

طراحی بهینه یک موتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز جهت کاربرد در سامانه‌های دریایی با استفاده از الگوریتم زنبور

رضا ایلکا^۱، سید اصغر غلامیان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
(دریافت: ۹۳/۰۹/۲۲، پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۳)

چکیده: با توجه به مزایای زیاد موتورهای چند فاز نسبت به موتورهای سه فاز از قبیل: کاهش جریان هر فاز استاتور بدون نیاز به کاهش ولتاژ، کاهش هارمونیک جریان لینک DC و همچنین افزایش قابلیت اطمینان آن، استفاده از این موتورها در سامانه‌هایی از قبیل سامانه‌هایی رانش دریایی، خودروهای الکتریکی، سامانه‌های فضایی و ... رو به افزایش می‌باشد. این مقاله به تحلیل و طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز جهت کاربرد در زیر دریایی می‌پردازد. برای این منظور، موتور مزبور توسط الگوریتم بهینه‌سازی زنبور بهینه می‌گردد تا کمترین حجم و وزن و همچنین بهترین مشخصات عملکردی را داشته باشد. سپس توسط نرم‌افزار Ansoft Maxwell که بر مبنای تحلیل اجزای محدود می‌باشد، موتور مزبور مجدداً طراحی، شبیه‌سازی کامپیوتری و اعتبارسنجی می‌گردد، به صورتی که اطلاعات لازم در مورد کمیت و مشخصات عملکردی موتور را ارائه می‌دهد. با انجام بهینه‌سازی در مقایسه با موتور طراحی شده به روش معمولی، تلفات کل بیش از ۳ درصد کاهش و گشتاور بیش از ۱۳ درصد افزایش یافت.

کلید واژه‌ها: موتورهای مغناطیس دائم شارمحور، رپل گشتاور، گشتاور دندانه‌ای، پیشران زیر دریایی، شبیه‌سازی سه بعدی اجزای محدود.

۱- مقدمه

و بازده قیمتی مواد خاک کمیاب مغناطیس دائم استفاده شده در این موتورها می‌باشد [۱].

با وجود برتری و مزایای قابل توجه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بر موتورهای مرسوم القایی، کاربرد این گونه موتورها در موارد تجاری و خانگی چشمگیر نمی‌باشد. در واقع در اکثر موارد موتورهای القایی جوابگوی احتیاجات مصرف‌کننده می‌باشند. با این حال، در برخی از کاربردهای ویژه و دقیق‌تر صنعت برق، نیاز به وجود یک سری پارامترهای معین می‌باشد که معمولاً نمی‌توان همه آنها را از موتورهای القایی مرسوم انتظار داشت. عموماً، این کاربردها به موارد خاص صنعتی و نظامی مربوط می‌شود. اینجاست که موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به‌عنوان یک نمونه مناسب عرض اندام می‌کنند و رقیب دیرینه خود یعنی موتورهای القایی را با اختلاف زیاد پشت سر قرار می‌دهند [۴-۱]. در اکثر این موارد، بازده بالا و تلفات و حجم کم و در کل وجود بهترین عملکرد از موتور مورد نیاز است. البته عیب موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نسبت به موتورهای القایی، بحث اقتصادی و گران‌تر بودن آنهاست که معمولاً در کاربردهای صنعتی و نظامی خاص، چالشی جدی نمی‌باشد زیرا هدف، تولید انبوه موتوری ساده و ارزان با مشخصات متوسط نمی‌باشد بلکه در این موارد، به‌دست آوردن طرحی برتر و

موتورهای سنکرون مغناطیس دائم^۱ یکی از موتورهای پرکاربرد در صنعت برق بوده که به دلیل داشتن برتری‌های نسبی در برابر دیگر نمونه‌ها مورد پذیرش واقع شده است. کاربرد این موتورها به دلیل کارایی و عملکرد مناسب رو به گسترش می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی این موتورها بازده بالا (در محدوده گسترده از توان خروجی)، چگالی توان زیاد، تلفات حداقل (به دلیل عدم وجود سیستم تحریک و تلفات ناشی از آن)، حجم و وزن کم، قابلیت اطمینان بالا در سرعت‌های زیاد، حداقل بودن رپل گشتاور خروجی، هزینه تعمیرات پایین و ... می‌باشد. در این نوع از موتورها، مغناطیس‌های دائم در رتور قرار می‌گیرد. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم شبیه به موتورهای سنکرون معمولی می‌باشند با این تفاوت که سیم‌پیچی میدان آنها با مغناطیس‌های دائم جایگزین شده است. هرچند بررسی و تحلیل این موتورها در چند دهه اخیر رواج یافته است، ولی زمان زیادی از عمومیت و استفاده جدی آنها در صنعت برق نمی‌گذرد. این امر به دلیل توجه به مسائل زیست محیطی از قبیل انتشار گازهای گلخانه‌ای

*نویسنده پاسخگو: Gholamian@nit.ac.ir

۲- بررسی پژوهش‌های پیشین

شاید بتوان به‌روزترین و معتبرترین تحقیقی که در مورد بهینه‌سازی موتوره‌های سنکرون مغناطیس دائم انجام شده است را تحقیق خاویز ژانوت و همکارانش [۷] دانست که بحثی همه جانبه و گسترده در مورد طراحی بهینه این گونه موتورها می‌باشد. در این پژوهش مدل‌سازی مولتی فیزیک^۴ از PMSM سرعت بالا با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک ارائه می‌گردد. در مرجع [۸] پژوهشی تحت عنوان بهینه‌سازی طراحی PMSM برای رسیدن به گشتاور بالا و حداقل نمودن حجم مغناطیس‌های دائم مطرح شده است. این پژوهش با انجام یک بهینه‌سازی چند هدفه برای رسیدن به ابعاد و مکان بهینه مغناطیس‌های دائم درونی موتور (متغیرهای طراحی) انجام شده است.

در تحقیقی دیگر، نویسندگان سعی نموده‌اند تا با بهینه نمودن شکل مغناطیس‌های دائم یک PMSM خطی نسبت به کاهش ریپل نیرو اقدام نمایند. در این پژوهش ابتدا مدل تحلیلی بر اساس معادلات ماکسول ارائه می‌گردد و سپس توسط تحلیل اجزای محدود دقت آن سنجیده می‌شود. در نهایت با بهینه نمودن شکل مغناطیس‌های دائم، نیروی تولید موتور بهبود می‌یابد که در آن ریپل نسبت به قبل کاهش یافته است [۹].

