

Optimal Design, Modeling, and Evaluation of Single-Phase Axial Flux Induction Motor with a Permanent Capacitor Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

Amin Aboutalebi Najafabadi, M.Sc

Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
aminabutalebi@gmail.com

Abstract:

The increasing application of single-phase axial flux induction motors with a permanent capacitor and their low efficiency has led to the importance of optimization of this type of motors. In this paper, by introducing the classical algorithms of design of this type of motors, which consists of finding the dimensions of different parts of the motor and calculation of electrical parameters such as resistance and reactance, and capacitor, by introducing the proposed equivalent circuit in the permanent state to reduce the air gap of the motor, introduces the structure of optimization algorithms and then uses a genetic algorithm and improved particle swarm algorithm to optimize the design of the axial flux motor to increase efficiency, increase power factor and reduce core volume. For this purpose, a single-phase axial flux induction motor with a permanent capacitor that has considerable application in ventilation systems is investigated, and using design formulas and with the help of a circuit equivalent to the proposed permanent state, as well as using Intelligent methods such as genetic algorithm and improved particle swarm algorithm, engine optimization to increase maximum efficiency and the results are drawn in the form of torque-speed and efficiency-speed diagrams and compared with each other. Finally, the designed motor is simulated by the finite element method to verify the design algorithm, the steady-state model, the proposed optimization algorithm, and the test results.

Keywords: optimization algorithm, improve particle swarm optimization algorithm, finite element method, continuous mode functional model, single-phase axial flux induction motor.

Received: 07 July 2020

Revised: 14 September 2020

Accepted: 21 October 2020

Corresponding Author: Amin Aboutalebi Najafabadi

Citation: A. Aboutalebi-Najafabadi, "Optimal Design, Modeling, and Evaluation of Single-Phase Axial Flux Induction Motor with a Permanent Capacitor Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 44, pp. 47-69, Winter 2021 (in Persian).

طراحی بهینه، مدل‌سازی و بررسی عملکرد موتور القایی تک فاز شار محوری خازن دائم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات بهبودیافته

امین ابوطالبی نجف‌آبادی^۱، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

aminabutalebi@gmail.com

چکیده: کاربرد روز افزون موتورهای القایی تک‌فاز شار محوری خازن دائم و بازده پایین آنها، باعث اهمیت مساله بهینه‌سازی این نوع موتورها گردیده است. در این مقاله، ضمن معرفی اصول الگوریتم‌های کلاسیک طراحی این نوع موتورها که شامل یافتن ابعاد قسمت‌های مختلف موتور و محاسبه پارامترهای الکتریکی مانند مقاومت‌ها و راکتانس‌ها و خازن است، با معرفی مدار معادل پیشنهادی در حالت دائمی به منظور کاهش فاصله هوایی موتور، به معرفی ساختار الگوریتم‌های بهینه‌سازی پرداخته و در ادامه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و تجمع ذرات بهبودیافته در راستای بهینه‌سازی طراحی موتور شار محوری جهت افزایش بازده، افزایش ضریب توان و کاهش حجم هسته استفاده می‌شود. بدین منظور یک موتور القایی تک فاز شار محوری با خازن دائم که کاربرد قابل توجهی در سیستم‌های تهویه دارد، انتخاب شده، مورد بررسی عملکردی قرار گرفته و با استفاده از فرمول‌های طراحی و به کمک مدار معادل حالت دائمی پیشنهادی و همچنین با استفاده از روش‌های هوشمند نظیر الگوریتم ژنتیک^۱ و تجمع ذرات بهبودیافته^۲، بهینه‌سازی موتور جهت افزایش حداکثری بازده صورت گرفته و نتایج آن در قالب نمودارهای گشتاور-سرعت و بازده-سرعت رسم و با یکدیگر مقایسه شده است. در پایان موتور طراحی شده به روش اجزای محدود^۳ جهت تایید الگوریتم طراحی، مدل حالت دائمی، الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی و نتایج آزمایش‌ها شبیه‌سازی شده است.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات بهبودیافته، روش اجزای محدود، مدل عملکردی حالت دائمی، موتور القایی تک‌فاز شار محوری.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۴/۱۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۶/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۷/۳۰

