

طراحی بهینه موتور القایی قفس سنجابی با استفاده از الگوریتم چندهدفه اجتماع

سالپ

سیدرضا موسوی اقدم^{۱*}، سعیده منصوری آل هاشم^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی برق و مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

R.mousaviaghdam@uma.ac.ir

^۲ دانشجوی ارشد دانشکده مهندسی برق و مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

Saeede.mansoori@gmail.com

چکیده: طراحی موتورهای القایی سه فاز کارآمد، یک چالش مهم در مهندسی برق است. به همین منظور، به طور مداوم تکنیک‌های طراحی جدیدی معرفی می‌شوند. در این مقاله، برای طراحی موتورهای القایی قفس سنجابی، با هدف افزایش راندمان و کاهش هزینه‌ها، از روش بهینه‌سازی فراابتکاری استفاده شده است. در این روش، مدل‌سازی موتور القایی به صورت دقیق انجام شده و برای حل این مسئله بهینه‌سازی، از روش جدید الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه اجتماع سالپ (MSSA) استفاده شده است. این الگوریتم از رفتار اجتماعی سالپ‌ها الهام گرفته شده است. روش پیشنهادی بر روی یک موتور القایی ۲/۵ کیلووات و با استاندارد بازدهی (IE2) اعمال شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه نشان می‌دهد که طراحی موتور القایی با دو تابع هدف، باعث افزایش راندمان و کاهش هزینه شده است. در ادامه، برای بررسی کارایی الگوریتم MSSA، نتایج آن، با روش الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی غیرمستقیم (NSGA-II) و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات چندهدفه (MOPSO) مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم MSSA دارای سرعت همگرایی و تعداد مجموعه جواب‌های بهینه بالایی است، که باعث عملکرد مطلوب این الگوریتم در طراحی بهینه موتور القایی جهت افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های آن است.

واژه‌های کلیدی: طراحی بهینه، موتور القایی قفس سنجابی، الگوریتم بهینه‌سازی، الگوریتم چندهدفه اجتماع سالپ.

* نویسنده مسئول

القایی قفس سنجابی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱]. در مرجع [۱۵]، روشی برای به دست آوردن چگالی گشتاور بالا در طراحی موتور القایی^۴ (IM) با الگوریتم بهینه‌سازی جستجو^۵ (SOA) ارائه شده است. در مرجع [۱۶]، یک تکنیک طراحی بهینه چندهدفه برای یک موتور القایی شش فاز مجهز به یک کمپرسور، برای دستیابی به حداقل هزینه تولید و جریان راه‌اندازی کم، حداکثر راندمان و ضریب توان ارائه شده است.

الگوریتم پیشنهادی در این مرجع، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات اصلاح‌شده و روش تاگوچی، با تجزیه و تحلیل اجزا محدود می‌باشد. در مرجع [۱۷]، بررسی عملکرد و نتایج آزمایشی موتور القایی خطی^۶ (LIM) با سیم‌پیچ چنبره‌ای^۷ ارائه شده است. طراحی این ماشین، با هدف توان خروجی حداکثر، با مصرف سیم‌پیچی کم، به صورت بهینه انجام شده است. در مرجع [۱۸]، طراحی موتورهای القایی کوچک با استفاده از روش بهینه‌سازی با هدف افزایش راندمان و کاهش تلفات ارائه شده است. در مرجع [۱۹]، با استفاده از روش غیر خطی به طراحی و کنترل موتورهای القایی بدون سنسور پرداخته شده است. در مرجع [۲۰]، یک روش طراحی بهینه بر اساس شکل شکاف روتور موتور القایی سه‌فاز^۸ NEMA کلاس D با استفاده از بهینه‌سازی PSO چندهدفه گوسی ارائه شده است.

با توجه به اینکه مدل ریاضی بایستی دارای دقت بالایی باشد تا نتایج قابل اتکایی توسط روش بهینه‌سازی فراابتکاری تولید شوند، اما کارهای پیشین به جای مدل موتور بر روی روش‌های بهینه‌سازی تمرکز داشته‌اند [۲۱، ۲۲]. از آنجاکه در مدل‌سازی موتور، روش المان محدود^۹ (FEM) به‌عنوان ابزار عددی دقیقی برای تحلیل عملکرد یک موتور القایی شناخته می‌شود. اما برای استفاده از FEM، هندسه‌ی دقیق ساختار مغناطیسی بایستی مشخص شود، به‌علاوه شبیه‌سازی عملی، نیازمند زمان زیادی است [۲۳، ۲۴]. به همین خاطر، روش مبتنی بر تعیین پارامتر مدار معادل، اغلب به‌عنوان گام نخست در فرآیند طراحی استفاده شده و FEM به‌عنوان طراحی مجدد یا ابزار آزمایش استفاده می‌شود [۳]. در نتیجه تحلیل‌های مدار معادل، اغلب به‌عنوان مدل ریاضی در بهینه‌سازی فراابتکاری موتور القایی قفس سنجابی استفاده شده است.

در مراجع، علیرغم استفاده گسترده از مدار معادل به‌عنوان مدل موتور القایی قفس سنجابی، زمانی که از روش بهینه‌سازی فراابتکاری

طراحی بهینه موتورهای القایی قفس سنجابی سه‌فاز با بازدهی بالا، بسیار مورد توجه محققان است. به‌ویژه، به این دلیل که افزایش بازده موتورهای الکتریکی باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود که در ذخیره‌سازی انرژی اهمیت زیادی دارد. اگرچه هدف اصلی طراحی، افزایش بازده موتور است اما هزینه تولید، همواره یک عامل محدودکننده در طراحی می‌باشد. بنابراین، طراحی یک موتور با بازدهی بالا، بایستی با توجه به این دو پارامتر صورت گیرد که منجر به یک مسئله بهینه‌سازی شامل حداکثرسازی بازده و به حداقل رساندن هزینه شود [۱].

در مراجع [۱، ۲] ضمن توضیح این تصور غلط که بایستی وظایف بهینه‌سازی بیشتر به سمت بهینه‌سازی یک تابع تک‌هدفه سوق داده شود، اهمیت استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه نیز، توضیح داده شده است. به‌علاوه، برخی تکنیک‌های بهینه‌سازی قطعی متداول برای حل مسائل چندهدفه به کار گرفته شده‌اند. این تکنیک‌ها نقص‌های متعددی دارند [۳]. این نقص‌ها، مخصوصاً هنگامی که مسئله بهینه‌سازی شامل متغیرها و محدودیت‌های زیادی باشد، نظیر طراحی موتور القایی قفس سنجابی، نمایان‌تر است. از این رو روش‌های چندهدفه فراشناختی تصادفی، ابزار سودمندی هستند. در زمینه طراحی موتور، برخی نویسندگان تکنیک‌های بهینه‌سازی فراابتکاری را به کار برده‌اند. برای مثال تکنیک‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به صورت تک‌هدفه به کار برده شده و اغلب با روش‌های قطعی مقایسه شده‌اند [۴-۶].

در مراجع [۷-۹]، روش الگوریتم^۱ (PSO) در یک مسئله تک‌هدفه استفاده شده است. بهینه‌سازی تغذیه باکتری^۲ (BFO) نیز برای طراحی موتور استفاده شده است [۱۰، ۱۱]. اخیراً، برخی نویسندگان روش‌های بهینه‌سازی را برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه واقعی مربوط به موتورهای القایی قفس سنجابی ارزیابی کرده‌اند. برای مثال یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه با یک روش مدار معادل در مرجع [۱۲] نشان داده شده است. در مرجع [۱۳] از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی یعنی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمستقیم^۳ (NSGA-II) و الگوریتم تکاملی پارتو قدرتمند برای تعیین بازده موتور القایی در حال کار، استفاده شده است.

در مرجع [۱۴] نیز روش NSGA-II بررسی شده و نتایج آن با نتایج سه روش تک‌هدفه مقایسه شده است. از آنجا که مسائل چندهدفه با تفکیک به مسائل تک‌هدفه‌ی معادل حل می‌شوند، در گذشته روش‌های PSO چندهدفه و کموناکسی باکتریایی در طراحی موتور

4. Induction Motor
5. Search Optimization Algorithms
6. Linear Induction Motor
7. Toroidal winding
8. National Electrical Manufacturers Association
9. Finite Element Method

1. Particle Swarm Optimization
2. Bacterial Foraging Optimization
3. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II

استفاده می‌شود، محاسبه پارامترهای مداری، به‌طور کامل مورد بحث قرار نگرفته است. برای مثال، مشخص نشده که موتور بایستی تحت چه شرایطی به کار برده شود تا بتوان به یک طراحی بهینه قابل قبول دست یافت. لذا این مقاله، ملاحظات بحرانی در تعیین پارامترهای مدار معادل را شناسایی و مورد بحث قرار داده است. یکی از اهداف مقاله، توصیف شرایط مورد نیاز برای تضمین یک طراحی بهینه قابل قبول یا روشی است که بتوان مجموعه‌ای از یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه واقعی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری و یک مدل تحلیلی ریاضی موتور القایی قفس‌سنجایی را به درستی تعریف کرد.