جهت کاربردهای دقیق نظیر چیپ‌های میکرو الکترونیک نیاز به موتورهایی با حداقل نوسانات نیرو می‌باشد. در مرجع [۱۰] بهینه‌سازی یک موتور PMSM خطی برای حداقل‌سازی این امر انجام شده است. در این تحقیق، پالس نیرو به‌عنوان تابع هدف و ابعاد موتور به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. در مرجع [۱۱] طراحی برنامه‌پذیر از PMSM با شکل موج نیروی ضد محرکه سینوسی ارائه شده است. در این پژوهش که در مورد یک PMSM با مغناطیس‌های دائم سطحی می‌باشد، نسبت به بهینه نمودن شعاع مغناطیس‌ها اقدام شده است. این امر نسبت به تعداد قطب، اندازه رتور و ضخامت مغناطیس‌ها صورت گرفته است.

طراحی بهینه PMSM بر اساس الگوریتم ژنتیک در مرجع [۱۲] ارائه شده است. در این مقاله روال بهینه‌سازی بر اساس مدیریت ژنهای الگوریتم ژنتیک به‌طور کامل توضیح داده شده است. با انجام بهینه‌سازی، هزینه مواد به‌کاررفته در موتور کاهش یافته است. مورد دیگر بهینه‌سازی PMSM توسط الگوریتم ایمنی^۵ می‌باشد [۱۳]. این مقاله نسبت به بهینه‌سازی یک PMSM با مغناطیس‌های دائم سطحی به همراه تصحیح پارامترهای آن می‌پردازد که توسط تحلیل اجزای محدود انجام می‌گیرد.

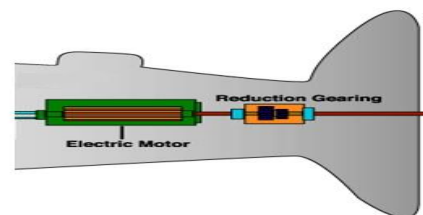
بهبودیافته جهت حصول خواص مورد نیاز به بهای هزینه تمام شده بحث کلیدی است. بنابراین، می‌توان مهم‌ترین زمینه‌های کاربرد این‌گونه موتورها را در سامانه‌های دریایی، سامانه‌های فضایی، کاربردهای زیر سطحی و خودروهای الکتریکی پیدا کرد [۵-۶]. کاربرد موتوره‌های الکتریکی در سامانه‌های دریایی بسیار گسترده بوده که سیستم رانش کشتی‌ها و قایق‌ها و همچنین زیردریایی‌ها را شامل می‌گردد. علاوه بر این، از موتوره‌های الکتریکی به‌عنوان وسائل و تجهیزات کمکی و حفاظتی نیز استفاده می‌شود.

تا دهه ۸۰ میلادی موتوره‌های DC کموتاتوری بیشترین کاربرد را در مورد موتوره‌های محرک سامانه‌های زیردریایی داشتند ولی مشکلات متعددی نظیر فرسایش ناشی از جاروبک‌ها، تلفات، انتقال حرارت، ساختن جاروبک و کموتاتور باعث شد استفاده از این موتورها در چنین کاربردهایی بسیار کاهش یابد. در همین دوران با بهبود و توسعه مواد مغناطیس دائم و به خصوص ماده مغناطیس دائم قدرتمند NdFeB استفاده از موتوره‌های سنکرون مغناطیس دائم در کاربردهای زیر دریایی گسترش یافت. علاوه بر این یکی از مهمترین پارامترهای مورد توجه در چنین کاربردهایی بحث قابلیت اطمینان می‌باشد. در چند سال اخیر استفاده از سیستم‌های چند فازه به دلیل قابلیت اطمینان بالا در کاربردهای زیردریایی افزایش یافته است.

سامانه‌های زیردریایی به دو دسته کلی تقسیم می‌گردند: با سرنشین^۱ و بدون سرنشین^۲ که مورد دوم خودروهای رباتیک زیر آبی^۳ نیز نامیده می‌شوند. در عمل، URVها گزینه مناسبی برای کار در شرایط خطرناک و نامناسب نظیر اقیانوس، مخزن نیروگاه‌های آبی و نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشند [۴ و ۳۷]. جدول (۱) محدوده مشخصات موتوره‌های قابل کاربرد در سامانه‌های زیردریایی را نشان می‌دهد. در شکل (۱) طرحی از موتور الکتریکی در یک زیردریایی نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات مورد نیاز برای سامانه‌های زیردریایی

عنوان	توان نامی (KW)	ولتاژ (V)	سرعت (rad/s)
زیردریایی بدون سرنشین	۰/۲ تا ۱/۱	۳۰ تا ۱۱۰	۲۰۰ تا ۶۰۰



شکل (۱): نمونه یک موتور مغناطیس دائم در سیستم رانش زیردریایی

4.Multi-physics
5.Immune Algorithm

1. Manned
2. Unmanned
3. Underwater Robotic Vehicles (URVs)

در مرجع [۲۳] نویسندگان روشی برای طراحی بهینه موتور بدون جاروبک با الگوریتم ژنتیک ارائه کرده‌اند. در این مقاله تابع هدف حداقل کردن حجم، وزن و قیمت می‌باشد. متغیرهای طراحی این پژوهش تعداد قطب، نسبت قوس قطب به گام قطب، ضخامت مغناطیسی دائم، ارتفاع یوغ استاتور و رتور، فاصله هوایی، چگالی جریان، طول محوری موتور و ... می‌باشند.

یک مقایسه بین سه الگوریتم بهینه‌سازی یعنی روش گرادینتی، روش جستجوی مستقیم و GA جهت طراحی بهینه موتور بدون جاروبک در مرجع [۲۴] ارائه شده است. با مقایسه بین این سه روش مشخص می‌شود که الگوریتم ژنتیک بهترین عملکرد را برای این کاربرد داراست. در مراجع [۳۰-۲۵] نیز به طراحی بهینه موتور بدون جاروبک با الگوریتم‌های بهینه‌سازی پرداخته شده است.

با توجه به مقالات و پژوهش‌های مختلف انجام شده در مورد موتورهای مزبور می‌توان عنوان داشت که بحث طراحی بهینه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم موضوعی جدید و جذاب بوده که در سالیان اخیر گرایش به سمت آن افزایش قابل توجهی داشته است.