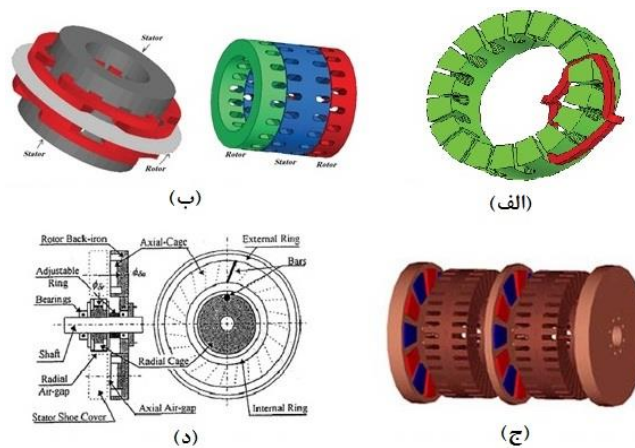
نام نویسنده‌ی مسئول: امین ابوطالبی نجف‌آبادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان - خیابان دانشگاه - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

ماشین‌های شار محوری به دلیل مزایای منحصر به فرد خود، در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. از جمله این ماشین‌ها می‌توان به ماشین القایی تک فاز شار محوری اشاره نمود. موتورهای القایی شار محوری نسبت به موتورهای معمولی دارای مزایای زیادی هستند که از آن جمله می‌توان به توان بالا، ساختار فشرده، بازده بیشتر (مخصوصاً در ماشین‌های با تعداد قطب بالا)، تهویه و خنک‌کنندگی بیشتر و قابلیت تنظیم فاصله هوایی بعد از فرآیند ساخت و هنگام مونتاژ اشاره نمود. موتورهای شار محوری یک جایگزین مناسب برای موتورهای معمولی بکار رفته در فن‌ها، پمپ‌ها، مصارف خانگی و وسایل نقلیه الکتریکی هستند [۱].

ماشین‌های شار محور^۴ (AFM) یا دیسکی در سال ۱۸۲۱ توسط فاراده اختراع شد و به تدریج با اختراع ماشین‌های شار شعاعی^۵ (RFMs) در سال ۱۸۳۷ توسط داون پورت، کاربرد ماشین‌های شار محوری کاهش یافت [۱،۲]. کاربرد اکثر این ماشین‌ها به صورت موتوری است. این موتورها در دهه‌های اخیر به دلیل گشتاور بالا در سرعت کم و همچنین چگالی توان بالا و بازده بیشتر نسبت به موتورهای شار شعاعی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. به طور کلی در ماشین‌های شار شعاعی، شار فاصله هوایی در راستای شعاعی و عمود بر محور و همچنین هادی‌ها، محوری قرار گرفته‌اند، اما در ماشین‌های شار محوری، شار فاصله هوایی در راستای محور و هادی‌ها به صورت شعاعی قرار می‌گیرند. این موتورها می‌توانند در انواع القایی، جریان مستقیم بدون جاروبک، هیستریزیس، سویچ رلوکتانس یا مغناطیس دائم ساخته شوند. موتور مورد بحث در این مقاله، از نوع موتور القایی شار محور^۶ (AFIM) تکفاز با خازن دائم است. ساختارهای مرسوم ماشین‌های شار محوری القایی، ساختار با یک فاصله هوایی (یک طرفه)^۷، ساختار با دو فاصله هوایی (دو طرفه)^۸، ساختار با چند فاصله هوایی^۹، ساختار ترکیبی شار محوری و شار شعاعی است که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختارهای مرسوم ماشین شار محوری

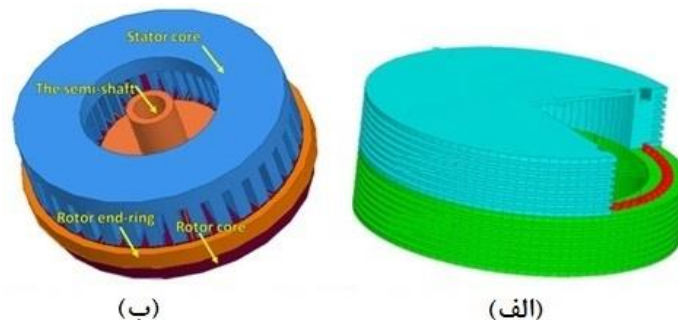
(الف) با یک فاصله هوایی [۱]، (ب) با دو فاصله هوایی [۱]، (ج) با چند فاصله هوایی [۴]، (د) ترکیبی شار محوری و شار شعاعی [۱]

Figure (1): The Conventional machine structures

a) With one air gap, b) with two air gaps, c) with a few air gaps, d) combination of axial flux and radial flux

