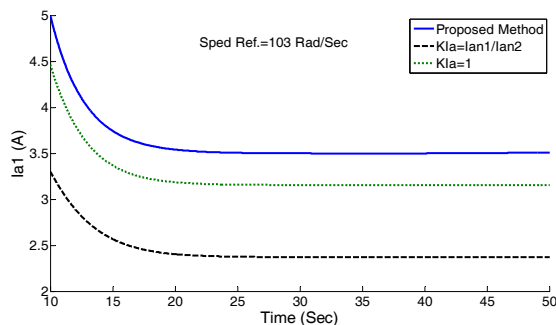
شکل (۱۲): جریان موتور (۱) بر حسب زمان



شکل (۸): منحنی بازده سیستم بر حسب زمان

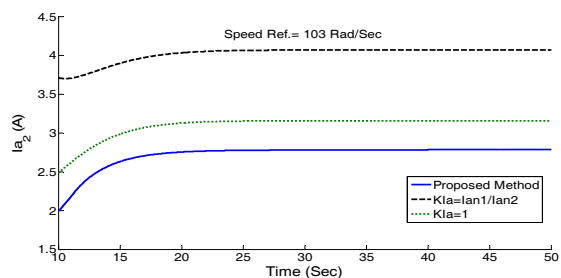


شکل (۱۳): راندمان سیستم بر حسب زمان

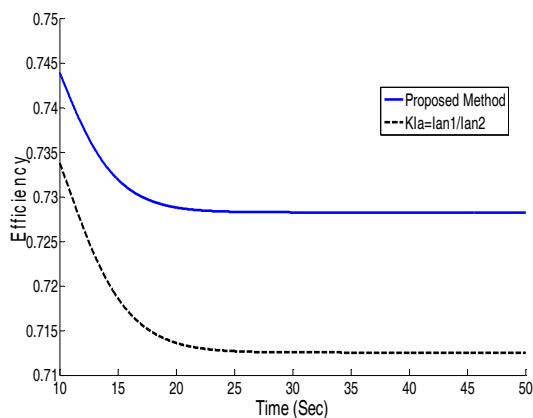


شکل (۹): جریان موتور (۱) بر حسب زمان

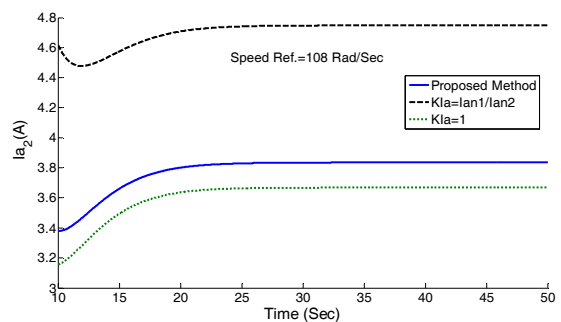
جریان موتورها در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود در حالت تقسیم مساوی بار جریان موتور اول از مقدار مجاز بیشتر شده و در نتیجه این حالت قابل قبول نیست. برای دو حالت باقی‌مانده بازده به صورت شکل (۱۳) خواهد بود. مشاهده می‌شود که در روش بهینه بازده بیشتر است. نقطه آخر نظیر پایان مسیر یعنی سرعت ۱۱۵/۵ رادیان بر ثانیه است. روش تساوی بار نیز باعث می‌شود جریان موتور اول از مقدار مجاز تجاوز کند. برای دو حالت باقی‌مانده نمودار بازده به صورت شکل (۱۴) است که منحنی مؤید بهتر بودن بازده در روش پیشنهادی است.



شکل (۱۰): جریان موتور (۲) بر حسب زمان



شکل (۱۴): راندمان سیستم بر حسب زمان



شکل (۱۱): جریان موتور (۲) بر حسب زمان

در ادامه بررسی نقطه‌ای از وسط مسیر برای مثال ۱۰۸ رادیان بر ثانیه انتخاب می‌شود در این سرعت نسبت بهینه جریان موتورها با استفاده از فرمول پیشنهادی محاسبه شده است مقدار این نسبت ۰/۹۲ است. ابتدا در محدوده مجاز جریان دو موتور بررسی می‌شود.

## ۱۲- نتیجه گیری

نشوند. این محدودیت‌ها به علاوه محدودیت روی حداقل و حداکثر ولتاژ تحریک موجب شده تا سرعت و در نتیجه بار اعمالی حداقل و حداکثر داشته باشد. در این بازه از سرعت با استفاده از داده‌های به دست آمده از بهینه‌سازی تابعی به کمک برازش منحنی برای نسبت بهینه جریان‌ها بر حسب سرعت به دست آمده است. در نهایت با شبیه‌سازی صحت بهینه‌سازی فوق بررسی شده است.