در این مقاله، برای طراحی بهینه موتور القایی قفس‌سنجایی روش جدید مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهاد شده است. در این روش بهینه‌سازی، توابع هدف به‌صورت حداقل کردن هزینه‌ی بخش‌های فعال و حداکثرسازی بازده کاری یک موتور القایی قفس‌سنجایی در نظر گرفته شده است. برای حل این مساله بهینه‌سازی، از روش جدید الگوریتم اجتماع سالپ^۱ (SSA) بهره گرفته شده، که توسط میرجلیلی و همکاران، در سال ۲۰۱۷ ارائه شده است [۲۵]. این الگوریتم از رفتار اجتماعی و حرکت زنجیروار سالپ‌ها الهام گرفته شده است. زنجیره سالپ دارای این توانایی است که به سمت بهینه سراسری که در طی تکرارها تغییر می‌کند، حرکت کنند و به جواب بهینه دست یابند. از مزایای الگوریتم SSA در حل مسائل بهینه‌سازی، به برخی نکات زیر می‌توان اشاره کرد:

- الگوریتم SSA، بهترین پاسخ به‌دست‌آمده تاکنون را ذخیره کرده و آن را به متغیر منبع غذا اختصاص می‌دهد، بنابراین حتی اگر کل جمعیت تخریب شود و از بین رود، آن را حفظ می‌کند.
- الگوریتم SSA، موقعیت سالپ پیرو را نسبت به فقط منبع غذایی، که بهترین پاسخ به‌دست‌آمده تاکنون است، بروزرسانی می‌کند، بنابراین رهبر همواره فضای اطراف خود را اکتشاف و بهره‌برداری می‌کند.
- الگوریتم SSA، موقعیت سالپ‌های پیرو را نسبت به هم بروزرسانی می‌کند، بنابراین به تدریج به سمت سالپ رهبر حرکت می‌کنند.
- حرکات تدریجی سالپ‌های پیرو مانع از آن می‌شود که الگوریتم SSA، به راحتی در بهینه‌های محلی به دام افتد.
- پارامتر C₁، در طی تکرارها به‌صورت تطبیقی کاهش می‌یابد، بنابراین الگوریتم SSA، ابتدا فضای جستجو را کشف کرده و سپس از آن بهره‌برداری می‌کند.

- الگوریتم SSA، تنها یک پارامتر اصلی کنترلی دارد (C₁).
 - الگوریتم SSA ساده بوده و پیاده‌سازی آن آسان است.
- روش الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه اجتماع سالپ^۲ (MSSA) با روش‌های الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی غیرمستقیم^۳ (NSGA-II) و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات چندهدفه^۴ (MOPSO)، نیز مقایسه شده است. در این مطالعه، همچنین از تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب جواب بهینه از بین مجموعه جواب‌های جبهه پاراتو استفاده شده است. روش پیشنهادی جهت طراحی بهینه بر روی یک موتور دوقطبی ۲/۵ کیلووات، با بازدهی IE2 اعمال شده است.

۲. مدل‌سازی موتور القایی قفس‌سنجایی

یکی از معایب اصلی موتورهای القایی، راندمان پایین و حجم بالای آن‌ها می‌باشد. در موتورهای القایی دو نوع سیم‌پیچی ثانویه یا روتور وجود دارد: روتور سیم‌پیچی شده و روتور قفسه‌ای. در روتورهای قفسه‌ای، ورق‌ها در قالب هسته انباشته شده و آلومینیوم مذاب با فشار داخل قالب را پر می‌کند. در این روش تولید، میله‌های روتور، حلقه‌های انتهایی و پره‌های خنک‌سازی همگی به‌طور همزمان ریخته‌گری شده و روتور در فرآیندی یکپارچه ساخته می‌شود.

امروزه موتور القایی قفسه‌ای، بیشترین کاربرد را در صنایع به خود اختصاص داده است [۲۶]. این موتورها، به دلیل سهولت در بهره‌برداری، قابلیت اطمینان بالا، صرفه‌جویی در هزینه، قابلیت راه‌اندازی مناسب، سهولت کاربرد، ساختار مستحکم، نگهداری آسان، قیمت پایین و سروصدای کم، بیشتر از موتورهای دیگر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعد از گسترش درایوهای کنترل سرعت، نقش این موتورها در صنعت افزایش زیادی داشته است [۲۷، ۲۸]. به همین منظور، طراحی دقیق و بهینه این نوع موتورها دارای اهمیت است. در گام نخست طراحی، باید پارامترهای اصلی موتور القایی سه‌فاز مورد نظر را تعیین کرد. این مشخصات متناسب با کاربرد موتور و یا توسط مشتری تعیین می‌شوند. این پارامترها عبارتند از: توان خروجی ماشین (برحسب وات)، ولتاژ نامی ترمینال ماشین (برحسب ولت) و فرکانس اسمالی به ماشین (برحسب هرتز) [۲۶]. در این مقاله، برای نمونه از یک موتور القایی قفسه‌ای ۲/۵ کیلووات با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ نامی ۳۸۰ ولت استفاده شده است.

۱.۲. مدار معادل موتور القایی

در این مقاله، محاسبات مبتنی بر روش موجود در مراجع [۳، ۳۰] استفاده شده است. این محاسبات در روابط (۲) تا (۴) آورده شده‌اند. فاکتور $k_{ew} = 1.1$ از روی اندازه‌گیری تجربی مقاومت که بر روی ۵۴ موتور انجام گرفته، تعیین شده است. همچنین برای محاسبه R_s بایستی ضریب تصحیح دما ρ_s در نظر گرفته شود [۳].

$$R_s = \rho_{cu} \frac{N_{tpp} l_{tw}}{S_{cu}} \quad (1)$$

$$l_{tw} = 2(l + l_{ew}) \quad (2)$$

$$l_{ew} = K_{ew} \tau_{ew} \quad (3)$$

$$\tau_{ew} = \frac{\pi}{2P} (D_{si} + h_{ss}) \quad (4)$$

ضخامت ورقه‌ها به‌عنوان بخشی از محاسبات محسوب می‌شود. که می‌توان آن را داخل ضریب پشته ورقه در نظر گرفت. ضریب پشته توسط سازنده‌ی ورقه‌ها ارائه شده و بایستی بر طول پشته‌ی هسته (l) اعمال شود. برای تحلیل پارامتری مدار روتور قفسه‌ای، فرض شده که تعداد فازهای روتور برابر تعداد میله‌های روتور می‌باشد. مقاومت فاز قفس به میله و قطاع حلقه‌ی مجاور هر سمت انتقال داده شده است [۲۰]. مقاومت را می‌تواند توسط معادلات (۵) الی (۷) محاسبه شود:

$$R_b = K_R \rho_{al} \frac{l_b}{S_b} \quad (5)$$

$$R_{er} = \rho_{al} \frac{l_{er}}{S_{er}} \quad (6)$$

$$R_r = R_b + \frac{R_{er}}{2 \sin^2 \left(\frac{\pi P}{N_r} \right)} \quad (7)$$

لازم به ذکر است که طول میله‌ی روتور l_b بایستی متناسب با طول پشته هسته l باشد.

۳.۲. اندوکتانس نشی معادل روتور و استاتور

محاسبه اندوکتانس نشی از روی ابعاد هندسی، کاری دشوار و شدیداً وابسته به تقریب‌های هندسی است. اندوکتانس‌های نشی کلی روتور و استاتور در معادلات (۸) و (۹) آورده شده‌اند.

$$L_{sl} = \frac{N_s}{m} \left[L_{ss1} + L_{ew1} + L_{sd1} \right] = \frac{4m}{N_s} \mu_0 I N_{tpp}^2 \left[\lambda_s + \lambda_{ew} + \lambda_{sd} \right] \quad (8)$$

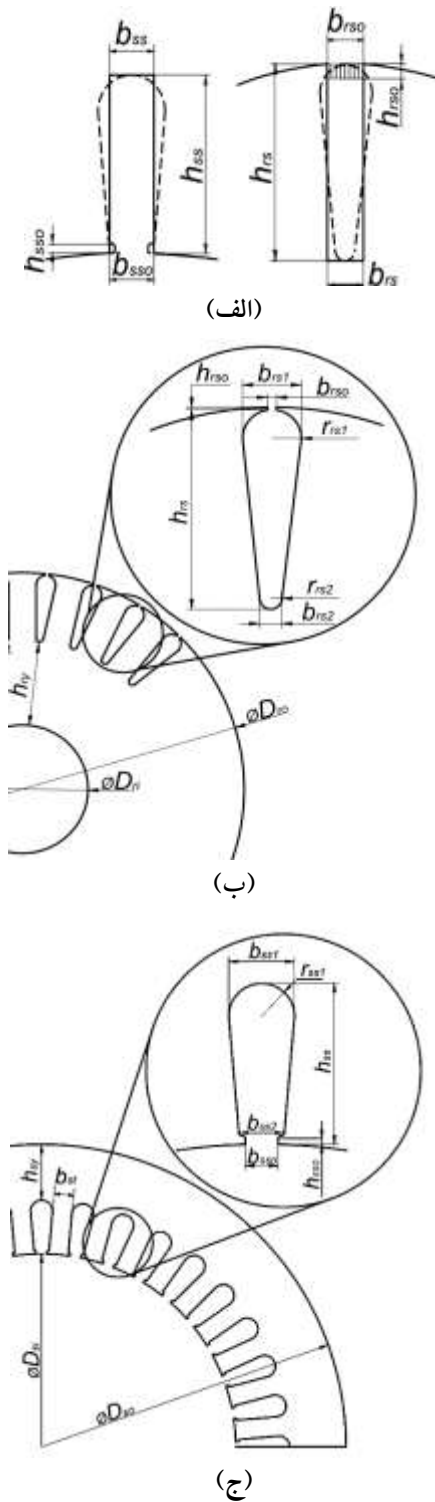
برای طراحی الکترومغناطیسی، مدار معادل و تحلیل عملکرد موتور القایی، نیاز به تحلیل تئوری مدل آن می‌باشد. در این مقاله، برای دستیابی به یک مدل درست از موتور القایی، مجموعه‌ای از معادلات تحلیلی که از منابع مختلف گردآوری شده‌اند، استفاده شده است. طراحی مغناطیسی مبتنی بر منحنی مغناطیس‌کنندگی و تحلیل‌های مدار مغناطیسی است، از طرفی مدار معادل نیازمند مفهوم هندسی است [۲۹-۳۱].

در میان مطالعات پیشین، اطلاعات زیادی در مورد نحوه محاسبه پارامترها برای یک مدار معادل بیان شده است. مجموعه کاملی از معادلات مورد نیاز برای محاسبه مدار معادل موتور القایی به‌صورت کامل در این مقاله آورده شده است. در مرجع [۳۲]، روشی برای طراحی تحلیلی اولیه موتور القایی به روش الکترومغناطیسی ارائه شده است. با این حال، برای دستیابی به طراحی دقیق موتور القایی، نیاز به دخل و تصرف در این معادلات و افزودن معادلات بیشتر می‌باشد. به همین منظور، در روابط و معادلات مربوط به مدار معادل موتور القایی تغییراتی برای مدل‌سازی دقیق‌تر انجام شده است.