ساختار با یک فاصله هوایی در مواردی که گشتاور کمی مورد نیاز است، استفاده می‌شود. این ساختار معمولاً در طراحی موتورهای با گشتاور کمتر از ۱۰۰ نیوتن متر کاربرد دارد. یک راه کاهش نیروی کشش مغناطیسی بین روتور و استاتور جهت کاهش فاصله هوایی و جلوگیری از قفل شدن روتور، استفاده از ساختار شبه یاتاقان به صورت شکل (۲) است. در این ساختار شیار باریکی روی بدنه استاتور و روتور ایجاد می‌شود که از ساچمه‌های ریزی پر می‌شود [۳]. یکی دیگر از راه‌های کاهش فاصله هوایی بین روتور و استاتور، روش دو یاتاقان است که در این روش یک قسمت نیم شافت به روتور اضافی می‌شود [۴]. ساختار دو طرفه دارای دو فاصله هوایی است و می‌تواند به صورت دو روتور و یک استاتور در وسط یا دو استاتور و یک روتور در وسط باشد. به وسیله این ساختار می‌توان گشتاور بیشتری تولید نمود و نیروی محوری را کاهش داد. در ساخت موتورهای با گشتاور

بالاتر از ۲۰۰ نیوتن متر معمولاً از این ساختار استفاده می‌شود [۱]. برای کاربردهای خاص ماشین‌های پر قدرت می‌توان از ساختار با چند فاصله هوایی استفاده نمود [۵].



شکل (۲): ساختارهای مرسوم جهت کاهش فاصله هوایی در ماشین شار محوری الف) ساختار شبه یاتاقان [۳]، ب) ساختار دو یاتاقان [۴]
Figure (2): The conventional structures for the reduction of air gap in the axial flux machine, a) bear like structure, b) two bearing structure

با بررسی مطالعات اخیر در زمینه موتورهای القایی شار محوری به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:
در مورد موتورهای سه فاز، در مراجع [۶] تا [۸] موتورهای القایی شار محوری یک طرفه پیشنهاد شده است. با این حال، نیروی جاذبه نامتعادل در جهت محوری بین روتور و استاتور در این نوع موتورها باعث تلفات مکانیکی اضافی در بار می‌شود. این اشکال اصلی را نمی‌توان نادیده گرفت حتی اگر ساختن این موتور با توجه به ساختار ساده‌اش نسبتاً آسان باشد. به‌منظور کاهش یا از بین بردن نیروی جاذبه محوری، در مرجع [۹] موتورهای القایی شار محوری چند دیسک با ترکیب چندین موتور شار محوری یک طرفه در موتورهای مغناطیسی دائمی شار محوری^۱ (AFPM) دو طرفه پیشنهاد شده است. با این وجود، آهن اضافی جهت ایجاد مسیر شار آهنربا مورد نیاز است که به‌نوبه خود باعث سنگین شدن موتور و اشغال فضای بیشتر و در نتیجه کاهش چگالی توان می‌شود.

در مراجع [۱۰] و [۱۱] یک الگوریتم طراحی موتور القایی شار محوری دو روتوره ارائه شده که از دو روتور و یک استاتور سیم پیچی شده تشکیل شده است (شکل ۳- الف). استفاده از ساختار دو روتوره باعث حذف نیروی محوری بین روتور و استاتور شده و امکان پیاده‌سازی فاصله هوایی کوچک را محیا می‌سازد.

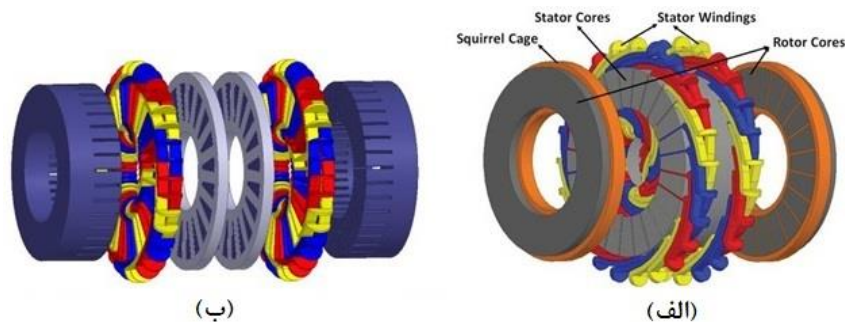
در مرجع [۱۲]، یک موتور القایی شار محوری شش قطب با سیم پیچ توزیع شده دارای دو استاتور و دو روتور برای وسایل نقلیه الکتریکی پیشنهاد شده است (شکل ۳- ب). با استفاده از این ساختار، نیروی محوری از بین رفته و افت تحمل مکانیکی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، وزن موتور و حجم آن کمتر خواهد شد و در نتیجه در مصرف مواد اولیه جهت ساخت موتور صرفه جویی می‌شود.