همان‌طور که در اکثر پژوهش‌های انجام شده مشهود است، دو الگوریتم تکاملی ژنتیک و بهینه‌سازی اجتماع ذرات^۳ بیشترین استفاده را داشته و از آنجایی که قدمت بیشتری دارند و کارایی آنها تثبیت شده است، با اطمینان بیشتری از آنها استفاده شده است. علاوه بر این، دیگر الگوریتم‌های تکاملی نظیر الگوریتم زنبور^۴، الگوریتم مورچه، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی و ... نیز به تدریج به عنوان روش‌های بهینه‌سازی جدید جهت تحلیل و طراحی بهینه موتورهای مزبور به کار رفته‌اند.

از بین توابع هدف فوق بازده، تلفات و حجم بیشترین کاربرد را داشته‌اند. اصولاً به کارگیری یک تابع هدف امری ساده بوده که از ارزش مهندسی زیادی برخوردار نیست. از این‌رو، توابع هدف ترکیبی بیشتر مورد توجه بوده و انتخاب درست آن، نتایج مطلوبی به همراه خواهد داشت. همان‌طور که در اکثر پژوهش‌ها مشخص بود، توابع هدف از دو نوع متضاد به‌عنوان یک تابع به کار می‌روند که هدف از آن ایجاد یک سازش مهندسی بین حداقل و حداکثر می‌باشد. برای نمونه [۸]، گشتاور یک موتور باید زیاد و حجم آن کم باشد. در نتیجه تابع هدف ترکیبی از این دو کمیت تعریف می‌گردد که در آن هدف حداکثرسازی گشتاور و حداقل‌سازی حجم (به طور همزمان) می‌باشد.

در مرجع [۱۴] طراحی بهینه یک PMSM خطی با در نظر گرفتن نیروی دندانه‌ای حداقل مطرح شده است. موتور به کار رفته برای بهینه‌سازی از نوع شیاردار می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، در مورد موتورهای بدون شیاردار موضوع نیروی دندانه‌ای مطرح نخواهد بود زیرا در این حالت این نیرو وجود نخواهد داشت. ولی در مورد موتورهای شیاردار یکی از موارد مهم حذف نیرو یا گشتاور دندانه‌ای می‌باشد. در این پژوهش، روش پارامتری تاگوجی به‌همراه تحلیل اجزای محدود دو و سه بعدی برای این منظور به کار می‌رود [۱۵].

ماشین‌های مغناطیس دائم چند فازه با آرایه‌های هالباک^۱ نمونه‌های مناسبی برای برخی کاربردهای خاص نظیر نظامی و دریایی می‌باشند که به دلیل قابلیت تحمل بالای خطا، شتاب و گشتاور خروجی زیاد است. در مرجع [۱۶] طراحی بهینه یک نمونه از این موتورها برای دستیابی به گشتاور، شتاب و بازده بالا انجام شده است. در پژوهش مرجع [۱۷] در مورد طراحی بهینه یک PMSM با مغناطیس دائم درونی جهت کاربرد در نسل جدید قطارهای حمل و نقل ارائه شده است. در این پژوهش تحلیل اجزای محدود، تکنیک بهینه‌سازی چند هدفه و روش پاسخ سطحی^۲ تشریح شده‌اند.

بهینه‌سازی یک PMSM خطی با هدف بهبود بازده و کاهش ریپل نیرو در مرجع [۱۸] ارائه شده است. در پژوهشی بحث کاهش ریپل گشتاور با استفاده از طراحی بهینه شکل مغناطیس دائم یک PMSM مطرح شده است [۱۹]. همان‌طور که مشخص است با طراحی بهینه شکل مغناطیس دائم درونی می‌توان تا حد زیادی پالس‌های گشتاور خروجی موتور را کاهش داد اما این امر باید عملی و قابل اجرا باشد.

مرجع [۲۰] در مورد طراحی بهینه PMSM قطب برجسته می‌باشد. در این پژوهش ابتدا، فرآیند بهینه‌سازی چند متغیره تشریح می‌گردد. مرجع [۲۱] به بحث طراحی بهینه PMSM با مغناطیس دائم درونی می‌پردازد. توابع هدف در این پژوهش بازده و وزن موتور می‌باشند. برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته استفاده شده است. همچنین رابطه تلفات هسته نیز با توجه به تغییرات شار برای پیش بینی عملکرد موتور لحاظ شده است. بازده موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به شکل مغناطیس‌های دائم آن وابسته است. از این‌رو مرجع [۲۲] طرح‌های گوناگونی را برای بهبود بازده این موتور ارائه نموده است که در نهایت منجر به بهبود عملکرد موتور مزبور شده است.

3. Particle Swarm Optimization (PSO)
4. Bees Algorithm

1. Halbach Array
2. Response Surface

۳- طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز

در این مقاله ابتدا روال طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم به صورت تشریحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، معادلات مربوط به ابعاد و پارامترهای موتور پنج فاز، ارائه و ارزیابی خواهد شد. در بخش بعد، طراحی بهینه مطرح خواهد شده و در نهایت مقایسه‌ای بین دو روش طراحی بدون بهینه‌سازی و طراحی بهینه انجام می‌شود.

۳-۱- معادلات طراحی PMSM بدون بهینه‌سازی

۳-۱-۲- تعریف مشخصات اصلی موتور

برای طراحی هر ماشین الکتریکی، قدم اول تعیین مشخصات آن بسته به کاربرد مربوطه است. به عبارت دیگر، ابتدا باید تعیین شود که ماشین برای کار در چه شرایط توان، ولتاژ و غیره طراحی خواهد شد. از لحاظ تئوری پارامترهای متعددی برای این منظور در نظر گرفته می‌شود ولی چهار پارامتر اصلی برای این منظور وجود دارد که در جدول (۲) نشان داده شده است. البته همان طور که ذکر شد، موارد دیگر نظیر تعداد فاز، جهت چرخش، سیکل کاری، نوع خنک‌سازی و ... را می‌توان به این جدول اضافه نمود [۵].

جدول (۲): مشخصات اصلی ماشین

پارامتر	توصیف
توان (kW)	توان خروجی ماشین
ولتاژ (V)	ولتاژ نامی پایانه های ماشین
سرعت (RPM)	سرعت گردش ماشین
فرکانس (Hz)	فرکانس اعمالی به ماشین

۳-۱-۳- تعیین پارامترهای اولیه طراحی

پس از معلوم شدن مشخصات اصلی ماشین، نوبت به پارامترهای اولیه طراحی می‌رسد. پارامترهای زیادی برای طراحی در نظر گرفته می‌شود که از این میان جدول (۳) برخی از مهمترین‌ها آنها را مشخص کرده است.

