

بهینه‌سازی انرژی مصرفی دو موتور الکتریکی تزویج شده بر اساس الگوریتم ژنتیک

مهرداد جعفربلند^(۱) - محمود زاده باقری^(۲)

(۱) دانشیار گروه برق - دانشکده برق - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(۲) کارشناسی ارشد گروه برق - دانشکده برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۸۹

خلاصه: دو موتور الکتریکی تزویج شده 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 گزارش شده 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 در سرعت‌های 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.

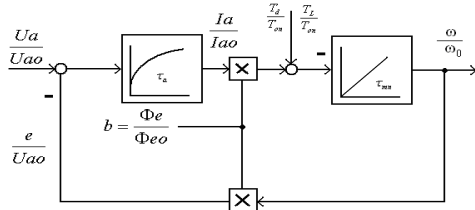
۱- مقدمه

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 20 kw مشکل است. در [۱] به جای یک موتور 240 kw که در سیستم پیل سوختی کاربرد داشته از دو موتور 120 kw 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 جمع‌شدن توان خروجی موتورهای دو موتور هیچ کویلاژی 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 طوری که 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 تزویج شده تقسیم کرد تا برد زیردریایی افزایش یابد. برای کنترل‌کننده بهینه هیچ نمونه دیگری گزارش نشده است.

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 موتور 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 حالی که برخی از آنها می‌چرخند برخی دیگر می‌توانند حرکت انتقالی داشته باشند. سیستم دو موتور تزویج شده مختلف و بار با یک سیستم چرخشی معادل در شکل (۱) نمایش داده شده است [۳].



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

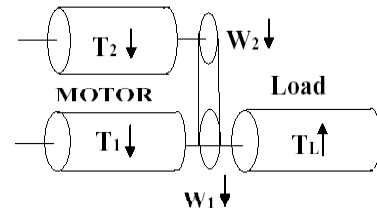
Fig. (3): The bloc diagram of a dc motor with separate exiting

۳-۱- **طراحی کنترل کننده**

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_L و I_S به ترتیب جریان‌های موتورهای بزرگ و کوچک هستند، و x همان نسبت بهینه جریانه 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 کنترل کننده سرعت موتورها علاوه بر ارضاء هدف اول برای بار سرعت دلخواه را به وجود آورد. به عبارتی کنترل کننده 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 مکانیکی، دینامیک الکتریکی را برای شرایط دلخواه تطبیق داد. این ویژگی اساس ارائه روش ابتکاری است که از دو کنترل کننده تفکیک شده برای اهداف متفاوت فوق استفاده نمود. در این روش از دو کنترل کننده

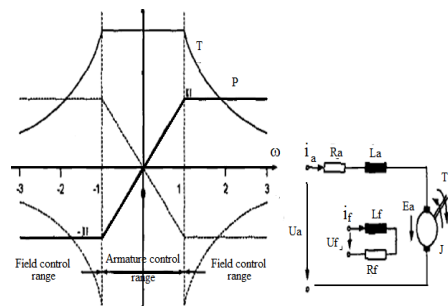


شکل (۱): سیستم معادل موتور- بار

Fig. (1): The equivalence of the motor-load system

۳-۲- **کنترل کننده**

در دو موتور تزویج شده لازم است موتورها در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی نیز کار کنند. در اینجا به دلیل محدودیت حجم امکان استفاده از کنترل کننده 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 درحالت پایدار

Fig. (2): The boundaries of a dc motor control in steady state

یک کنترل کننده 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، می‌توانند بر روی عملکرد کنترلر سرعت تأثیر بگذارند. اگرچه تنها

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 درنسبت 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 $I_{a1} > I_{a1}^*$ آنگاه $I_{a1}^{**} = I_{a1}$ انتخاب می‌شود.