در مراجع [۱۳] تا [۱۶] یک روش مدل‌سازی بر مبنای نمایش امیدانس سطح چند لایه از موتور پیشنهاد شده است. این مدل در مقایسه با مدل‌های قبلی دارای دقت و سرعت بالاتری است، با این حال به دلیل ضرورت مدل‌سازی در لایه‌های متعدد (همانند مدل‌سازی در المان محدود) نیازمند محاسبه ضرایب مربوط به سری فوریه است که این موضوع سبب افزایش تعداد متغیرها و همچنین افزایش مدت زمان محاسبات می‌شود.

در مرجع [۱۷] یک موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری با استفاده از یک قفس القایی، تجزیه و تحلیل و طراحی شده است. این مدل می‌تواند به عنوان جایگزینی برای موتورهای القایی جهت افزایش بازده مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در مقایسه با موتورهای مغناطیس دائم شار شعاعی دارای کارایی بالاتر و هزینه کمتری خواهد بود.

در مرجع [۱۸]، تحلیل دو بعدی مدل موتور القایی شار محوری براساس حل معادلات پتانسیل بردار مغناطیسی با در نظر گرفتن اثر اشباع ارائه شده است. این مدل از موتور القایی از معادلات شبه مگنتو استاتیک ماکسول استخراج شده که به‌صورت تحلیلی حل می‌شوند. توزیع چگالی جریان در شکاف‌های روتور و استاتور به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است و با محاسبه انرژی مغناطیسی ماشین، اندوکتانس‌های موتور القایی به‌دست می‌آیند که از آنها برای ارزیابی دقت طراحی پارامترهای عملکرد ماشین در حل تحلیلی دو بعدی استفاده می‌شود. براساس مراجع [۱۹] و [۲۰] این مدل همچنین در طراحی بهینه

موتورهای القایی شار محوری جهت استفاده در خودروهایی برقی مورد بررسی قرار گرفته است. این طراحی براساس تحلیل تفکیکی معادلات ماکسول درون مجموعه‌ای از زیر دامنه‌ها و همچنین در نظر گرفتن یک چرخه رانندگی بهینه در وسایل نقلیه الکتریکی است.



شکل (۳): ساختارهای جدید موتور شار محوری، الف) دو روتور و یک استاتور [۱۱]، ب) دو روتور و دو استاتور [۱۲]
Figure (3): The new construction machine structures, a) two rotors and one stator, b) two rotors and two stators

در طراحی ماشین‌های الکتریکی، متغیرهای اختیاری وجود دارد که طراح آنها را با توجه به هدف طراحی و تجربه شخصی تعیین می‌کند. این متغیرهای اختیاری تأثیر بسزایی بر مشخصه عملکرد و ابعاد ماشین طراحی شده دارند. از این رو در طراحی ماشین‌های الکتریکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. به دلیل پیچیدگی و وجود وابستگی بین معادلات حاکم بر طراحی ماشین‌های الکتریکی، زمان اجرا برنامه بهینه‌سازی نسبتاً زیاد است. به همین دلیل جهت کاهش زمان محاسبات از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی مورد استفاده در این مقاله جهت طراحی بهینه موتور القایی شار محوری با حداکثر بازده و حداقل زمان اجرای برنامه، الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته است که دارای سرعت همگرایی نسبتاً بالایی است.

در این مقاله ضمن ارائه یک الگوریتم طراحی جامع، فرمول‌های مربوطه به‌طور کامل بیان شده، ابعاد هندسی و پارامترهای مدار معادل الکتریکی موتور طراحی و به‌صورت تحلیلی محاسبه شده است. همچنین مدار معادل حالت دائمی پیشنهادی جهت طراحی بهینه موتور القایی شار محوری ارائه می‌شود که به‌وسیله آن می‌توان نمودارهای عملکردی ماشین را به‌دست آورد. در ادامه با استفاده از معادلات بیان شده ماشین و اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و تجمع ذرات بهبودیافته، الگوریتمی جهت طراحی بهینه موتور القایی شار محوری ارائه می‌شود و نتایج به‌دست آمده از دو الگوریتم بهینه‌سازی بیان شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در پایان با استفاده از روش اجزای محدود در نرم افزار ماکسول، صحت مراحل قبلی تایید می‌گردد.