جدول (۳): پارامترهای اولیه طراحی

پارامتر	توصیف
Bav (T)	بارگذاری مغناطیسی ویژه
ac (A/m)	بارگذاری الکتریکی ویژه
Bys, Byr (T)	ماکزیمم چگالی شار استاتور و رتور
Bt (T)	ماکزیمم چگالی شار دندانه
Br (T)	چگالی شار پسماند مغناطیس دائم
L/tp	نسبت طول محوری به گام قطب
η(%)	بازده
PF	ضریب قدرت

انتخاب مقدار هر پارامتر بر اساس تجربه طراح و یا در بعضی موارد با استفاده از جداولی از پیش تعیین شده انجام می‌گیرد. همچنین باید ذکر شود که محدوده تغییرات این پارامترها تا حدودی بسته به مشخصات اصلی موتور (قدم اول) می‌باشد. معمولاً بارگذاری مغناطیسی ویژه با متوسط چگالی شار فاصله هوایی، Bg، یکسان در نظر گرفته می‌شود. مقدار مناسب برای بارگذاری مغناطیسی ویژه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بین ۰/۴۵ تا ۰/۸ T می‌باشد. همچنین برای بارگذاری الکتریکی ویژه این موتورها محدوده‌ای بین ۸۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ A.t/m در نظر گرفته می‌شود [۶، ۱].

دیگر پارامترها نظیر چگالی شار در یوغ استاتور و رتور و همچنین چگالی شار دندانه در حدود ۱ تا ۲ T می‌باشند و بر اساس ماده به کار رفته در هسته انتخاب می‌گردند. چگالی شار پسماند بسته به مغناطیس دائم به کار رفته در رتور تعیین می‌گردد. نسبت L/tp یکی از مهمترین پارامترها در طراحی است که بسته به نوع قطب تعیین می‌شود. برای قطب صاف مقداری بین ۰/۶ تا ۰/۷ و برای قطب برجسته بین ۱ تا ۳ اختیار می‌شود [۶]. علاوه بر موارد فوق، برای شروع طراحی لازم است دیگر پارامترهای اولیه نظیر بازده، ضریب قدرت، ضریب سیم پیچی و ... به صورت فرضی تعیین شده و در آخر پس از انجام طراحی نسبت به بر آورده شدن آنها اقدام گردد [۳۳].

۳-۱-۳- تعیین ابعاد و پارامترهای موتور

پس از دو مرحله اول، با استفاده از معادلات طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم، نسبت به تعیین ابعاد و پارامترهای موتور اقدام می‌شود. اکثر معادلات مطرح شده در این قسمت از کتب و مراجع معتبر به دست آمده است [۱، ۵، ۶ و ۳۵-۳۱]. طراحی ماشین با تعیین ابعاد اصلی آن شروع می‌شود. طول محوری موتور، L و قطر داخلی استاتور (قطر فاصله هوایی)، D ابعاد اصلی ماشین می‌باشند.

ابتدا باید ضریب خروجی (C0) موتور را تعیین کرد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_0 = 1.11\pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3} \quad (1)$$

توان ظاهری ورودی (Q) از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

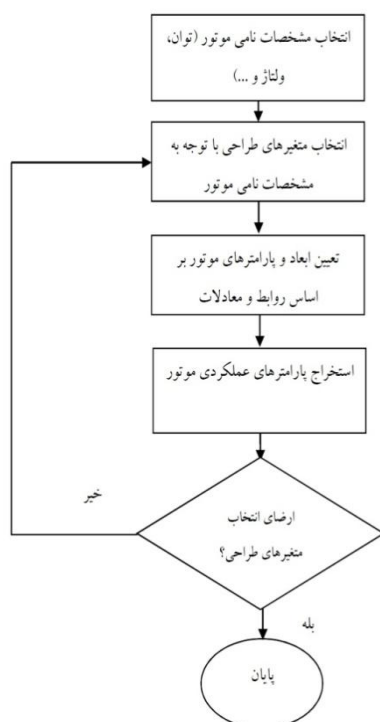
$$Q = \frac{P_{out}}{\eta PF} kVA \quad (2)$$

صورت دیگر این معادله که بر اساس ابعاد اصلی می‌باشد به صورت رابطه (۳) است:

$$Q = C_0 D^2 L n_s KVA \quad (3)$$

از این معادله می‌توان مقدار $D^2 L$ را تعیین کرد که کمیتی مهم است.

به معادلات طراحی، ابعاد و پارامترهای عملکردی موتور مشخص می‌شود که در جدول (۶) ارائه گردیده است.



شکل (۲): فلوچارت طراحی

در ضمن در این حالت طراحی، می‌توان تلفات و گشتاور را با استفاده از معادلات ارائه‌شده در بخش قبل محاسبه نمود. مقدار تلفات مسی با توجه به مقادیر مقاومت و جریان فاز به‌دست‌آمده در جدول (۸) برابر $۲۸/۰۹$ وات می‌شود.

جدول (۴): مشخصات اصلی موتور

پارامتر	مقدار
توان (W)	۵۵۰
ولتاژ (V)	۱۱۰
سرعت (RPM)	۱۵۰۰
فرکانس (Hz)	۵۰

جدول (۵): پارامترهای اولیه موتور

پارامتر	مقدار
Bav (T)	۰/۵
ac (A/m)	۲۲۰۰۰
Bys, Byr (T)	۱/۵
Bt (T)	۱/۵
η (%)	۹۰
PF	۰/۸
Br (T)	۱/۲
L/tp	۱/۲۵
Js (A/mm ²)	۳

$$D^2 L = \frac{Q}{C_0 n_s} m^3 \quad (۴)$$

که در این رابطه، Q بر حسب KVA و ns بر حسب rad/s می‌باشد. علاوه بر این یک رابطه دیگری به صورت زیر وجود دارد:

$$L = \alpha_r \frac{\pi D}{p} \quad (۵)$$

که در این رابطه داریم، $\alpha_r = L/\tau p$. با اعمال معادله (۵) در معادله (۴) می‌توان ابعاد اصلی موتور یعنی L و D را تعیین کرد. برای تعیین سایر پارامترها می‌توان به مراجع مربوطه مراجعه نمود [۱، ۵، ۶ و ۳۱-۳۵].