در طراحی بهینه موتور القایی مهم است که ابعاد هندسی با دقت انتخاب شوند، تا قابلیت تطابق‌پذیری هندسی و عدم اشباع در طراحی، در یک فرایند طراحی بهینه تکراری را تضمین کند. همچنین اشباع مغناطیسی صفحات بایستی به‌عنوان بخشی از مدل، از طریق قیود متغیرهای بهینه‌سازی و محاسبات دینامیکی شامل منحنی‌های اشباع، کنترل شوند [۲۹]. بنابراین مدار مغناطیسی و فاکتورهای اشباع بایستی در مدل تحلیلی در ناحیه‌ی جستجو برای هر المان محاسبه شوند. علاوه بر شکل واقعی شکاف، بایستی اثر پوستی در میله روتور نیز مورد توجه قرار گیرد. در بخش‌های بعدی نحوه محاسبه و تعیین پارامترهای مدار معادل موتور القایی تشریح شده است.

۲.۲. مقاومت‌های روتور و استاتور

مقاومت سیم‌پیچی استاتور در معادله (۱) آورده شده است. محور داخلی و طول بخش سیم‌پیچ انتهایی کلاف l_{tw} در نظر گرفته شده‌اند. محاسبات بخش سیم‌پیچ نهایی وابسته به تعداد قطب‌ها، گام قطب و نوع سیم‌پیچی است. به‌علاوه، فاکتورهای تجربی جهت تثبیت مقدار مقاومت به کار برده شده‌اند، که این فاکتورها به روش‌های مختلفی انتخاب می‌شوند.



شکل (۱): (الف) شکل واقعی شکاف روتور و استاتور، (ب) شکل هندسی روتور، (ج) شکل هندسی استاتور.

۴.۲. اثر پوستی و ارجاع پارامترها از روتور به استاتور

اثر پوستی، مقاومت معادل میله روتور را افزایش و راکتانس ناشی معادل میله را کاهش می‌دهد. یک الگوریتم برای محاسبه ضریب تصحیح برای شکل‌های هندسی متداول شکاف روتور در مرجع [۳۰]

$$L_{rl} = \mu_0 l [\lambda_b + \lambda_{er} + \lambda_{rd}] \quad (9)$$

اندوکتانس ناشی شکاف، به‌طور قابل توجهی وابسته به شکل هندسی و به میزان کمتر، وابسته به یوغ و اشباع دندانه [۳۳] و پراکندگی چگالی جریان در شکاف می‌باشد [۳]. بنابراین، اگر برای محاسبه اندوکتانس ناشی دقت بالایی مورد نیاز باشد، بایستی شکل واقعی شکاف روتور و استاتور شکل (۱)، استفاده شود. همچنین تأثیر گشودگی شکاف نیز در روتور و استاتور در نظر گرفته شود. در طراحی‌های بهینه موتور القایی قفس‌سنجایی در مطالعات پیشین، یک تقریب مستطیلی برای شکاف روتور و استاتور استفاده شده است [۷، ۹، ۱۱].

$$L_{ssl,ew1,s1} = \mu_0 N_{tc}^2 l \lambda_{s,ew,sd} \quad (10)$$

در روتور L_{rl} از حاصل جمع L_{erl} ، L_{bl} و L_{rdl} به دست می‌آید.

$$L_{bl,rd1} = \mu_0 l \lambda_{b,rd} \quad (11)$$

$$L_{er1} = \mu_0 l \lambda_{er} 2 \sin\left(\frac{P\pi}{N_r}\right)^2 \quad (12)$$

معادلات و تقریب‌های مختلفی برای محاسبه پارامترهای ویژه هندسی، برای هندسه‌های شکاف $(\lambda_{s,b})$ در مراجع [۳، ۲۹، ۳۳] ارائه شده است. در این کار، دقت محاسبات تلفات متأثر از مقدار اندوکتانس ناشی شکاف (به‌ویژه اندوکتانس میله شکاف روتور) است. بنابراین، هندسه واقعی مورد توجه قرار گیرد. فلوی ناشی حلقه انتهایی^۱ و سیم‌پیچ انتهایی^۲ از تمام جریان‌هایی که از آن‌ها می‌گذرد نتیجه می‌شود. تحلیل هندسه واقعی سیم‌پیچ انتهایی و حلقه انتهایی معمولاً دشوار است،

بنابراین، تعیین قطعی اندوکتانس ناشی حلقه انتهایی و سیم‌پیچ انتهایی نیازمند راه‌حل عددی سه‌بعدی است [۳۳]. به‌هرحال، برخی نویسندگان معادلات تحلیلی را برای تخمین ناشی‌های حلقه انتهایی و سیم‌پیچ انتهایی برای هر هندسه خاص $(\lambda_{ew,er})$ ارائه داده‌اند.

معادلات مورد استفاده برای محاسبه حلقه‌های انتهایی و سیم‌پیچ انتهایی در این مقاله، از مرجع [۳] به دست آمده‌اند، با وجود این برخی نویسندگان معادلات دیگری را ارائه داده‌اند [۲۹، ۳۳]. جریان‌های استاتور و روتور می‌توانند هارمونیک‌های چگالی شار را در فاصله هوایی تولید کنند و این هارمونیک‌ها، فلوی ناشی تولید خواهند کرد. این پدیده را می‌توان با اندوکتانس دیفرانسیلی روتور و استاتور مدل کرد.

1. End-Ring
2. End-Winding

برای محاسبه F_m بایستی چگالی فلو B و دامنه فلو (H) از روی منحنی مغناطیسی به دست آید. برای محاسبه B ، از معادلات مراجع [۲۳، ۲] استفاده شده است. جریان مغناطیس‌کنندگی، فاکتور اشباع دندانه‌ها (K_{st}) و فاکتور اشباع کلی یوغ‌ها (K_{sy}) و فاکتور اشباع کل (K_s) با استفاده از نیروی مغناطیس‌کنندگی F_m قابل محاسبه هستند. جریان مغناطیس‌کنندگی با معادله (۱۹) و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی با معادله (۲۰) محاسبه می‌شوند.

$$I_m = \frac{\pi p F_m}{2 \sqrt{2} \times N_{ipp} \times K_w} \quad (19)$$

$$L_m = (\sqrt{(V_n / (\sqrt{3} \times I_m))^2 - R_s^2} - X_{st}) / \omega \quad (20)$$

مشخص شد که محاسبات فاکتورهای اشباع و I_m بایستی به صورت دینامیکی به‌عنوان بخشی از مدل تحلیلی در هر تکرار فرآیند بهینه‌سازی مورد توجه قرار گیرند. این بدین معنی است که منحنی مغناطیسی (B/H) مواد مغناطیسی بایستی بخشی از مدل باشد و به‌عنوان روش‌های بهینه‌سازی برای دستیابی به فضای جستجو مورد ارزیابی قرار گیرد.

۶.۲. محاسبه راندمان و عملکرد موتور

راندمان به صورت توان خروجی بر توان ورودی، تعریف می‌شود. توان تلف‌شده در این مقاله، به این صورت تعریف شده است:

$$P_{loss} = P_{sw} + P_i + P_r \quad (21)$$

گرچه در مدار معادل، تلفات مکانیکی و تلفات سرگردان بار، لحاظ نشده‌اند، اما از طریق فاکتورهای تجربی یا توصیه‌های استانداردها قابل محاسبه هستند. معادلات (۲۲) الی (۲۵) برای محاسبه جریان، ضریب توان، توان ورودی و تلفات از روی مدار معادل استفاده می‌شوند. جریان نامی برابر است با:

$$I_n = V_n / (\sqrt{3} Z_{eq}) \quad (22)$$

که در آن Z_{eq} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{eq} = R_s + iX_{st} + \frac{(R_r' + R_c' + iX_r') \cdot ((R_m + iX_m) / (R_m + iX_m))}{(R_r' + R_c' + iX_r') + ((R_m + iX_m) / (R_m + iX_m))} \quad (23)$$

توان ورودی برابر است با:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_n I_n \cos \phi \quad (24)$$

تلفات اهمی سیم‌پیچ استاتور برابر است با:

$$P_{sw} = 3 I_n^2 R_s \quad (25)$$

ارائه شده است. بنابراین، در صورتی که هدف، مدل‌سازی جریان باشد محاسبات اثر پوستی با در نظر گرفتن تقریبی مستطیلی برای شکل شکاف روتور با معادلات (۱۳) الی (۱۵) انجام می‌شود، که نتایج خوبی را برای موتورهای توان متوسط و توان پایین داشته است.

$$K_r = \xi \frac{(\sinh 2\xi + \sin \xi)}{(\cosh 2\xi - \cos 2\xi)} = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \quad (13)$$

$$K_L = \frac{3}{2\xi} \frac{(\sinh 2\xi + \sin 2\xi)}{(\cosh 2\xi - \cos 2\xi)} = \frac{(L_{st})_{ac}}{(L_{st})_{dc}} \quad (14)$$

$$\xi = h_{rs} \sqrt{\frac{s\pi f \mu_0 h_{rs2}}{\rho_{al} b_{rso}}} \quad (15)$$

جهت تعیین مدار معادل لازم است که پارامترهای روتور به استاتور ارجاع داده شود. مقاومت با استفاده از معادله (۱۶) و راکتانس با معادله (۱۷) ارجاع داده می‌شوند [۳۰].