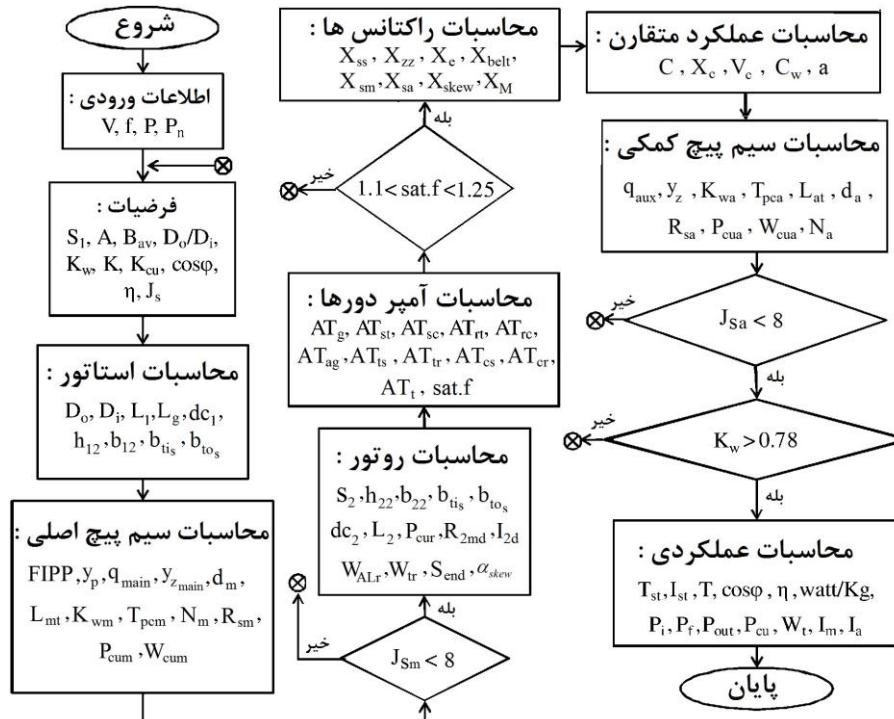
۲- روش‌های محاسبه پارامترهای مدار معادل موتور

به‌طور معمول آزمایش‌های DC، بی‌باری و روتور قفل شده برای محاسبه پارامترهای موتور القایی به‌کار می‌رود اما روش‌های جدید مانند روش تخلیه جریان استاتور می‌توانند برای محاسبه پارامترهای موتور به‌کار برده شود. همچنین روش دیگر شامل الگوریتم طراحی جهت یافتن پارامترها بر اساس محاسبات است که در ادامه تشریح می‌گردد.

۳- الگوریتم طراحی

الگوریتم طراحی کلاسیک به‌کار رفته برای موتور القایی تک‌فاز شار محوری در شکل (۴) نشان داده شده است. در این الگوریتم پس از انتخاب اطلاعات ورودی که معمولاً مشخصات اولیه موتور می‌باشد، پارامترهای اختیاری مانند چگالی جریان، نسبت قطر خارجی به قطر داخلی، ضریب بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی ویژه، ضریب توان، بازده و ... انتخاب می‌شوند و بر اساس الگوریتم پیشنهادی، محاسبات ابعادی استاتور، روتور و سیم‌پیچی‌ها انجام می‌شود و با چک کردن چگالی جریان و ضریب اشباع، درستی محاسبات بررسی می‌گردد. این مرحله ممکن است چندین مرتبه تکرار شود تا به نتیجه مطلوب برسیم. سپس

مقدار پارامترهای الکتریکی شامل مقاومت‌ها، اندوکتانس‌ها و خازن محاسبه می‌شود. بعد از یافتن تمام پارامترها می‌توان مدار معادل نهایی حالت دائمی و گذرا را رسم نمود و محاسبات عملکردی شامل یافتن بازده، گشتاور، ضریب توان، جریان‌های سیم‌پیچی اصلی و کمکی را انجام داد.