حالت سوم: اگر $I_{a1} > I_{a1}^*$ و $I_{a2} > I_{a2}^*$ یعنی بار اضافی به سیستم اعمال شده باشد که در لحظه راه‌اندازی همیشه این حالت رخ می‌دهد پس در زمان کوتاه راه‌اندازی از رابطه $X_{opt} = I_{ref} = I_{a1}/I_{a2}$ استفاده می‌شود که در آن I_{a1} و I_{a2} 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.

$$\eta = \frac{P_{out1} + P_{out2}}{P_{in1} + P_{in2}} \quad (2)$$

در اینجا P_{out1} و P_{out2} به ترتیب توان‌های خروجی دو موتور هستند و η_1 و η_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 هرکدام از بازه 0.01 تا مقدار نامی جریان موتور متناظر تغییر می‌کند و در هر ارزیابی تابع برازندگی نسبت آن دو را به جای 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

مجازی 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 $e = (I_{a1} - X_{opt} / I_{a2})$ 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 معیار معینی را حداقل یا حداکثر نماید. بهینه‌سازی یعنی جستجو در فضای جواب‌های ممکن به دنبال بهترین جواب. در روش ترویج 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

Table (1): The comparison of three methods for speed of 103 rad/s

جدول (۱): مقایسه سه روش برای سرعت 103 rad/s

| سرعت 103 rad/s | | | | | | | | | | روش |
|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------|--|--|
| T ₂ | T ₁ | V _{f2} | V _{f1} | P ₂ | P ₁ | I _{a2} | I _{a1} | η% | | |
| ۴/۸۸ | ۲/۳۷ | ۲۰۰ | ۱۷۳/۱ | ۵۵۷ | ۷۰/۱۲ | ۲/۱۸ | ۳/۵ | ۷۳/۹ | | پیشنهادی |
| ۵/۴۵ | ۳/۱ | ۱۹۶/۹ | ۱۷۴/۷ | ۶۳/۱۱ | ۶۳/۱۱ | 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 _{an1} /I _{an2} |

Table (2): The comparison of three methods for the speed of 110 rad/s

جدول (۲): مقایسه سه روش برای سرعت 110 rad/s

| سرعت 110 rad/s | | | | | | | | | | روش |
|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|--|--|
| T ₂ | T ₁ | V _{f2} | V _{f1} | P ₂ | P ₁ | I _{a2} | I _{a1} | 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 _{an1} /I _{an2} |

Table (3): The comparison of the three methods for the speed of 115 rad/s

جدول (۳): مقایسه سه روش برای سرعت 115 rad/s

| سرعت 115 rad/s | | | | | | | | | | روش |
|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|--|--|
| T ₂ | T ₁ | V _{f2} | V _{f1} | P ₂ | P ₁ | I _{a2} | I _{a1} | 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 _{an1} /I _{an2} |

۶- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم ژنتیک برای محدوده‌ای از سرعت انجام می‌شود تا زمانی که در سرعتی تابع هدف 0.01 شود که نشان می‌دهد دیگر در این سرعت جریان‌ها از محدوده مجاز بیشتر می‌شوند. ابتدا محدوده سرعت صفر تا 150 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 115.5 رادیان بر ثانیه است و بیشتر از آن جریان‌ها از حدود خود خارج شده و تابع برازندگی عدد 0.01 را نشان می‌دهد.

در نتیجه تا سرعت 115.5 rad/s بهترین نسبت با الگوریتم ژنتیک محاسبه می‌شود. برای محاسبه سریع‌تر تعداد جمعیت اولیه و تعداد نسل کم انتخاب می‌شود. در این صورت 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 103 rad/s کمتر شود

مقدار مجاز خارج بود مقدار تابع برازندگی به یک عدد بسیار کوچک‌تر از مقدار راندمان مثلاً 0.01 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:

$$\begin{cases} F = \text{efficiency} & 0 \leq I_{a1} \leq I_{an1} \text{ \& } 0 \leq I_{a2} \leq I_{an2} \\ F = 0.01 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳)$$

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

$$\frac{0.01}{I_{an2}} \leq \frac{I_{an1}}{I_{an2}} \leq \frac{I_{an1}}{0.01} \quad (۴)$$

دقت تغییرات دو متغیر نیز کنترل می‌شود و در این مساله بازه هر متغیر به 256 قسمت تقسیم شده است. با این دقت بالا روش جستجوی معمول با توجه به محدوده وسیع نسبت امکان‌پذیر نیست زیرا اطلاعاتی 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 مورد توجه قرار گیرد در اینجا قیود به صورت زیر مشخص شده‌اند.