۳-۱-۴- فلوچارت طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز

می‌توان روال کلی طراحی را در شکل (۲) نشان داد که به صورت فلوچارت طراحی ارائه شده است. در واقع، می‌توان این‌طور بیان کرد که پس از انتخاب مشخصات نامی موتور، نسبت به انتخاب متغیرهای طراحی باید عنوان نمود، علاوه بر متغیرهای اصلی یک سری دیگر از متغیرهای اولیه برای شروع طراحی مورد نیاز است که از آن جمله می‌توان بازده و ضریب توان را نام برد. سپس با استفاده از روابط و معادلات، پارامترها و ابعاد مورد نیاز موتور تعیین می‌گردد. اگر پارامترهای عملکردی موتور با متغیرهای طراحی اولیه مطابق بود، طراحی درست بوده و خاتمه می‌یابد. چنانچه پارامترهای عملکردی موتور مطابق با موارد در نظر گرفته شده به‌عنوان متغیرهای اولیه نباشد، این متغیرها دوباره انتخاب می‌شوند. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که این شرط برقرار گردد. در عمل، به دلیل تجربه طراح پس از چندین مرحله این شرط برقرار خواهد شد.

۴- طراحی یک نمونه بدون بهینه‌سازی

در این بخش، یک طرح نمونه را توسط سه مرحله توضیح داده شده در قسمت قبلی طراحی می‌کنیم. برای این منظور، موتوری با مقادیر نامی دارای کاربرد در سامانه‌های دریایی انتخاب نموده ایم که مشخصات اصلی آن در جدول (۴) نشان داده شده است. این مشخصات بر طبق محدوده کاری مشخص موتورهای به‌کاررفته در زیردریایی‌های بدون سرنشین انتخاب شده است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین توضیح داده شد، می‌توان پارامترهای اولیه طراحی را بر اساس مشخصات موتور تعیین کرد. مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای اولیه موتور در جدول (۵) نمایش داده شده است. با اعمال مقادیر این دو جدول

مقدار دهی اولیه به جمعیت
ارزیابی صلاحیت جمعیت
While (معیار توقف ارضا نشده) // ایجاد جمعیت جدید
انتخاب مکان برای جستجوی همسایگی
به کار گرفتن زنبورها برای مکان‌های انتخابی (زنبورهای بیشتر برای e
بهترین مکان) و ارزیابی صلاحیت
انتخاب اصلح‌ترین زنبور از هر مکان
منصوب کردن زنبورهای باقیمانده برای جستجوی تصادفی و ارزیابی
صلاحیت آنها
پایان While

شکل (۳): کد Pseudo

۴-۱-۲- طراحی بهینه PMSM با الگوریتم زنبور

در این پژوهش تابع هدف ترکیبی از تلفات کل و گشتاور موتور در نظر گرفته شده است. تلفات موتور شامل تلفات مسی استاتور، تلفات هسته (هیستریزیس و فوکو)، تلفات ثابت و همچنین تلفات هرز می‌باشد. از آنجایی که در کاربردهایی نظیر سیستم‌های زیردریایی بدون سرنشین یکی از مهم‌ترین جوانب بحث ظرفیت باتری می‌باشد، لذا موتور طراحی شده باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود که حداقل تلفات را داشته باشد. از طرف دیگر، در این کاربردها قدرت پیشرانش موتور نیز بسیار حائز اهمیت است، به عبارت دیگر موتور باید بتواند حداکثر گشتاور ممکن را برای حرکت به سمت جلو تولید نماید. از این‌رو، تابع هدف در نظر گرفته شده برای این پژوهش ترکیبی از تلفات کل و گشتاور موتور می‌باشد. تابع هدف در معادله زیر مشخص شده است:

$$F = \frac{P_{loss}(ac, B_{av}, L, D, \tau_p, \phi, J_s)}{T(B_{av}, L, D)} \quad (6)$$

هدف، حداقل‌سازی تابع هدف فوق می‌باشد که به معنی کاهش تلفات و افزایش گشتاور به‌طور همزمان می‌باشد. متغیرهای بهینه‌سازی در این تحلیل عبارتند از: بارگذاری الکتریکی ویژه (ac)، بارگذاری مغناطیسی ویژه (Bav)، طول محوری موتور (L)، قطر داخلی استاتور (D)، گام قطب (tp)، شار زیر هر قطب (φ) و چگالی جریان استاتور (Js). محدودیت‌های به‌کاررفته برای متغیرهای بهینه‌سازی در قسمت قبل ارائه شده است. با اعمال این محدودیت‌ها به تابع هدف که بر اساس این هفت متغیر اساسی می‌باشد، تابع هدف با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به دست می‌آید. شکل (۴) تابع هدف را در برابر تکرار نشان می‌دهد. باید ذکر نمود که در این تحلیل اندازه جمعیت ۱۰۰، تعداد تکرار ۵۰۰ و تعداد زنبورهای نخبه ۴۰ عدد در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، تابع هدف پس از حدود ۲۳۴ تکرار به مقدار بهینه‌اش یعنی ۱/۳۴۸۴ می‌رسد که این مقدار برای تلفات و گشتاور به ترتیب برابر با W ۵۹/۵ و N.m ۳/۳۲ می‌باشد. مشخصاً نسبت به حالت طراحی معمولی،

جدول (۶): ابعاد و مشخصات عملکردی موتور

مقدار	بعد / پارامتر
۶۴/۸	D (mm)
۶۳/۶	L (mm)
۵۰/۹	tp (mm)
۰/۷	LPM (mm)
۰/۸۹	gPM (mm)
۰/۰۰۱۷	φ (wb)
۶۰/۴۲	Li (mm)
۱۰/۲	ts (mm)
۳/۴	ot (mm)
۶/۸	os (mm)
۴	otb (mm)
۱۲/۸	osb (mm)
۱۴/۵	hs (mm)
۱۰/۸	hbis, hbir (mm)
۲/۴۸	Is (A)
۰/۹۱	Rs (Ω)
۶۱/۶	Es (V)
۱۷۰	Ts (turns)
۸۴	Zslot (turns)

تلفات هسته با توجه به ضرایب فوکو و هیستریزیس که بر اساس حجم موتور طراحی شده و جرم آن برابر ۲۵/۰۳ می‌شود. در ضمن تلفات ثابت را حدود یک درصد و تلفات هرز را نیم درصد تلفات خروجی در نظر می‌گیریم. در نتیجه تلفات کل برابر ۶۱/۳۸ W می‌گردد. گشتاور نیز برابر ۲/۹۳ N.m می‌شود.

۴-۱-۱- بهینه‌سازی

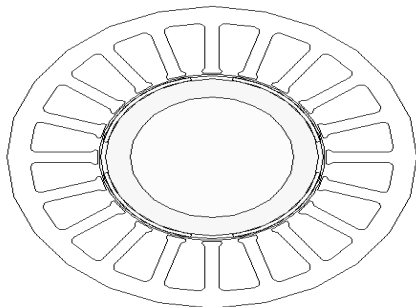
در این قسمت بهینه‌سازی بر روی نمونه موردی مطرح شده در قسمت قبل انجام می‌شود و در نهایت مقایسه‌ای بین دو روش طراحی معمولی و طراحی بهینه صورت خواهد گرفت. ابتدا مقدمه‌ای در مورد الگوریتم‌های تکاملی و بحث بهینه‌سازی ارائه می‌شود.