شکل (۴): الگوریتم طراحی کلاسیک استفاده شده برای موتور القایی تکفاز شار محوری خازن دائم
Figure (4): The classic design algorithm used for single-phase axial flux induction motor with permanent capacitor

۳-۱- نسبت قطر خارجی به قطر داخلی (λ)

نسبت قطر خارجی به قطر داخلی یکی از مهمترین پارامترهای طراحی موتور شار محوری می‌باشد. این مقدار با λ نمایش داده می‌شود و معکوس آن برابر K_D است. در ماشین‌های شار محوری انتخاب λ بسیار مهم است، به همین دلیل می‌توان گفت نسبت قطر خارجی به قطر داخلی، یک عدد طلایی است. طبق تعریف، دو پارامتر فوق را به شکل زیر بیان می‌نماییم:

$$\lambda = \frac{D_o}{D_i} \quad (1)$$

$$K_D = \frac{D_i}{D_o} \quad (2)$$

در این روابط D_o قطر خارجی و D_i قطر داخلی است. کمپبل^{۱۱} در سال ۱۹۷۱ بهترین نسبت K_D برای ماشین ایده‌آل مغناطیس دائم و القایی را ۰/۵۸ بدست آورد.

۳-۲- ضریب بارگذاری الکتریکی ویژه

بارگذاری الکتریکی ویژه، طبق [۲۱] برای ماشین‌های الکتریکی کوچک و متوسط بین ۳۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ و برای ماشین‌های بزرگ بین ۴۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ انتخاب می‌گردد. در ماشین‌های شار محوری می‌توان مقدار مذکور را بیشتر انتخاب نمود.

۳-۳- ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه

ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه (B_{av}) همان چگالی شار متوسط فاصله هوایی برای یک قطب است. انتخاب B_{av} باید طوری

باشد که هیچ قسمتی از مدار مغناطیسی وارد اشباع نشود. B_{av} وابسته به چگالی شار دندان (B_t) و چگالی شار هسته (B_c) است. در موتورهای القایی B_t حداکثر $1/8$ و B_c بین $1/3$ تا $1/5$ انتخاب می‌شود. بار گذاری مغناطیسی ویژه در حدود 0.45 تا 0.6 تسلا انتخاب می‌گردد [۲۱]. به دلیل اینکه نسبت قطر داخلی به قطر محور در ماشین‌های شار محوری بزرگتر از ماشین‌های مرسوم است، خنک سازی بهتر و تهویه راحت‌تر انجام می‌شود، پس می‌توان مقدار B_{av} را بیشتر انتخاب نمود.

۳-۴- معادلات خروجی ماشین

از آنجا که نقطه شروع طراحی ماشین‌های الکتریکی، معادله خروجی است، در نتیجه آن را محاسبه می‌نماییم. در ماشین‌های القایی معمولی، معادله خروجی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$S = mV_1I_1 \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f\phi_p K_w T_{ph} \quad (4)$$

$$\phi_p = FIPP = B_{av} \tau_p l \quad (5)$$

که در این روابط m تعداد فاز، V_1 ولتاژ ورودی، I_1 جریان ورودی، f فرکانس، ϕ_p شار زیر هر قطب، K_w ضریب سیم‌پیچی، T_{ph} تعداد هادی‌های هر فاز، τ_p گام قطبی و l طول محوری ماشین است. مقدار ϕ_p ، شار زیر هر قطب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\phi_p = B_{max} \times \frac{D_o^2 - D_i^2}{2P} \quad (6)$$

که در این رابطه P تعداد قطب‌ها است. جهت یافتن معادلات ماشین القایی شار محوری کافی است در روابط فوق، به جای D از $D_{av} = \frac{D_o + D_i}{2}$ و به جای l از $l = \frac{D_o - D_i}{2}$ استفاده شود [۲۲]. در ادامه معادله خروجی ماشین شار محوری به شکل زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{\sqrt{2}}{32} \pi^3 K_w B_{av} A (\lambda + 1)^2 (\lambda - 1) D_i^3 n_s \quad (7)$$

که در این رابطه n_s سرعت سنکرون بر حسب دور بر ثانیه است. A و B_{av} به ترتیب ضریب بارگزاری الکتریکی و مغناطیسی ویژه هستند که می‌توان مقادیر آن‌ها را از روابط زیر بدست آورد:

$$A = \frac{2mI_1T_{ph}}{(\pi/2)(D_o - D_i)} \quad (8)$$

$$B_{av} = \frac{P\phi_p}{(\pi/4)(D_o^2 - D_i^2)} \quad (9)$$

۳-۵- محاسبات ابعادی استاتور

فرمول محاسبه قطر داخلی موتور را می‌توان به شکل زیر نوشت [۴]:

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{32P_{out}}{\sqrt{2}\pi^3 K_w B_{av} A (\lambda + 1)^2 (\lambda - 1) n_s \eta \cos \phi}} \quad (10)$$

طول استاتور طبق [۲۳] به صورت زیر به دست می‌آید:

$$L_1 = (2.3 \frac{A}{J_s} + 0.7 \frac{\pi D_i}{4P})(\lambda + 1) \quad (11)$$

که در این رابطه J_s چگالی جریان عبوری از هادی‌های استاتور است. برای محاسبه عرض شیار استاتور رابطه‌ای به شکل زیر در مرجع [۲۴] ذکر شده است:

$$b_{10} = b_{12} = \frac{\pi}{2S_1} (D_o + D_i) \left(1 - \frac{B_{g,max}}{B_{t,max}}\right) \quad (12)$$

که در این رابطه S_1 تعداد شیار استاتور است. برای محاسبه عمق مفید شیار، رابطه‌ای به شکل زیر در مرجع [۲۵] ذکر شده است:

$$h_{12} = \frac{A}{2J_S K_{cu}} (1 + \lambda) = \frac{A}{2J_S K_{cu}} \left(\frac{1 + K_D}{K_D}\right) \quad (13)$$

که در این رابطه K_{cu} ضریب پخشندگی مس نامیده شده و حدوداً ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه عمق یوغ استاتور داریم [۳]:

$$dc_1 = L_1 - h_{10} - h_{11} - h_{12} \quad (14)$$

از آنجا که ساختار شیار موازی برای استاتور استفاده می‌شود، دندانه‌ها دارای شکل دوزنقه‌ای هستند. بنابراین برای اطمینان از عدم وجود اشباع، حداقل عرض داخلی و خارجی دندانه‌ها را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$b_{t,o/i} = \frac{\pi D_{o/i} - S_1 b_{12}}{S_1} \quad (15)$$

برای محاسبه طول فاصله هوایی رابطه‌ای در مرجع [۲۴] آمده که به شکل زیر است:

$$g = \left(3.06 - \frac{6560}{D_{avg} + 2280}\right) \times 10^{-3} \quad (16)$$

تعداد دور سری سیم پیچ اصلی تقسیم بر تعداد قطب از رابطه زیر به دست می‌آید [۳]:

$$T_{pc} = \frac{(1 - \Delta V\%) V_1}{4.44 f \times \varphi_p \times K_w \times P} \quad (17)$$

۳-۶- محاسبه قطر سیم مصرفی در سیم پیچ اصلی

برای محاسبه قطر سیم مصرفی ابتدا باید نسبت تبدیل بین سیم پیچ اصلی و کمکی را در نظر گرفت. نسبت تبدیل اسکالر (a) به صورت تعداد دور سیم پیچی کمکی به اصلی تعریف می‌شود که عددی بین ۱ و ۲ است. با توجه به فرمول پیشنهادی در مرجع [۲۶] داریم:

$$I_{L,ph} = \frac{P_{out}}{\eta V \cos \varphi} \quad (18)$$

$$I_{mph} = \frac{I_{L,ph}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{a}\right)^2}} \quad (19)$$

$$S_m = \frac{I_{mph}}{J_s} \quad (20)$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4S_m}{\pi}} \quad (21)$$

که در این روابط S_m مساحت سطح مقطع سیم پیچ اصلی، d_m قطر سیم پیچ اصلی، $I_{L,ph}$ جریان کلی ورودی به موتور و I_{mph} جریان سیم پیچ اصلی است.

۳-۷- محاسبات ابعادی روتور

برای انتخاب تعداد شیارهای روتور محدودیت‌هایی به شکل زیر وجود دارد [۲۷]:

برای جلوگیری از خزش^{۱۲} و کوچینگ^{۱۳} باید:

$$S_1 \neq S_2, S_1 - S_2 \neq \pm 3P$$

$$S_1 - S_2 \neq \pm P, \pm 2P, \pm 5P$$

برای جلوگیری از عملکرد نویزی باید:

$$S_1 - S_2 \neq \pm 1, \pm 2, (\pm P \pm 1), (\pm P \pm 2)$$

برای یافتن ابعاد روتور باید به این موضوع توجه کرد که شاری که از قسمت‌های فلزی روتور و استاتور می‌گذرد یکی است، پس در نتیجه خواهیم داشت:

$$L \times S_1 \times b_{to_s} = L \times S_2 \times b_{to_r} \quad (22)$$

که در این رابطه S_2 تعداد شیار روتور، b_{to_s} پهنای دندانه خارجی استاتور، b_{to_r} پهنای دندانه خارجی روتور است. در نتیجه:

$$b_{to_r} = \frac{S_1}{S_2} \times b_{to_s} \quad (23)$$

از آنجا که ساختار شیار موازی هم برای روتور استفاده می‌شود، دندانه‌ها دارای شکل دوزنقه‌ای هستند. بنابراین برای اطمینان از عدم وجود اشباع، حداقل عرض داخلی و خارجی دندانه‌ها را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$b_{t,o/i} = \frac{\pi D_{o/i} - S_1 b_{22}}{S_2} \quad (24)$$