$$R_r' = R_r \frac{2mK_w^2 N_{ipp}^2}{N_r} \quad (16)$$

$$L_r' = L_{rl} \frac{4mK_w^2 N_{ipp}^2}{N_r} \quad (17)$$

۵.۲. طراحی مدار مغناطیسی

طراحی مدار مغناطیسی^۱ بر اساس بررسی نیروی میدان مغناطیسی و چگالی فلو در بخش‌های مختلف ماشین می‌باشد. در مرجع [۳۲]، روشی برای تعیین اندازه نیروی الکترومغناطیسی اولیه ماشین ارائه شده است. با این وجود، دسته معادلات با معادلات دیگری که در این بخش ارائه شده است، تکمیل می‌شوند. توجه به این نکته مهم است که فاکتور کارتر^۲ بایستی در طراحی مغناطیسی موتور برای به دست آوردن یک طراحی صنعتی اعمال شده باشد، اگرچه در مدل‌های تحلیلی در کارهای گذشته که طراحی موتور را بهینه می‌کنند، استفاده نشده است. با استفاده از فاکتور کارتر، اثر گشودگی شکاف را می‌توان لحاظ کرد. برای محاسبه این فاکتور، معادلاتی در مرجع [۲۷] ارائه شده‌اند، که در این مقاله نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. B_{ag} بایستی به‌عنوان پارامتر ورودی انتخاب شود. مقادیر مختلف این پارامتر بر اساس توان موتور و تعداد قطب‌ها در مراجع [۳۳، ۳] داده شده است. در روش پیشنهادی طراحی بهینه این مقادیر به دست آمده و مقدار بهینه B_{ag} برای طراحی انتخاب شده است. نیرو محرکه مغناطیسی مغناطیس‌کنندگی F_m به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_m = \frac{2K_c l_{ag} B_{ag}}{\mu_0} + 2F_{st} + 2F_{rt} + F_{sy} + F_{ry} \quad (18)$$

1. Design of magnetic circuit
2. Carter's

۱.۳. توابع هدف

در این مقاله، دو تابع هدف تعریف شده است. تابع $f_1(x)$ برابر با منفی راندمان موتور و تابع $f_2(x)$ هزینه بخش‌های فعال است.

$$f_1(x) = -\eta \quad (28)$$

$$f_2(x) = C_{cu}(M_{cu}) + C_{al}(M_{al}) + C_{fe}(M_{sty} + M_{sit} + M_{riy} + M_{rit} + M_{rib}) \quad (29)$$

در این مسئله بهینه‌سازی، راندمان موتور به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\eta = (P_{in} - P_{loss}) / P_{in} \quad (30)$$

برای محاسبه η ، P_{in} و P_{loss} از مدار معادل استفاده شده است. هزینه‌ی بخش‌های اکتیو موتور با توجه به هندسه واقعی نشان داده شده در شکل (۱) محاسبه شده است.

۱.۱.۳. محاسبه جرم فلز مس

برای محاسبه جرم مس از رابطه زیر استفاده شده است:

$$M_{cu} = 3d_{cu}(N_{pp}l_{tw})(S_{cu}) \quad (31)$$

که S_{cu} و l_{tw} به‌عنوان بخشی از مدل ریاضی محاسبه شده‌اند. محاسبه S_{cu} بستگی به مقطع سیم و تعداد سیم‌هایی دارد که در هر کلاف به صورت موازی به هم متصل هستند [۳۴].

۲.۱.۳. محاسبه جرم فلز آلومینیوم

نحوه محاسبه جرم آلومینیوم به صورت زیر می‌باشد:

$$M_b = d_{al}N_rIS_b$$

$$M_{er} = \frac{\pi}{2}d_{al}t_{er}(D_{ero}^2 - D_{eri}^2) \quad (32)$$

$$M_{al} = M_b + M_{er}$$

که در آن:

$$S_b = \frac{(\pi/4)(b_{rs1}^2 + b_{rs2}^2)}{2} + \frac{(b_{rs1} + b_{rs2})}{2} \quad (33)$$

$$(h_{rs} - \frac{b_{rs1}}{2} - \frac{b_{rs2}}{2})$$

جهت حفظ دقت مطلوب در مدل تحلیلی در طول فرایند بهینه‌سازی، بایستی ابعاد حلقه انتهایی به‌عنوان بخشی از طراحی، مورد توجه قرار گیرند. بنابراین، ابعاد حلقه انتهایی در هر نوع موتور مدل شده، متناسب با سطح مقطع عرضی میله موتور می‌باشد [۳۴].

تلفات هسته با معادله (۲۶) توصیف می‌شود. اطلاعات مربوط به آهن جهت محاسبه تلفات هیستریزس (P_h) و جریان‌های فوکو (P_e) لازم هستند. این مقادیر توسط تولیدکننده آهن برای فرکانس مشخص و فلوی مغناطیسی مشخص داده می‌شود. در معادله (۲۶) مقادیر بایستی برای ۶۰ هرتز و ۱/۵ تسلا محاسبه شوند.

$$P_i = P_h \left(\frac{f}{60}\right)^{1.3} \left(\left(\frac{B_{st}}{1.5}\right)^{1.7} M_{sit} + \left(\frac{B_{sy}}{1.5}\right)^{1.7} M_{sly}\right) + \quad (26)$$

$$P_e \left(\frac{f}{60}\right)^2 \left(\left(\frac{B_{st}}{1.5}\right)^2 M_{sit} + \left(\frac{B_{sy}}{1.5}\right)^2 M_{sly}\right)$$

تلفات اهمی روتور برابر است با:

$$P_r = 3R_r'(0.8 \cos \phi + 0.15)^2 I_n^2 \quad (27)$$

با محاسبه تلفات، راندمان موتور قابل محاسبه است. مشخصه‌های دیگر عملکرد برای مثال گشتاور نامی که بخشی از قیود بهینه‌سازی است، از مدار معادل محاسبه می‌شوند. این معادلات در مراجع [۳، ۳۳] ارائه شده‌اند.

۳. طراحی بهینه موتور القایی قفس سنجابی

در این مقاله، برای طراحی بهینه موتور القایی قفس سنجابی یک مسئله بهینه‌سازی و دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این مسئله بهینه‌سازی، نه متغیر $x = [x_1, x_2, \dots, x_9]^T$ بهینه‌سازی، انتخاب شده‌اند. این متغیرها شامل:

- چگالی شار فاصله هوایی متوسط ($x_1 = B_{ag}$)
- طول پشته‌سازی ($x_2 = l$)
- طول فاصله هوایی ($x_3 = l_{ag}$)
- قطر شکاف استاتور ($x_4 = D_{si}$)
- ارتفاع شکاف استاتور ($x_5 = h_{ss}$)
- پهنای بالایی شکاف استاتور ($x_6 = b_{ss1}$)
- ارتفاع شکاف روتور ($x_7 = h_{rs}$)
- پهنای بالایی شکاف روتور ($x_8 = b_{rs1}$)
- پهنای پایینی شکاف روتور ($x_8 = b_{rs2}$)

پارامترهای دیگر می‌توانند به صورت عباراتی برحسب این متغیرها بیان شوند. در ادامه، توابع هدف و قیود مربوط به این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه بیان می‌شود [۳۴].

1. Hysteresis loss
2. Eddy current

۳.۱.۳. محاسبه جرم فلز آهن

$$g_4 = \frac{(V_n / \sqrt{3})}{I_n \sqrt{((R_s + R_r')^2 + (X_{sl} + X_{rl}')^2)}} \quad (45)$$

$$g_5 = \frac{3R_r'(g_4 \times I_n)^2}{wT_n} \quad (46)$$

$$g_6 = \cos \phi \quad (47)$$

$$g_7 = I_n \quad (48)$$

که:

$$S = P_t / (P_{in} - P_{sw} - P_i)$$

$$T_n = P_{out} / (2 \times \pi \times \frac{f}{p} \times (1-s)) \quad (49)$$

$$C_m = 1 + X_{sl} / X_m$$

P_i و P_{sw} به عنوان بخشی از مدل ریاضی که در بخش قبلی توضیح داده شد، محاسبه شده است. ناحیه مناسب از پاسخ‌هایی که نامساوی‌های (۵۰) را برآورده سازد، به دست می‌آید.

$$g_i - A_i \leq 0, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (50)$$

A_i ها حدود قیود هستند. A_1 که بیشینه تُلرانس^۱ مکانیکی مفید است که مربوط به محدودیت‌های مهندسی است. برای مثال، همان‌گونه که ارتباط ابعاد شعاعی با g_1 تضمین می‌شوند، تُلرانس مکانیکی مربوط به ماشین‌های مولد با A_1 لحاظ می‌شود. این تُلرانس توسط سازنده داده می‌شود. برای A_i برای $i = 1, 2, \dots, 7$ به وسیله حدودی که توسط استانداردهای بین‌المللی تعیین می‌شوند به دست می‌آیند. حدود بالا و پایین متغیرها نیز جزو قیود هستند. این محدودیت‌ها، بایستی بر اساس محدودیت‌های مهندسی مربوط به تجهیزات و رویه تولیدکننده انتخاب شوند.