۴-۱-۱-۱- الگوریتم زنبور

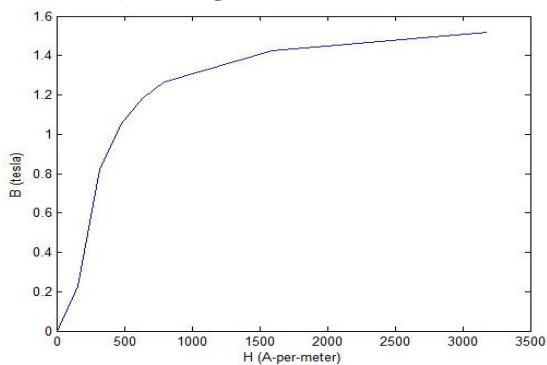
الگوریتم زنبور یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد که از رفتار گروهی زنبورهای عسل جهت یافتن راه حل بهینه الهام گرفته شده است. شکل (۳) کد Pseudo را برای الگوریتم نشان می‌دهد [۳۶].

- ✓ رسم طرح موتور
- ✓ مشخص نمودن جنس مواد مختلف طرح
- ✓ اعمال شرایط مرزی
- ✓ مش بندی نمودن موتور
- ✓ مشخص نمودن حلال برای حل
- ✓ استخراج پارامترها و نمودارهای خروجی

شمای موتور طراحی شده در این نرم افزار در شکل (۵) نشان داده شده است. جنس فولاد به کاررفته به عنوان هسته استاتور و رتور این موتور Steel 1008 می باشد که منحنی مغناطیسی B-H آن در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است نقطه زانویی این منحنی (چگالی شار اشباع) حدود $1/5$ T می باشد. مغناطیس‌های دائم از جنس NdFe35 با چگالی شار پسماند $1/2$ T هستند. با مشخص کردن تنظیمات و اعمال شرایط مرزی، قدم بعدی مش بندی موتور می باشد. دیاگرام مش بندی موتور در شکل (۷) نمایش داده شده است. در این شکل مش بندی در فاصله هوایی به صورت بزرگنمایی شده نیز نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، تعداد مش‌های فاصله هوایی بیشتر است زیرا تغییرات میدان در این ناحیه بیشتر از دیگر نقاط می باشد. تعداد کل مش‌های به کاررفته در این تحلیل ۲۴۵۱۶ عدد است. در شکل (۸) توزیع چگالی شار موتور طراحی شده، نشان داده شده است که حداکثر مقدار آن در گوشه‌های دندانه اتفاق می افتد. همان طور که مشخص است چگالی شار اشباع در حدود $1/5$ T می باشد که مطابق با فرض طراحی موتور می باشد.

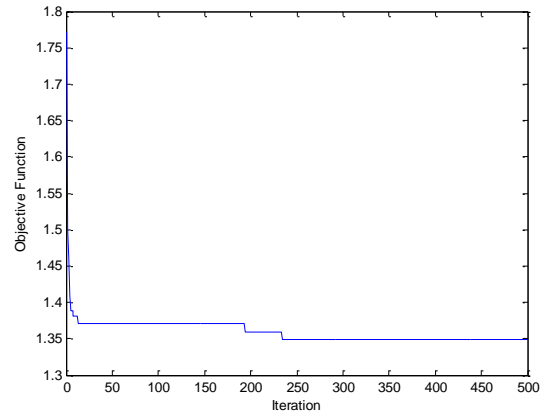


شکل (۵): شمای موتور طراحی شده در نرم افزار



شکل (۶): منحنی B-H فولاد هسته استاتور و رتور

تلفات کاهش و گشتاور افزایش یافته است. علاوه بر این، ابعاد بهینه و متغیرهای بهینه سازی موتور نیز در جدول (۷) ارائه شده است. در مقایسه با طراحی معمولی کاهش محسوس ابعاد مشخص است.



شکل (۴): تابع هدف در برابر تکرار

جدول (۷): ابعاد و متغیرهای بهینه موتور

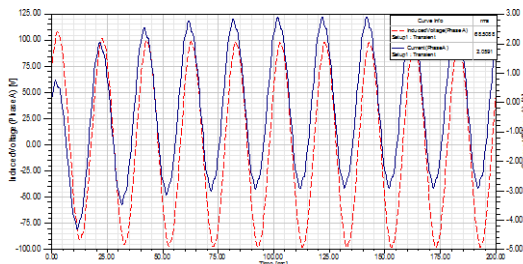
مقدار	ابعاد
۶۶/۲	D (mm)
۶۴/۷	L (mm)
۴۸/۳۲	τ_p (mm)
۰/۰۰۱۵	ϕ (wb)
۳	J_s (A/mm ²)
۰/۵۲	Bav (T)
۲۰۰۰	ac (A/m)

۵- مقایسه و تحلیل نتایج با استفاده از FEM

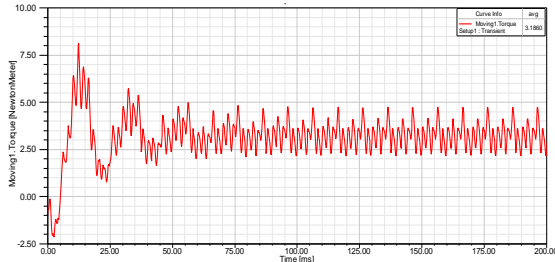
روش تحلیل اجزای محدود حدود سی سال است که وارد مهندسی برق شده است و برای بررسی و تحلیل اشکال غیر منظم و پیچیده بسیار مطلوب و کاراست. چاری و سیلوستر اولین افرادی بودند که از این روش جهت تحلیل مسائل الکترومغناطیسی بهره بردند [۳۸]. سپس استفاده از آن در تحلیل موتورهای DC و دیگر گونه موتورهای الکتریکی نظیر موتورهای القایی [۳۹] و سنکرون [۴۰] رواج پیدا کرد. امروزه این روش بسیار فراگیر و کارآمد بوده و در اکثر موارد مهندسی مورد استفاده واقع می شود.

در این پژوهش، به منظور آنالیز الکترومغناطیسی از نرم افزار Ansoft Maxwell استفاده شده است. این نرم افزار که بر مبنای تحلیل اجزای محدود می باشد، یکی از مناسب ترین نرم افزارهای موجود جهت تحلیل و سنجش ماشین های الکتریکی گردان می باشد.