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

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

$$I_{a2} \leq I_{an2}$$

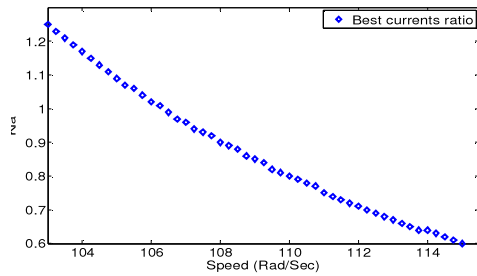
(۵)

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

۵- مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی دو موتور

توزیع شده در حالت بهینه

در اینجا مقایسه برای چند سرعت مرجع، 103 rad/sec، 115 rad/sec، 110 rad/sec انجام شده است و کل نتایج در جدول‌های زیر برای سه روش (روش پیشنهادی، روش KIa=10 و روش KIa=I_{an1}/I_{an2}) مقایسه می‌شود. متغیرها عبارتند از: خطای جریان، خطای 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 103 تا 115.5 قابل تغییر است. در جداول زیر مقادیری که از محدوده مجاز خارج‌اند با پس‌زمینه خاکستری نشان داده شده‌اند و برای آن حالت راندمانی محاسبه نشده است.



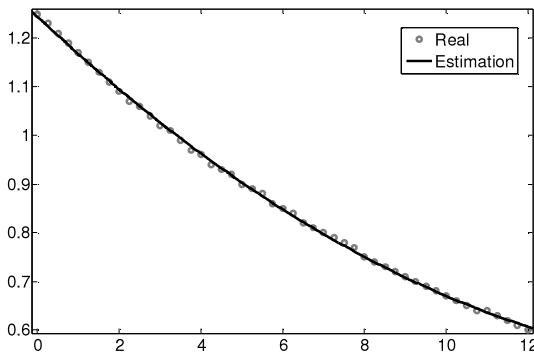
شکل (۶): منحنی نسبت بهینه جریان با سرعت
Fig. (6): The graph of optimum current ratio as a function of speed

$$P_1=0.002152$$

$$P_2=-0.07894$$

$$P_3=1.244$$

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
Fig. (7): The comparison between the real and the estimated data

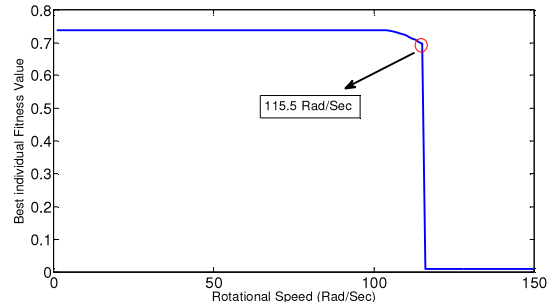
در نتیجه تابع نسبت جریان بهینه بر حسب سرعت به صورت (۸) به دست می‌آید. در این رابطه سرعت بر حسب رادیان بر ثانیه محاسبه می‌شود.

$$Kia(\omega) = 0.002152 \omega^2 - 0.07894 \omega + 1.244 \quad (8)$$

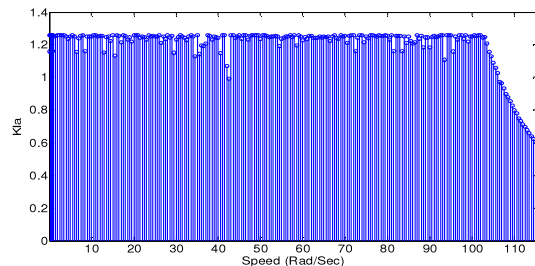
$$103 < \omega \leq 115.5$$

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.