۳.۲.۳. تصمیم‌گیری فازی

هدف نهایی یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، شناسایی حل در مجموعه بهینه جبهه پارتو^۲ است. باین‌حال، شناسایی کل مجموعه پارتو بهینه با توجه به ابعاد وسیع آن برای اثبات بهینه بودن پاسخ غیرممکن است و از این رو توصیه نمی‌شود. بنابراین، رویکردی عملی برای مسئله بهینه‌سازی چندگانه، برای بررسی مجموعه پاسخ‌های موجود که مجموعه بهینه پارتو در آن امکان‌پذیر است، وجود دارد. در این مقاله، یک رویکرد مبتنی بر فازی برای انتخاب بهترین پاسخ مصالحه مجموعه پارتو اعمال می‌شود. تابع هدف Z_m از یک پاسخ در

جرم آهن با استفاده از معادلات (۳۷) تا (۴۱) محاسبه می‌شود. این جرم‌ها وابسته به شکل هندسی ورقه آهن هسته بوده و بایستی در فرآیند بهینه‌سازی برای هر شکل هندسی موتور محاسبه شود.

$$M_{sly} = \pi d_i l h_{sy} (D_{si} + 2h_{ss} + h_{sy}) \quad (37)$$

$$M_{sit} = d_i l (\pi h_{ss} (D_{si} + h_{ss}) N_s (\frac{\pi}{2} \times b_{ss1}^2 + \frac{(b_{ss1} + b_{ss2})(h_{ss} - r_{ss1} - r_{ss2a} - r_{ss2b} - h_{sso})}{2} + b_{ss2} r_{ss2a} + b_{sso} r_{ss2b} + b_{sso} h_{sso})) \quad (38)$$

$$M_{riy} = \pi d_i l h_{ry} (D_{ro} - 2h_{rso} - 2h_{rs} - h_{ry}) \quad (39)$$

$$M_{rib} = d_i l (\pi h_{rs} (D_{ro} - 2h_{rso} - h_{rs}) - N_r (\frac{\pi}{2} (b_{rs1}^2 + b_{rs2}^2) + \frac{(b_{rs1} + b_{rs2})(h_{rs} - \frac{b_{rs1}}{2} - \frac{b_{rs2}}{2})}{2})) \quad (40)$$

$$M_{ritt} = \pi d_i l h_{ros} (D_{ro} - h_{rso}) \quad (41)$$

۲.۲.۳. توابع هدف

در این مسئله بهینه‌سازی، هفت قید در نظر گرفته شده است، که به ترتیب عبارت‌اند از:

- مجموع ابعاد شعاعی منهای ماکزیمم قطر خارجی استاتور (g_1)
- مینیمم راندمان (g_2)
- نسبت گشتاور شکست (g_3)
- نسبت جریان روتور قفل (g_4)
- نسبت گشتاور روتور قفل (g_5)
- ضریب توان (g_6)
- ماکزیمم جریان نامی (g_7)

این قیود بر اساس محدودیت‌های عملیاتی طراحی موتور در استانداردهای NEMA MG1 و IEC-33 انتخاب شده‌اند. به‌هرحال، اولین قید شامل مکانیزمی است که یکپارچگی هندسی طراحی را تضمین می‌کند. توابع قیدی به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$g_1 = |(D_{so} - D_{ri}) - 2(h_{ry} + h_{rs} + h_{rso} + l_{ag} + h_{ss} + h_{sy})| \quad (42)$$

$$g_2 = \eta \quad (43)$$

$$g_3 = \frac{3p}{2wT_n} \frac{(V_n / \sqrt{3})^2}{R_s + \sqrt{(R_s^2 + (X_{sl} + X_{rl}')^2)}} \quad (44)$$

1. Telorance
2. Pareto Front

یک مجموعه f_j پارتو که توسط یک تابع عضویت J تعریف شده است به صورت زیر است:

$$\mu_j = \begin{cases} 1 & f_j \leq f_j^{\min} \\ \frac{f_j^{\max} - f_j}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} & f_j^{\min} \leq f_j \leq f_j^{\max} \\ 0 & f_j \geq f_j^{\max} \end{cases} \quad (51)$$

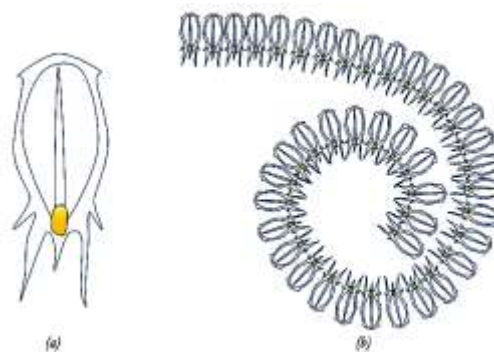
که در آن f_{\max_j} و f_{\min_j} حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف J هستند. برای هر حل d ، تابع عضویت μ_i به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j^i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \mu_j^i} \quad (52)$$

که در آن n تعداد توابع هدف و m تعداد حل است. حل دارای حداکثر مقدار μ_i بهترین حل مصالحه است [۳۵].

۴. الگوریتم چندهدفه اجتماع سالپ (MSSA)

الگوریتم بهینه سازی اجتماع سالپ، برای اولین بار توسط میر جلیلی و همکاران، با توجه به رفتار اجتماعی سالپ ها ارائه شده است [۲۵]. سالپ ها متعلق به خانواده ای از سالیپدها^۱ هستند که بدن شفاف و لوله ای شکل دارند. بافت بدن آن ها بسیار مشابه زله ماهی است و بسیار شبیه زله ماهی حرکت می کنند، به این صورت که آب از طریق بدن آن پمپ می شود تا نیروی رانش به سمت جلو فراهم شود. شکل سالپ را می توان در شکل (۲) دید.



شکل (۲): (a) سالپ منفرد، (b) گروهی از سالپ ها (زنجیره سالپ).

در مدل سازی الگوریتم اجتماع سالپ، از رفتار اجتماعی و زنجیروار آن ها برای جنبش و حرکت بهتر با استفاده از تغییرات سریع هماهنگ در تعقیب غذا بهره گرفته شده است. برای مدل سازی ریاضی زنجیره های سالپ، ابتدا جمعیت به دو گروه شامل رهبر^۲ و پیروان^۳ تقسیم می شود.

1. Salpidae
2. Leader
3. Followers

رهبر گروه، همان سالپ جلوی زنجیره است، و سایر سالپ ها به عنوان پیرو در نظر گرفته می شوند. همان طور که از نام این سالپ ها هم مشخص است، رهبر در واقع گروه را هدایت و رهبری می کند و پیروان از همدیگر (و به طور مستقیم یا غیرمستقیم از رهبر) پیروی می کنند. مشابه سایر روش های جمعی، موقعیت سالپ ها در یک فضای جستجوی n بعدی تعریف می شود که در آن n تعداد متغیرهای یک مسأله مشخص است. بنابراین، موقعیت همه سالپ ها در یک ماتریس دو بعدی موسوم به X ذخیره می شود. همچنین فرض می شود که یک منبع غذایی موسوم به F در فضای جستجو به عنوان هدف جمع وجود دارد.

برای به روزرسانی موقعیت رهبر، معادله ذیل به کار می رود:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j) & c_3 \geq 0 \\ F_j - c_1((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j) & c_3 \leq 0 \end{cases} \quad (53)$$

که x_j^1 نشان دهنده موقعیت اولین سالپ (رهبر) در بعد J ام است، F_j موقعیت منبع غذایی در بعد J ام بوده، ub_j نشان دهنده کران بالای بعد J ام است، lb_j نشان دهنده کران پایین بعد J ام بوده، c_1 ، c_2 و c_3 اعداد تصادفی هستند.

معادله (۶۱)، نشان می دهد که رهبر فقط موقعیت خود را نسبت به منبع غذایی به روزرسانی می کند. ضریب c_1 ، مهم ترین پارامتر در الگوریتم SSA است، چون کشف و به کارگیری تعریف شده به صورت زیر را متعادل می کند:

$$c_1 = 2e^{-\frac{4l}{L}} \quad (54)$$

که l تکرار کنونی بوده و L حداکثر تعداد تکرارها است. پارامترهای c_2 و c_3 اعداد تصادفی هستند که به صورت یکنواخت در بازه $[0, 1]$ تولید می شوند. در واقع، این ها نشان می دهند که آیا موقعیت بعدی در بعد J ام باید به سمت بی نهایت مثبت یا بی نهایت منفی باشد و نیز اندازه گام را مشخص می کنند. برای به روزرسانی موقعیت پیروان، معادلات ذیل به کار گرفته می شوند (قانون حرکت نیوتن):

$$x_j^i = \frac{1}{2}at^2 + v_0t \quad (55)$$

که x_j^i نشان دهنده موقعیت سالپ پیرو i ام در بعد J ام، t زمان،

$$v_0$$
 سرعت اولیه، و $a = \frac{v_{final}}{v_0}$ است که در آن $v = \frac{x - x_0}{t}$.

چون زمان در بهینه سازی همان تکرار است، اختلاف میان تکرارها برابر ۱ است، و با در نظر گرفتن $v_0 = 0$ این معادله را می توان بدین صورت نوشت:

یافتن پاسخ‌های بهینه پارتوی با توزیع یکنواخت باشد، بهترین نامزد برای حذف شدن از آرشیو، نامزدی است که در یک ناحیهٔ پرجمعیت قرار دارد. این روش، موجب بهبود توزیع ساکنان آرشیو در طی تکرارها می‌شود. برای یافتن پاسخ‌های غیر مغلوب با همسایگی پرجمعیت، تعداد پاسخ‌های همسایگی با یک حداکثر مسافت خاص شمرده شده و مفروض می‌گردد.

این مسافت به صورت اختلاف دو بردار بیشینه و کمینه برحسب تعداد کل تعریف می‌شود که مقادیر دو بردار برای ذخیره‌سازی مقادیر بیشینه و کمینه هر هدف هستند. مخزن دارای یک پاسخ در هر بخش بهترین حالت است. پس از تخصیص یک مرتبه به هر ساکن مخزن بر اساس تعداد پاسخ‌های همسایگی، یک چرخ رولت برای انتخاب یکی از آن‌ها به کار می‌رود. هر چه تعداد پاسخ‌های همسایگی برای یک پاسخ بیشتر باشد (یعنی شمارهٔ رتبهٔ بزرگ‌تر)، احتمال بیشتری دارد که از مخزن حذف شود [۲۵].

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به شبیه‌سازی و طراحی بهینه موتور القایی قفس سنجابی پرداخته شده است. برای طراحی بهینه، دو تابع هدف اشاره‌شده در بخش‌های قبل در نظر گرفته شده‌اند. برای بهینه‌سازی نیز از الگوریتم‌های NSGA-II، MOPSO و MSSA به صورت تک‌هدفه و دوهدفه استفاده شده است. پارامترهای مربوط به الگوریتم‌ها در جدول (۱) آورده شده است. در این مقاله، یک موتور القایی ۲/۵ کیلو وات جهت طراحی بهینه در نظر گرفته شده است. برای طراحی این موتور با روش پیشنهادی، سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است که به ترتیب عبارتند از:

- طراحی موتور القایی با هدف افزایش راندمان (تک‌هدفه)
- طراحی موتور القایی با هدف کاهش هزینه (تک‌هدفه)
- طراحی موتور القایی به صورت چندهدفه

جدول (۱): پارامترهای مربوط به الگوریتم‌ها.