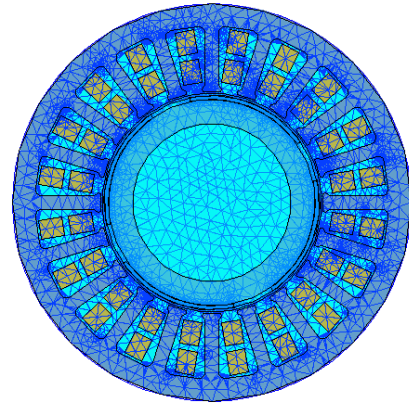
روش کار نرم افزار را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:



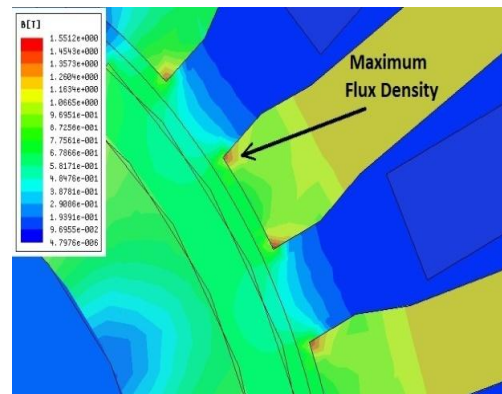
شکل (۱۰): ولتاژ و جریان یک فاز



شکل (۱۱): گشتاور خروجی موتور



شکل (۷): مش بندی موتور



شکل (۸): توزیع چگالی شار

جدول (۸): مقایسه مقادیر تحلیلی با مقادیر تحلیل اجزای محدود

خطا (%)	تحلیل اجزای محدود	تحلیلی	
۵/۸	۶۸/۵	۶۴/۷	ولتاژ ضد محرکه (V)
۱۶/۹	۲/۰۵۹۱	۲/۴۸	جریان (A)
۴/۰۳۶	۳/۱۸۶	۳/۳۲	گشتاور (Nm)
۰/۱۶	۰/۵۰۳	۰/۵	چگالی شار فاصله هوایی (Wb)

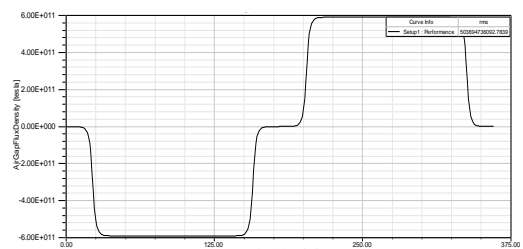
۶- نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله ارائه بهینه‌سازی طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز می باشد. بهینه‌سازی به منظور جستجوی ابعاد بهینه‌ی موتور انجام گرفت که از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور استفاده شده است. هدف از بهینه‌سازی، کاهش تلفات کل و همچنین افزایش گشتاور این موتور می باشد.

با انجام بهینه‌سازی در مقایسه با موتور طراحی شده به روش معمولی، تلفات کل بیش از ۳ درصد کاهش و گشتاور بیش از ۱۳ درصد افزایش یافت. در نهایت، با استفاده از تحلیل اجزای محدود، طراحی تحلیلی با خطای قابل قبول تأیید شد که کارایی و اعتبار دقت روند بهینه‌سازی را اثبات می‌کند. در کل می‌توان یافته‌های این مقاله را به صورت زیر خلاصه نمود:

- ✓ تحلیل و بررسی روند طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز
- ✓ انجام بهینه‌سازی طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز
- ✓ تأیید روند طراحی بهینه با استفاده از تحلیل اجزای محدود

چگالی شار مغناطیسی موتور بر حسب درجه الکتریکی در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، مقدار چگالی شار به دست آمده از نرم افزار (در حدود ۰/۵ تسلا) با مقدار چگالی شار مفروض در روش تحلیلی مطابقت دارد. این نرم افزار علاوه بر تحلیل مغناطیسی، امکان بررسی شرایط عملکردی ماشین‌ها را نیز فراهم می‌کند. جریان و ولتاژ یک فاز استاتور در شکل (۱۰) نشان داده شده است و گشتاور خروجی موتور در شکل (۱۱) ترسیم گشته است. همانطور که مشخص است مقدار موثر جریان و ولتاژ فاز استاتور و همچنین گشتاور موتور مطابق با مقادیر به دست آمده از روابط تحلیلی می‌باشد. جدول (۸) مقادیر به دست آمده از روابط تحلیلی را با مقادیر حاصل از تحلیل اجزای محدود مقایسه می‌کند.



شکل (۹): چگالی شار فاصله هوایی

- Cogging Force, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, NO. 2, February 2012.
- [15] K. C. Kim, J. Lee, H. J. Kim, D. H. Koo, Multiobjective Optimal Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, NO. 3, March 2009.
- [16] S. Sadeghi, L. Parsa, Multiobjective Design Optimization of Five-Phase Halbach Array Permanent-Magnet Machine, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, NO. 6, June 2011.
- [17] Y. Fujishima, S. Wakao, M. Kondo, N. Terauchi, An Optimal Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for the Next Generation Commuter Train, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, NO. 2, June 2004.
- [18] D. Y. Lee, C. G. Jung, K. J. Yoon, G. T. Kim, A Study on the Efficiency Optimum Design of a Permanent Magnet Type Linear Synchronous Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, NO. 5, May 2005.
- [19] A. Kioumars, M. Moallem, B. Fahimi, Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optimal Shape Design, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, NO. 11, November 2006.
- [20] C. Candela, M. Morin, F. Blazquez, C. A. Platero, Optimal Design of a Salient Poles Permanent Magnet Synchronous Motor Using Geometric Programming and Finite Element Method, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines.
- [21] D. H. Cho, H. K. Jung, D. S. Sim, Multiobjective Optimal Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Improved Core Loss Formula, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999.
- [22] Y. Li, J. Zou, Y. Lu, Optimum Design of Magnet Shape in Permanent-Magnet Synchronous Motors, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, NO. 6, November 2003.
- [23] A. Rahideh, T. Korakianitis, P. Ruiz, T. Keeble, M.T. Rothman, Optimal brushless DC motor design using genetic algorithms, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 322 (2010) 3680–3687.
- [24] M. Markovic, P. Ragot, Y. Perriard, Design optimization of a BLDC motor: a comparative analysis, in: Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Turkey, 2007, pp. 1520-1523.
- [25] S. Vivier, F. Gillon, P. Brochet, Optimization techniques derived from experimental design method and their application to the design of a brushless direct current motor, IEEE Transactions on Magnetics 37 (5) (2001) 3622–3626.
- [26] P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal, Genetic algorithm based design optimization of a permanent magnet brushless DC motor, Journal of Applied Physics 97 (10) (2005) Article No. Q516.
- [27] N. Bianchi, S. Bolognani, Brushless DC motor design: an optimisation procedure based on genetic algorithms, in: Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Drives, UK, 1997, pp. 16-20.
- [28] Z. Ren, X. Fang, S. Wang, J. Qiu, J. G. Zhu, Y. Guo, Design Optimization of an Interior-type Permanent Magnet BLDC Motor using PSO and Improved MEC, Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8~11, Seoul, Korea.
- [29] Reza Ilka, S.Asghar Gholamian, sepide valiollahi, Optimal design of brushless permanent magnet motor using Bees