با توجه به منحنی بار که به صورت توان سوم از سرعت 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
Fig. (4): The optimum efficiency as a function of speed



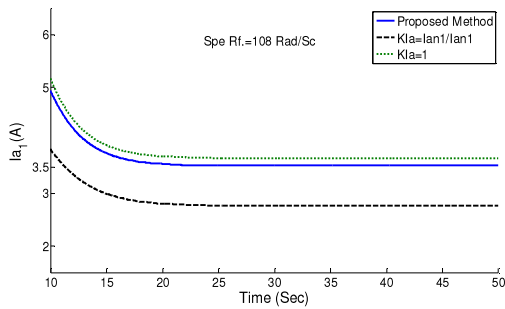
شکل (۵): بهترین نسبت جریان بر حسب سرعت
Fig. (5): The optimum current ratio as a function of speed

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 سهموی 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.

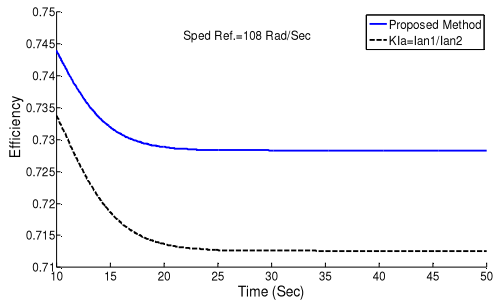
در ادامه با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی نرم‌افزار Matlab یک منحنی درجه دو روی داده‌ها انطباق داده می‌شود. برای این منظور ابتدا منحنی به اندازه ۱۰۳ واحد سرعت به عقب منتقل می‌شود و سپس یک تابع به صورت زیر برازش می‌شود.

$$F(x) = P_1 X^2 + P_2 X + P_3 \quad (6)$$

که با برازش منحنی ضرایب زیر به دست می‌آید:

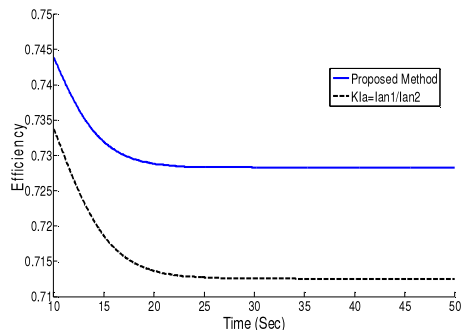


شکل (۱۲): جریان موتور (۱) بر حسب زمان
Fig. (12): The motor current (1) as a function of time



شکل (۱۳): راندمان سیستم بر حسب زمان
Fig. (13): The system efficiency as a function of time

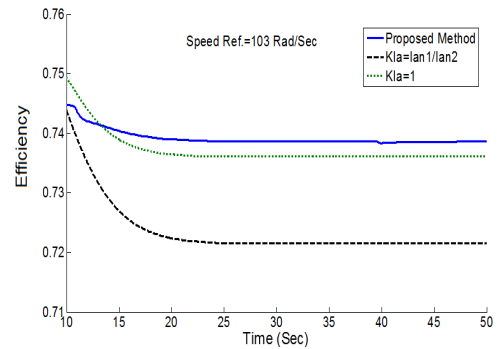
جریان موتورها در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود در حالت تقسیم مساوی بار جریان موتور اول از مقدار مجاز بیشتر شده و در نتیجه این حالت قابل قبول نیست. برای دو حالت باقی‌مانده بازده به صورت شکل (۱۳) خواهد بود. مشاهده می‌شود که در روش بهینه بازده بیشتر است. نقطه آخر نظیر پایان مسیر یعنی سرعت 115.5 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.