پارامتر	NAGA-II	MOPSO	MSSA
تکرار	۵۰	۵۰	۵۰
جمعیت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
$c1, c2$	--	۲	--
a	--	--	۲
P_{cross}	۰/۷	--	--
P_{mu}	۰/۴	--	--
mu	۰/۰۲	--	--

$$x_j^i = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1}) \quad (56)$$

که $x_j^i, i \geq 2$ نشان‌دهندهٔ موقعیت سالپ پیرو i ام در بعد j ام است. برای حل پاسخ یک مسئلهٔ چندهدفه، یک مجموعه از پاسخ‌ها موسوم به مجموعه بهینهٔ پارتو^۱ است. الگوریتم SSA قادر است سالپ‌ها را به سمت منبع غذا حرکت داده و آن‌ها را در طی تکرارها به‌روزرسانی کند [۲۵]. با این حال، این الگوریتم بنا به دو دلیل ذیل، قادر به حل مسائل چندهدفه نیست:

- ۱) الگوریتم SSA، فقط یک پاسخ را به‌عنوان بهترین پاسخ ذخیره می‌کند، بنابراین نمی‌تواند چند پاسخ را به‌عنوان بهترین پاسخ‌ها برای یک مسئلهٔ چندهدفه ذخیره کند.
- ۲) الگوریتم SSA، منبع غذایی با بهترین پاسخ به‌دست‌آمده تاکنون، در هر تکرار را به‌روزرسانی می‌کند اما پاسخ منفرد مناسبی برای مسائل چندهدفه وجود ندارد.

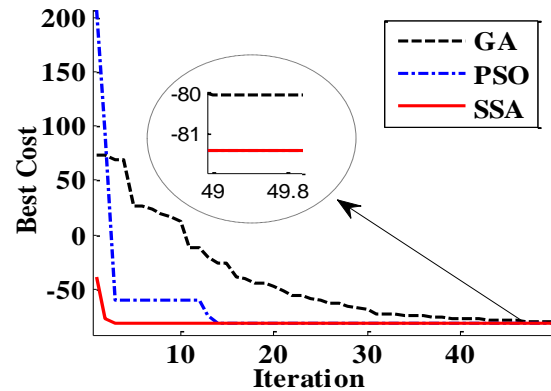
مورد اول را می‌توان از طریق مجهز کردن الگوریتم SSA به مخزن منابع غذایی حل کرد. این مخزن بهترین پاسخ‌های غیر مغلوب به‌دست‌آمده تاکنون را، در طی بهینه‌سازی حفظ می‌کند و بسیار مشابه آرشیوهای بهینه‌سازی تجمع ذرات چندهدفه (MOPSO) است. این مخزن دارای اندازهٔ بیشینه است تا تعداد محدودی پاسخ غیر مغلوب را در خود ذخیره کند. در طی بهینه‌سازی، با استفاده از عملگرهای غالب پارتو، هر سالپ با همهٔ ساکنان مخزن مقایسه می‌شود. اگر یک سالپ نسبت به یک پاسخ موجود در مخزن غالب و حاکم باشد، آنگاه با هم تعویض می‌شوند. اگر یک سالپ بر یک مجموعه از پاسخ‌های موجود در مخزن غالب باشد، آن‌ها همگی باید از مخزن حذف شده و سالپ به مخزن افزوده شود. اگر حداقل یکی از ساکنان مخزن بر یک سالپ در جمعیت جدید غالب باشد، آنگاه باید سریعاً رها شود. اگر یک سالپ در مقایسه با همهٔ ساکنان مخزن غالب نباشد، آنگاه باید به آرشیو افزوده شود. این نتایج می‌توانند تضمین کنند که مخزن همواره پاسخ‌های غیر مغلوب به‌دست‌آمده تاکنون توسط الگوریتم را ذخیره می‌کند. با این حال، یک حالت خاص وجود دارد که در آن مخزن کاملاً پر می‌شود و یک سالپ در مقایسه با ساکنان مخزن غالب نیست.

البته ساده‌ترین راه این است که یکی از پاسخ‌های آرشیو به صورت تصادفی حذف شده و با یک سالپ غیر مغلوب جایگزین شود. یک شیوهٔ معقول‌تر این است که یکی از پاسخ‌های مشابه غیر مغلوب در مخزن حذف شود. چون یک الگوریتم چندهدفهٔ قیاسی باید قادر به

1. Pareto Optimal Set

۱.۵. طراحی موتور القایی با هدف افزایش راندمان

ابتدا طراحی موتور با در نظر گرفتن تابع هدف به صورت تک‌هدفه یعنی افزایش راندمان انجام شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های GA، PSO و SSA در جدول (۲) آورده شده است. همچنین در شکل (۳) منحنی همگرایی مربوط به سه الگوریتم نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳) می‌توان گفت که الگوریتم SSA دارای سرعت همگرایی بالایی نسبت به دو الگوریتم دیگر است.



شکل (۳): منحنی همگرایی تابع هدف افزایش راندمان.

جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی تابع هدف افزایش راندمان.

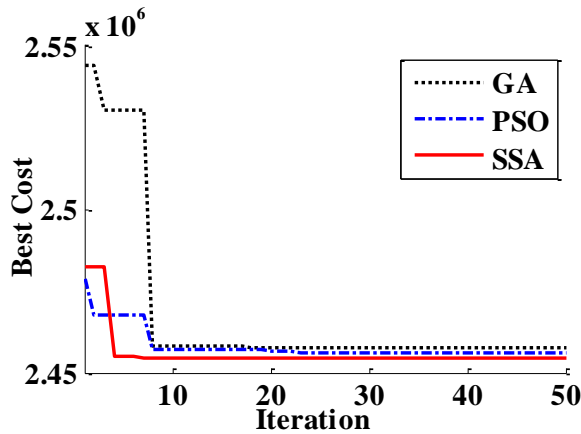
پارامتر	GA	PSO	SSA
B_{ag}	۰/۱	۰/۱	۰/۱
l	۵/۰۳۹۸	۵/۰۰۰۰	۵/۰۰۰۰
l_{ag}	۰/۰۲۹	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰
D_{si}	۵/۰۳۲۹	۵/۰۰۰۰	۵/۰۰۰۰
h_{ss}	۵/۰۰۶۶	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
b_{ss1}	۰/۲۱۲۲۹	۰/۲۰۰۰۰	۰/۲۰۰۰۰
h_{rs}	۱/۶۸۱۶	۱/۲۵۱۷	۱/۰۰۰۰
b_{rs1}	۰/۷۵۰۷۹	۰/۱۶۰۷۲	۱/۰۰۰۰۰
b_{rs2}	۰/۱۰۴۲	۰/۰۱۰۰	۰/۰۱۰۰
راندمان (%)	۸۰/۰۴۳۹	۸۱/۳۹۰۲	۸۱/۳۹۸۳
هزینه (ریال)	۲۵۳۰۲۱۵	۲۵۷۱۹۸۵	۲۵۳۰۱۰۷

با توجه به نتایج جدول (۲)، الگوریتم SSA بیشترین مقدار راندمان را دارد. و این مقدار راندمان نشان‌دهنده این است که پارامترهای موتور القایی به خوبی تعیین شده‌اند. و جواب الگوریتم SSA در حل این مسئله بهینه‌سازی دقیق‌تر از دو الگوریتم دیگر است

۲.۵. طراحی موتور القایی با هدف کاهش هزینه

در این بخش تابع هدف برای طراحی بهینه کاهش هزینه در نظر

گرفته شده است، تا به ازای هزینه کم، موتور القایی طراحی شود و تاثیر هزینه بر راندمان بررسی شود. نتایج حاصل از بهینه‌سازی در جدول (۳) آورده شده است. منحنی همگرایی سه الگوریتم نیز در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): منحنی همگرایی تابع هدف کاهش هزینه.

جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی تابع هدف کاهش هزینه.

پارامتر	GA	PSO	SSA
B_{ag}	۰/۰۹۸۵	۰/۰۹۹۰	۰/۱۰۰۰
l	۵	۵	۵
l_{ag}	۰/۰۲۸۳۳۶	۰/۰۲۹۹۹۱	۰/۰۳۰۰۰۰
D_{si}	۵	۵	۵
h_{ss}	۱	۱	۱
b_{ss1}	۰/۲	۰/۲	۰/۲
h_{rs}	۲/۵	۲/۵	۲/۵
b_{rs1}	۱	۱	۱
b_{rs2}	۰/۰۳۰۹۳	۰/۰۵۷۲۵	۰/۲۰۰۰۰
راندمان (%)	۷۵/۹۷۱۲	۸۱/۱۱۳۴	۸۱/۳۶۰۱
هزینه (ریال)	۲۴۵۷۶۹۷	۲۴۵۷۲۲۶	۲۴۵۴۵۸۸

همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، الگوریتم SSA همگرایی بالا و دقت در جواب نهایی بالایی دارد. با توجه به جواب‌های بهینه‌سازی الگوریتم SSA به ازای هزینه ۲۵۳۰۱۰۷ ریال، دارای راندمان ۸۱/۳۹۸۳ درصد می‌باشد. که این مقدار نسبت به الگوریتم PSO و GA بیشتر است. البته تاثیر هزینه بر راندمان تقریباً به صورت خطی است.