در این مقاله روشی برای تقسیم بهینه بار بین دو موتور جریان مستقیم توزیع شده متفاوت ارائه شده است که نتایج آن نسبت به روش [۲] راندمان را ۰.۳٪ بهبود داده است. برای هر سرعت بار از طریق الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه‌ای برای نسبت جریان دو موتور تعیین می‌شود که بازه را ماکزیمم می‌کند. در الگوریتم ژنتیک محدودیت‌هایی بر روی جریان‌ها اعمال شده است که در حالت دائمی بیش از مقدار نامی

## مراجع

- [1] Z.Jian, W.Xuhui, Z.Lili, "Optimal system efficiency operation of dual PMSM motor drive for fuel cell vehicles propulsion", IEE/PEMC, pp.1889-1892, May 2009.
- [۲] مهرداد جعفربلند، محمود زاده‌باقری، "ارائه آرایش نیروی محرک تک‌پروانه جدید از طریق تغذیه دو موتور مختلف"، دهمین همایش صنایع دریایی ایران، دانشکده صنعت نفت آبادان، ۱۳۸۷.
- [۳] مهرداد جعفربلند، محمود زاده‌باقری، "ارائه متد هم‌محور کردن دو موتور الکتریکی جریان مستقیم متفاوت برای افزایش توان و راندمان"، یازدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران، دانشگاه زنجان، ۱۳۸۷.
- [۴] مهرداد جعفربلند، "جداسازی سیستم کنترل وابسته دو موتور الکتریکی هم‌محور شده متفاوت با استفاده از دو کنترل کننده فازی برای بهبود سیستم محرک زیردریایی"، چهارمین همایش ملی علوم و فناوری زیردریا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، خرداد ۱۳۸۶.
- [5] L.Pivano, T.A.Johansen, "A four-quadrant thrust estimation scheme for marine propellers: Theory and experiments", IEEE Trans. on Con. Sys. Tech., Vol.17, pp.215-226, Jan. 2009.
- [6] J.Srisertpol, C.Khajorntraidet, "Estimation of DC motor variable torque using adaptive compensation", IEEE/CDC, pp.712-717, June 2009.
- [7] P.CKrause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill, USA, pp.67-121, 2004.
- [8] M.Lankarany, A.Rezazade, "Parameter estimation optimization based on genetic algorithm applied to DC motor", ICEE, pp.1-6, April 2007.
- [9] O.Wahyunggoro, N.Saad, "Genetic algorithm optimization of I/O scales for FLIC in servomotor control", Inn. Tech. in Int. Sys. and Ind. App., pp.219-224, July 2009.
- [10] K.Kherraz, "Application of the genetic algorithms to the reduction of order of an engine with D.C current", MCCA, pp.1-6, June 2007.
- [11] M.Vonnet, N.Ait-Ahmed, "Marine propeller dynamics modeling using a frequency domain approach", IEEE/IMS SD, pp.1-6, July 2008.
- [12] S.R.Bowes, A.Sevinc, D.Holliday, "New natural observer applied to speed-sensorless DC servo and induction motors", IEEE Tran. on Ind. Elec., Vol.51, No.5, pp.1025-1032, Oct. 2004.

## رزومه



مهرداد جعفربلند به سال ۱۳۴۵ در اصفهان متولد شد. مدارک لیسانس و فوق‌لیسانس رشته قدرت را به ترتیب در سالهای ۱۳۶۸ و ۱۳۷۱ از دانشگاه‌های علم و صنعت و تربیت‌مدرس اخذ نمود. و مدرک دکتری برق را در سال ۱۳۸۱ از واحد علوم و تحقیقات اخذ نمود و اکنون استادیار دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر است. وی از سال ۱۳۶۶ تاکنون در مرکز تحقیقات دریایی اصفهان و از سال ۱۳۷۷ با مرکز تحقیقات فضایی همکاری دارد. زمینه پژوهش‌های ایشان عبارتند از: کنترل سیستم‌های با ابعاد بزرگ، کنترل سیستم‌های غیرخطی الکترونیک قدرت و طراحی تجهیزات الکتریکی زیردریایی و ماهواره.



محمود زاده‌باقری در مهرماه ۱۳۵۸ در یاسوج متولد شد. در سال ۱۳۸۲ موفق به اخذ مدرک کارشناسی در رشته مهندسی برق - قدرت از دانشگاه کاشان و در سال ۱۳۸۷ کارشناسی‌ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد گردید. ایشان عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد واحد یاسوج و عضو انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران شاخه اصفهان می‌باشد و در زمینه ماشین‌های الکتریکی و درایوها مشغول پژوهش و تحقیق می‌باشند.