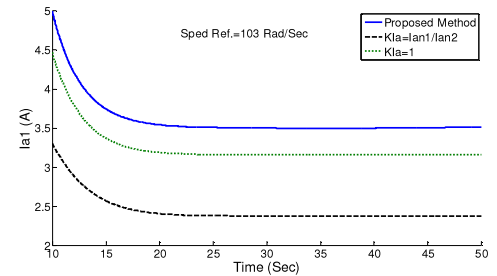
شکل (۱۴): راندمان سیستم بر حسب زمان
Fig. (14): The system efficiency as a function of time

۱۲- نتیجه‌گیری

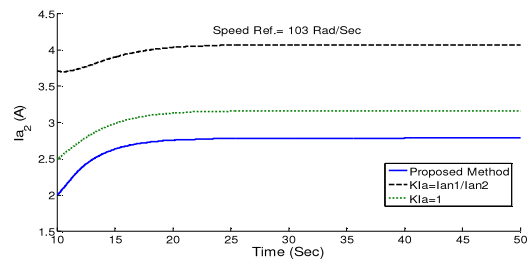
در این مقاله روشی برای تقسیم بهینه بار بین دو موتور جریان مستقیم ترویج‌شده متفاوت ارائه شده است که نتایج آن نسبت به روش [۲]



شکل (۸): منحنی بازده سیستم بر حسب زمان
Fig. (8): The graph of system efficiency as a function of time

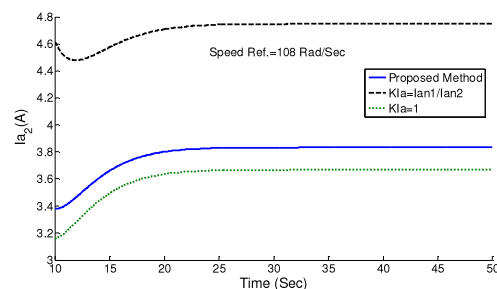


شکل (۹): جریان موتور (۱) بر حسب زمان
Fig. (9): The graph of motor current (1) as a function of time



شکل (۱۰): جریان موتور (۲) بر حسب زمان
Fig. (10): The graph of current motor (2) as a function of time

در ادامه بررسی نقطه‌های از وسط مسیر برای مثال 108 رادیان بر ثانیه انتخاب می‌شود در این سرعت نسبت بهینه جریان موتورها با استفاده از فرمول پیشنهادی محاسبه شده است مقدار این نسبت 0.92 است. ابتدا در محدوده مجاز جریان دو موتور بررسی می‌شود.



شکل (۱۱): جریان موتور (۲) بر حسب زمان
Fig. (11): The graph of motor current (2) as a function of time

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.

راندمان را ۳٪ بهبود داده است. برای هر سرعت بار از طریق الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه‌ای برای نسبت جریان دو موتور تعیین می‌شود که بازده را ماکزیمم می‌کند. در الگوریتم ژنتیک محدودیت‌هایی بر روی جریان‌ها اعمال شده است که در حالت دائمی بیش از مقدار نامی نشوند. این محدودیت‌ها به علاوه محدودیت روی حداقل و حداکثر

References

- [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.
- [2] M. Jafarboland, M. Zadebgheri, "Top of form present newarrangement propulsion by a single fan through the feeding of different two motors", Tenth Conference on Maritime Iran, 2008.
- [3] M. Jafarboland, M. Zadebgheri, "Mechanical couplingmethodpresentedbytwodifferentdirect currentelectric motorto increasepowerefficiency", Eleventh Conf. on Elec. Engi. Stud. Iran, Zanjan University, 2008.
- [4] M. Jafarboland, "Separation of control systemdepends onfor mechanical coupling two different electricmotors by double fuzzy controller for Improve submarine drive systems", Fourth Natio. Conf. on Scie. and Tech. Subm., Maleke-Ashtar University of Technology, 2007.
- [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 مهندسی برق و الکترونیک ایران شاخه اصفهان می‌باشد و در زمینه ماشین‌های الکتریکی و درایوها مشغول پژوهش و تحقیق می‌باشند.