۳.۵. طراحی موتور القایی به صورت چندهدفه

با توجه به این که در این مقاله دو تابع هدف معرفی شده اند، برای حل این مسئله، از روش چندهدفه نیز استفاده شده است. در این روش از

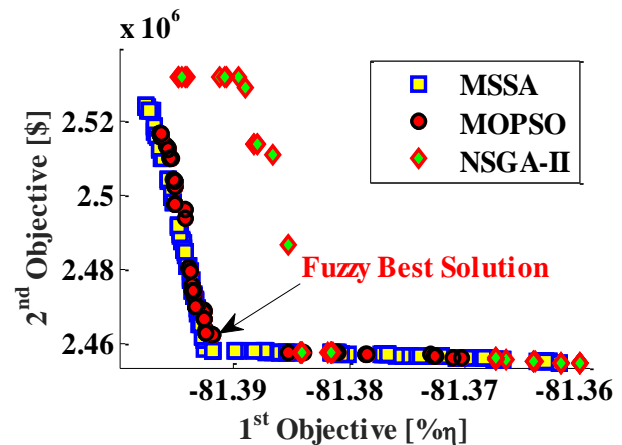
۶. نتیجه گیری

تولیدکنندگان برای طراحی موتورهای الکتریکی، از انواع تکنیک‌ها استفاده می‌کنند. برخی از این تکنیک‌ها مبتنی بر تحلیل‌های تئوری هستند، در حالی که برخی دیگر مبتنی بر تحلیل‌های تجربی هستند. در این مقاله، روشی جدید برای طراحی بهینه‌ی یک موتور القایی قفس‌سنجابی ارائه شده است. در این روش جدید، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه فراابتکاری استفاده شده است. برای طراحی بهینه، ابتدا مدلی تحلیلی از موتور القایی توسط روابط، تشریح شده است. و سپس برای طراحی بهینه از روش مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است. در این مسئله بهینه‌سازی، افزایش راندمان و کاهش هزینه‌ها به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. همچنین اثرات اشباع در دندانه‌ها و یوغ‌ها، محاسبه نفوذ هندسی برای هندسه واقعی، اثر پوستی، و محاسبه مجدد تعداد کلاف و حلقه انتهایی برای هر تکرار و هر ذره در نظر گرفته شده است.

روش پیشنهادی بر روی یک موتور القایی ۲/۵ کیلووات دوقطبی اعمال شده است. از مدار معادل استاندارد برای فرآیند بهینه‌سازی و محاسبه پارامترها استفاده شده است. در حل این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، MOPSO، MSSA با اهداف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن راندمان استفاده شده است. همچنین روش تصمیم‌گیری فازی نیز برای انتخاب جواب بهینه از بین مجموعه جواب‌های پاراتو در نظر گرفته شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی، به صورت تک‌هدفه و چندهدفه نشان‌دهنده کارایی بهتر روش‌های فراابتکاری در طراحی بهینه موتور القایی قفس‌سنجابی به صورت چندهدفه می‌باشد. با توجه به این نتایج، الگوریتم MSSA دارای مجموعه جواب‌های بیشتر و سرعت همگرایی بالایی نسبت به سایر روش‌ها است. با انتخاب جواب بهینه، میزان راندمان موتور القایی با توجه به هزینه آن به صورت مصالحه بین این دو، با روش فازی نشان داد که طراحی بهینه باعث افزایش راندمان با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌ها می‌شود.

الگوریتم‌های چندهدفه NSGA-II، MOPSO و MSSA استفاده شده است. در دو بخش قبلی توابع هدف به صورت تک‌هدفه بهینه‌سازی شده‌اند، در این بخش نیز با استفاده از روش پارتو مجموعه جواب‌های بهینه برای حل مسئله چندهدفه توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دست آمده است. در شکل (۵)، نتایج بهینه‌سازی و جبهه پارتو برای سه الگوریتم نشان داده شده است. علاوه بر این، در شکل (۵) نتیجه تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب جواب بهینه از بین مجموعه جواب‌های بهینه نشان داده شده است. نتایج بهینه‌سازی و انتخاب جواب بهینه به وسیله تصمیم‌گیری فازی از بین مجموعه جواب‌های بهینه در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به نتایج بهینه‌سازی می‌توان گفت که الگوریتم MSSA بهترین جواب را در حل مسئله بهینه‌سازی طراحی موتور القایی قفس‌سنجابی نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی و تعیین بهینه پارامترهای موتور القایی باعث می‌شود که با توجه به هزینه، راندمان موتور القایی در حد قابل قبول و بالایی قرار گیرد.



شکل (۵): مجموعه جواب‌های جبهه پارتو برای طراحی بهینه موتور القایی.

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی و انتخاب جواب با تصمیم‌گیری فازی.

پارامتر	NAGA-II	MOPSO	MSSA
B_{ag}	۰/۰۹۰۸۶۰	۰/۰۹۹۹۹۳	۰/۱۰۰۰۰۰
l	۵/۰۰۰۱	۵/۰۰۰۰	۵/۰۰۰۰
l_{ag}	۰/۰۲۶۰۳۰	۰/۰۲۹۳۰۰	۰/۰۳۰۰۰۰
D_{si}	۵	۵	۵
h_{ss}	۱	۱	۱
b_{ss1}	۰/۲	۰/۲	۰/۲
h_{rs}	۲/۵۰۰۰	۱/۲۴۳۱	۱/۰۰۰۰
b_{rs1}	۱/۰۰۰۰۰	۰/۴۳۴۱۹	۱/۰۰۰۰۰
b_{rs2}	۰/۱۲۶۵۰۰	۰/۰۱۰۰۰۲	۰/۰۱۰۰۰۰
راندمان (%)	۷۶/۶۵۱۸	۸۱/۳۸۹۶	۸۱/۳۹۸۳
هزینه (ریال)	۲۴۵۵۹۷۶	۲۵۳۱۷۰۴	۲۵۳۰۱۰۷

فهرست علائم

پارامتر	توضیح	واحد
P_h	تلفات ویژه آن ناشی از هیستریزس	w / kg
P_{sw}	تلفات ژول سیم پیچی استاتور	w
P_g	بهترین موقعیت کلی	-
Q_t	جمعیت فرزندان	-
R_b	مقاومت میله‌ی قفس روتور	Ω
r_{ssl}	شعاع شکاف استاتور، سمت پایین	m
R_s	مقاومت هر فاز استاتور	Ω
R_{ew}	مقاومت سیم پیچی انتهایی	Ω
R_{er}	مقاومت حلقه‌ی انتهایی	Ω
R_r	مقاومت هر فاز روتور	Ω
R_t	جمعیت ترکیبی	-
s	لغزش موتور	$p.u$
T_n	گشتاور نامی	$N.m$
t_{er}	ضخامت حلقه‌ی انتهایی	m
S_b	منطقه‌ی مقاطع نوار روتور	m^2
S_{cu}	سطح مقطع سیم	m^2
S_{er}	سطح مقطع حلقه‌ی انتهایی روتور	m^2
t_{er}	ضخامت پایان حلقه	m
V_i	سرعت فعلی ذره	-
V_n	ولتاژ نامی خط	v
X_{sl}	راکتانس شتی استاتور	Ω
X_{rl}	راکتانس شتی روتور	Ω
X_m	راکتانس مغناطیس کنندگی	Ω
X_i	موقعیت ذره	-
Z_{eq}	امپدانس معادل	Ω
η	راندمان موتور	%
λ_r	نفوذپذیری مختص هندسه‌ی روتور	H / m
λ_{ew}	نفوذپذیری مختص هندسه‌ی سیم پیچی انتهایی	H / m
λ_{sd}	نفوذپذیری دیفرانسیلی استاتور	H / m
λ_s	نفوذپذیری مختص هندسه‌ی استاتور	H / m
λ_b	نفوذپذیری مختص هندسه‌ی میله‌ی روتور	H / m
λ_{er}	نفوذپذیری مختص هندسه‌ی حلقه‌ی انتهایی	H / m
λ_{rd}	نفوذپذیری دیفرانسیلی روتور	H / m
μ_0	نفوذپذیری مغناطیسی خلا	H / m
τ_{share}	فاصله‌ی مشترک	-
\sphericalangle_n	اِپراتور مقایسه جمعیتی	-
ω	فرکانس زاویه‌ای	rad / s
τ_{ew}	شعاع نیم‌دایره‌ی حلقه‌ی پایانی	m
k_R	ضریب تصحیح مقاومت اثر پوستی	
P_e	تلفات ویژه آهن ناشی از جریان فوکو (اددی)	
l	طول پشته‌ی هسته	
l_{ag}	طول فاصله‌ی هوایی	
l_b	طول میله‌ی روتور	
l_{er}	طول حلقه‌ی پایانی روتور	
l_{tw}	طول سیم پیچ	
l_b	طول حلقه‌ی انتهایی استاتور	
L_m	اندوکتانس مغناطیس کنندگی	
L_{sl}	اندوکتانس نشتی استاتور	
L_{erl}	اندوکتانس نشتی حلقه‌ی انتهایی روتور	
L_{ssl}	اندوکتانس نشتی شکاف استاتور	
L_{el}	اندوکتانس نشتی روتور	
m	تعداد فاز	
M	تعداد اهداف	
M_{cu}	جرم مس در سیم پیچ استاتور	Kg
M_{al}	جرم آلومینیوم در قفس روتور	Kg
M_b	جرم نوار در قفس روتور	Kg
M_{er}	جرم رینگ انتهایی در قفس روتور	Kg
M_{siy}	جرم آهن در یوک استاتور	Kg
M_{sit}	جرم آهن در دندان‌های استاتور	Kg
M_{riy}	جرم آهن در دندان‌های روتور	Kg
M_{rit}	جرم آهن در نوک دندان روتور	Kg
M_{ritb}	جرم آهن در بدنه دندان روتور	Kg
N_s	تعداد شکاف‌های استاتور	-
N_r	تعداد شکاف‌های روتور	-
N_{tc}	تعداد دور هر کلاف	-
N	اندازه‌ی جمعیت	-
N_{app}	تعداد دور هر مسیر جریان در هر فاز	-
P	تعداد جفت قطب‌ها	-
P_{in}	توان ورودی	w
P_i	تلفات الکترومغناطیسی آهن	w
p	تعداد متغیرها	-
P_t	تعداد والدها	-
ρ_{cu}	مقاومت ویژه الکتریکی مس	$\Omega.m$
ρ_{al}	مقاومت ویژه الکتریکی آلومینیوم	$\Omega.m$
ρ_i	مقاومت ویژه الکتریکی آهن	$\Omega.m$
P_{out}	توان خروجی	w
P_{loss}	تلفات توان	w
P_i	بهترین موقعیت هر ذره	