پیشنهادات: می‌توان طراحی بهینه این موتورها را با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام داد. مشخص است که در آن صورت می‌توان مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به انجام رساند و بهترین روش را انتخاب نمود.

علاوه بر این می‌توان با تعریف توابع هدف جامع‌تر و دقیق‌تر فرآیند بهینه‌سازی را گسترش داده و از بیش از دو شاخص برای تعیین عملکرد موتور بهره برد.

۷- مراجع

- [1] J. Pyrhonen, T. Jokinen and V. Hrabovcova, Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons, 2008.
- [2] S. W. Colton, Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control, M.Sc Thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2010.
- [3] P. Pillay, R. Krishnan, Modeling of Permanent Magnet Motor Drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 35, NO.4, November 1988.
- [4] J. F. Gieras, M. Wing, Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications, CRC Press, 2nd edition, 2002.
- [5] H. A. Toliyat, G. B. Kilman, Handbook of Electric Motors, CRC Press, 2nd Edition, 2004.
- [6] Hamdi, Essam S. Design of small electrical machines. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [7] X. Jannot, J. Vannier, C. Marchand, M. Gabsi, J. Saint-Michel, and D. Sa, Multiphysics Modeling of a High-Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Machine for a Multiobjective Optimal Design, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, NO. 2, June 2011.
- [8] S. Vaez-Zadeh, A.R. Ghasemi, Design optimization of permanent magnet synchronous motors for high torque capability and low magnet volume, Electric Power Systems Research 74 (2005) 307–313.
- [9] N. Roshandel Tavana, A. Shoulaie, Pole-shape optimization of permanent-magnet linear synchronous motor for reduction of thrust ripple, Energy Conversion and Management 52 (2011) 349–354.
- [10] A. Hassanpour Isfahani, S. Vaez-Zadeh, Design optimization of a linear permanent magnet synchronous motor for extra low force pulsations, Energy Conversion and Management 48 (2007) 443–449.
- [11] Y. Li, J. Xing, T. Wang, and Y. Lu, Programmable Design of Magnet Shape for Permanent-Magnet Synchronous Motors With Sinusoidal Back EMF Waveforms, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, NO. 9, September 2008.
- [12] J. Gao, J. Liu, S. Huang, K. Huang, Optimum Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Gene Handling Genetic Algorithms, 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering.
- [13] J. S. Chun, J. P. Lim, H. K. Jung, Optimal Design of Synchronous motor with Parameter Correction Using Immune Algorithm, IEEE Transactions on Energy Conversion, September 1999, Vol. 14, NO. 3, 610 – 615.
- [14] C. C. Hwang, P. L. Li, C. T. Liu, Optimal Design of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor With Low

algorithm and finite element analysis, Journal of Intelligent systems in electrical engineering, Vol.2, NO.1, 2011.

- [30] R. Ilka, S. A. Gholamian, H. A. Kholerdi, A. Ebrahimzadeh, Application of Artificial Bee Colony Algorithm and Finite Element Analysis for Optimum Design of Brushless Permanent Magnet Motor, IIUM Engineering Journal, Vol. 13 No. 1, 2012.
- [31] G. McPherson, R. D. Laramore, an Introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [32] H. Lesani, Design of electric machines, 1982.
- [33] W. Yeadon, A. Yeadon, Handbook of Small Electric Motors, McGraw-Hill Professional; 1 edition, 2001.
- [34] N. Bianchi, S. Bolognani, and P. Frare, Design Criteria for High-Efficiency SPM Synchronous Motors, IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 21, NO. 2, June 2006.
- [35] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, and T. A. Lipo, A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, NO. 1, January/February 1998.
- [36] D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, The bees algorithm—a novel tool for complex optimisation problems, in: Intelligent Production Machines and Systems, 2006, pp. 454–459.
- [37] D. C. Hanselman, Brushless permanent magnet motor design, Magna Physics Publishing, 2nd edition, 2006.
- [38] M.V.k. Chari, P. Silvester, Finite-Element Analysis of Magnetically Saturated DC Machines, IEEE, New York, January 31- February 5, 1971.
- [39] T. S. Parkin, T.W. Preston, Induction Motor Analysis Using Finite Element, Proc. IEE, The Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1993, pp. 20-24.
- [40] T. Miller, M.I. Mcgillip, M. Olaru, Finite Element Applied to Synchronous and Switched Reluctance Motors, IEE Seminar, Savoy Place, London WC2ROBL, Friday 14 January, 2000, pp. 311-314.

Optimum Design of a Five-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for Naval Applications using Bees Algorithm

R. Ilka, S. A. Gholamian*

Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 13/12/2014, Accepted: 13/01/2016)

Abstract

Multi-phase motors are increasingly used in electrical systems due to their benefits such as decreased current without decreasing voltage, decrease of DC link current and improved reliability. Major applications of such motors are naval systems, electric vehicles, spacecrafts and etc. besides, permanent magnet motors has gained researchers' attention due to their simple design, high efficiency and power density, low volume and weight and minimum loss and noise. However, electrical motors companies are under pressure and they have to present devices with minimum financial charges. The first and the most important aspect in electrical machines design is to decrease the volume and weight and consequently improve their power density and efficiency. In other word, improvement is done by optimizing machines' dimensions. This thesis presents design optimization of five-phase permanent magnet synchronous motors to use in underwater vehicles. For this purpose, motor is optimized using optimization Bees algorithm (BA) to have less volume and weight and best operational characteristics. Then, motor is simulated using Ansoft Maxwell which is based on finite element analysis. This software gives required information about performance of the motor. Finite element analysis is an accurate and valid method which is used extensively in analyzing such problems.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, five-phase, motor design, Bees algorithm

* Corresponding author E-mail: Gholamian@nit.ac.ir