m	قطر خارجی استاتور	D_{so}	W	تلفات ژول قفس روتور	P_r
m	قطر داخلی روتور	D_{ri}	T	القای فاصله‌ی هوایی	B_{ag}
m	قطر خارجی روتور	D_{ro}	T	القای یوک استاتور	B_{sy}
$A/Volta$	نیروی مغناطیس‌کنندگی	F_m	T	القای دندان‌های استاتور	B_{st}
Hz	فرکانس	f	m	بازشدگی شکاف استاتور	b_{sso}
$A/Volta$	نیروی مغناطیس‌کنندگی یوک روتور	F_{ry}	m	پهنای شکاف استاتور، سمت بالا	b_{ss1}
$A/Volta$	نیروی مغناطیس‌کنندگی دندان‌های روتور	F_{rt}	m	پهنای شکاف استاتور، سمت پایین	b_{ss2}
$A/Volta$	نیروی مغناطیس‌کنندگی دندان‌های استاتور	F_{st}	m	پهنای شکاف روتور، سمت بالا	b_{rs1}
$A/Volta$	نیروی مغناطیس‌کنندگی یوک استاتور	F_{sy}	m	باز شدگی شکاف روتور	b_{st1}
m	ارتفاع یوک استاتور	h_{sy}	m	پهنای شکاف روتور، سمت پایین	b_{rs2}
m	ارتفاع بازشدگی شکاف استاتور	h_{sso}	$\$$	هزینه‌ی مواد مس خاص	c_{cu}
m	ارتفاع شکاف استاتور	h_{ss}	$\$$	هزینه‌ی مواد آلومینیوم خاص	c_{al}
m	ارتفاع یوک روتور	h_{ry}	$\$$	هزینه‌ی مواد آهن خاص	c_{fe}
m	ارتفاع بازشدگی شکاف روتور	h_{sy}	-	ضریب توان	$\cos \phi$
m	ارتفاع شکاف روتور	h_{rs}	kg/m^3	جرم ویژه مس	d_{cu}
A	جریان مغناطیس‌کنندگی	I_m	kg/m^3	جرم ویژه آلومینیوم	d_{al}
A	جریان نامی	I_n	kg/m^3	جرم ویژه آهن	d_i
-	ضریب کارتر	k_c	m	قطر داخلی حلقه‌ی انتهایی	D_{eri}
-	ضریب سیم‌پیچی	k_w	m	قطر خارجی حلقه‌ی انتهایی	D_{ero}
-	ضریب شکل حلقه انتهایی	k_{ew}	m	قطر داخلی استاتور	D_{si}

مراجع

- [1] Branke, J., Branke, J., Deb, K., Miettinen, K., and Slowiński, R., "Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches", Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] Feyzi, M. R., Aghdam, S. R. M., and Ebrahimi, Y., "A Comprehensive Review on the Performance Improvement in Switched Reluctance Motor Design," Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th Canadian Conference On, IEEE, pp. 348–353, 2011.
- [3] Boldea, I., and Nasar, S. A., "The Induction Ma
- [4] Krishnamoorthy, A., and Dharmalingam, K., "Optimized Design of Three Phase IM chines Design Handbook", CRC Press/Taylor & Francis, 2010. Using Rosenbrock's Method and GA" International Conference on Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT), IEEE, pp. 465–469, 2010.
- [5] Tutelea, L., and Boldea, I., "Induction Motor Electromagnetic Design Optimization: Hooke Jeeves Method versus Genetic Algorithms", 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, IEEE, pp. 485–492, 2010.
- [6] Krishnamoorthy, A., and Dharmalingam, K., "Multi-Objective Design Optimization of Three Phase Induction Motor Using Hooke and Jeeves Method & GA", Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change (RSTSCC), IEEE, pp. 413–418, 2010.
- [7] Sakthivel, V. P., Bhuvanewari, R., and Subramanian, S., "Economic Design of Three-Phase Induction Motor by Particle Swarm Optimization", Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, Vol.02, No.05, pp. 301–310, 2010.
- [8] Sakthivel, V. P., Bhuvanewari, R., and Subramanian, S., "Adaptive Particle Swarm Optimization for the Design of Three-Phase Induction Motor Considering the Active Power Loss Effect", International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol.2, No.4, p. 627, 2010.
- [9] Sakthivel, V. P., and Subramanian, S., "Using MPSO Algorithm to Optimize Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor Design", International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, IEEE, pp. 261–267, 2011.
- [10] Sakthivel, V. P., Bhuvanewari, R., and Subramanian, S., "Design Optimization of Three-phase Energy Efficient Induction Motor Using Adaptive Bacterial Foraging Algorithm", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical

- and electronic engineering, Vol.29, No.3, pp. 699–726, 2010.
- [11] Sakthivel, V. P., and Subramanian, S., "Energy Conservation through Improved Design of Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor Using BF Optimization Algorithm", International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET), IEEE, pp. 327–332, 2011.
- [12] Chun, Y.-D., Han P.-W., Choi, J.-H., and Koo D.-H., "Multiobjective Optimization of Three-Phase Induction Motor Design Based on Genetic Algorithm", 18th International Conference on Electrical Machines, IEEE, pp. 1–4, 2008.
- [13] Çunkaş, M., and Sağ, T., "Efficiency Determination of Induction Motors Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms", Advances in Engineering Software, Vol.41, No.2, pp. 255–261, 2010.
- [14] Ranjan, S., Mishra, S. K., and Behera, S. K., "A Comparative Performance Evaluation of Evolutionary Algorithms for Optimal Design of Three-Phase Induction Motor", Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), IEEE, pp. 1–5, 2013.
- [15] Lee, D., and Jung, H.-C., "Cost Pattern Value Method for Local Search Algorithms Applied to Optimal FEA-Based Design of Induction Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.54, No.4, pp. 1–8, 2018.
- [16] Lin, C.-H., and Hwang, C.-C., "Multiobjective Optimization Design for a Six-Phase Copper Rotor Induction Motor Mounted With a Scroll Compressor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.52, No.7, pp. 1–4, 2016.
- [17] Pourmoosa, A. A., and Mirsalim, M., "Design Optimization, Prototyping, and Performance Evaluation of a Low-Speed Linear Induction Motor With Toroidal Winding", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.30, No.4, pp. 1546–1555, 2015.
- [18] Verucchi, C., Ruschetti, C., Giraldo, E., Bossio, G., and Bossio, J., "Efficiency Optimization in Small Induction Motors Using Magnetic Slot Wedges", Electric Power Systems Research, Vol.152, pp. 1–8, 2017.
- [19] Mousavi-Aghdam, S. R., and Sharifian, M. B. B., "Nonlinear Adaptive Observer for Sensorless Control of Induction Motors", 20th Iranian Conference on Electrical Engineering, pp. 376–379, 2012.
- [20] Zhang, D., Park, C. S., and Koh, C. S., "A New Optimal Design Method of Rotor Slot of Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor for NEMA Class D Speed-Torque Characteristic Using Multi-Objective Optimization Algorithm", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.48, No.2, pp. 879–882, 2012.
- [21] Agamloh, E. B., and Cavagnino, A., "High Efficiency Design of Induction Machines for Industrial Applications", IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), IEEE, pp. 33–46, 2013.
- [22] Agamloh, E. B., Boglietti, A., and Cavagnino, A., "The Incremental Design Efficiency Improvement of Commercially Manufactured Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.49, No.6, pp. 2496–2504, 2013.
- [23] Boglietti, A., Cavagnino, A., and Lazzari, M., "Geometrical Approach to Induction Motor Design", 33th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, pp. 149–156, 2007.
- [24] Mousavi-Aghdam, S. R., Feyzi, M. R., and Ebrahimi, Y., "A New Switched Reluctance Motor Design to Reduce Torque Ripple Using Finite Element Fuzzy Optimization", Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol.8, No.1, pp. 91–96, 2012.
- [25] Mirjalili, S., Gandomi, A. H., Mirjalili, S. Z., Saremi, S., Faris, H., and Mirjalili, S. M., "Salp Swarm Algorithm: A Bio-Inspired Optimizer for Engineering Design Problems", Advances in Engineering Software, Vol.114, pp. 163–191, 2017.
- [26] Hamid, R. H. A., Amin, A. M. A., Ahmed, R. S., and El-Gammal, A. A. A., "Optimal Operation of Induction Motors Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)", 33th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, pp. 1079–1084, 2007.
- [27] Hamdi, E. S., "Design of Small Electrical Machines", Wiley, 1994.
- [28] Mousavi-Aghdam, S. R., Feyzi, M. R., Bianchi, N., and Morandin, M., "Design and Analysis of a Novel High-Torque Stator-Segmented SRM", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.63, No.3, pp. 1458–1466, 2016.
- [29] Ferreira, F. J. T. E., and De Almeida, A. T., "Induction Motor Downsizing as a Low-Cost Strategy to Save Energy", Journal of Cleaner Production, Vol.24, pp. 117–131, 2012.
- [30] Boglietti, A., Cavagnino, A., and Lazzari, M., "Algorithms for the Computation of the Induction Motor Equivalent Circuit Parameters - Part II", 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IEEE, pp. 2028–2034, 2008.
- [۳۱] اجتهد، سیدحسین، «مدل‌سازی غیرخطی و کنترل جامع مقاوم توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی قفس سنجایی و کنترل زاویه پیچش پره‌ها»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۷، شماره ۲، صفحه ۲۶–۴۱، ۱۳۹۶.
- [32] Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., and Vaschetto, S., "Preliminary Induction Motor Electromagnetic Sizing Based on a Geometrical Approach", IET Electric Power Applications, Vol.6, No.9, p. 583, 2012.
- [33] Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V., and Hrabovcova, V., "Design of Rotating Electrical Machines", Wiley, 2013.

- [34] Contreras, S. F., Cortes, C. A., and Guzmán, M. A., "Modelling of Squirrel Cage Induction Motors for a Bio-Inspired Multi-Objective Optimal Design", IET Electric Power Applications, Vol.11, No.4, pp. 512–523, 2017.
- [35] Aghajani, G. R., Shayanfar, H. A., and Shayeghi, H., "Presenting a Multi-Objective Generation Scheduling Model for Pricing Demand Response Rate in Micro-Grid Energy Management", Energy Conversion and Management, Vol.106, pp. 308–321, 2015.