جریان روتور به طور تقریبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_r' = I_{mph} \times \cos \varphi \quad (25)$$

$$\frac{I_r'}{I_r} = \frac{S_2}{2mT_{ph}K_{W_m}} \quad (26)$$

$$I_r = \frac{2mT_{ph}K_{W_m}}{S_2} \times I_r' \quad (27)$$

مساحت کلی قفس از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_{cage} = \frac{I_r}{J_r} \quad (28)$$

به طور تقریبی می‌توان عمق شیار روتور را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$h_{22} = \frac{S_{cage}}{b_{22}} \quad (29)$$

جریان در حلقه انتهایی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_{end} = I_r \times \frac{S_2}{\pi \times P} \quad (30)$$

مساحت حلقه انتهایی نیز به شکل زیر است:

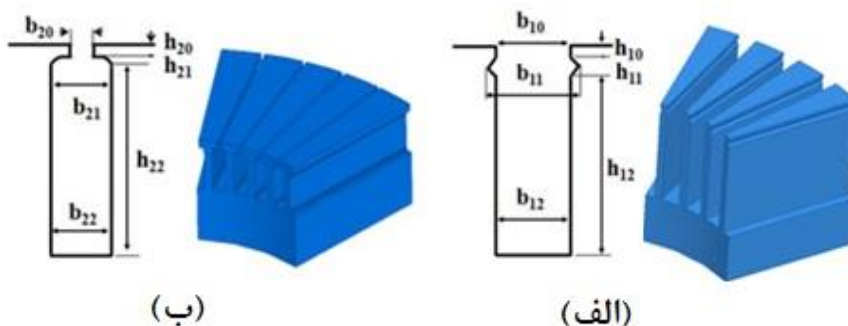
$$S_{end} = \frac{I_{end}}{J_r} \quad (31)$$

که در این رابطه J_r چگالی جریان روتور است. عمق یوغ و طول روتور از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$dc_2 = 0.95 \times dc_1 \quad (32)$$

$$L_2 = dc_2 + h_{20} + h_{21} + h_{22} \quad (33)$$

در شکل (۵) شکل هندسی شیارها و ابعاد استاتور و روتور نشان داده شده است [۳]:



شکل (۵): شکل هندسی و شیارهای الف) استاتور، ب) روتور [۳]
Figure (5): The geometrical shape and a) stator grooves, b) rotor grooves [3]

با استفاده از روابط فوق، مقادیر طراحی شده قسمت‌های مختلف یک موتور القایی تکفاز شار محوری خازن دائم ۶ قطب ۵۶۰ وات که در سیستم‌های تهویه کاربرد دارد، در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳-۸- محاسبات آمپردور و ضریب اشباع

اگر هسته وارد اشباع شود، دیگر رلوکتانس مغناطیسی هسته در مقایسه با رلوکتانس فاصله هوایی کم نیست و نمی‌توان از آن چشم‌پوشی نمود. به همین دلیل محاسباتی برای آمپردور، انجام می‌شود و در نهایت ضریبی به نام ضریب اشباع^{۱۶} تعریف می‌شود که باید عددی بین ۱/۰۱ و ۱/۲۵ باشد تا صحت محاسبات تایید شود [۲۸]. با توجه به اینکه طول فاصله هوایی در مقابل عبور شار، در تمام نقاط یکسان نیست، به همین دلیل ضریبی به نام کارتر^{۱۷} در محاسبات ظاهر می‌شود. مقدار این ضریب عددی بین ۱/۲ تا ۱/۶ است. این ضریب معمولاً به صورت حاصلضرب ضریب کارتر روتور در ضریب کارتر استاتور تعریف می‌شود. برای یافتن ضریب کارتر از فرمول‌های زیر استفاده می‌گردد [۲۹]:

$$K_{cs} = \frac{t_s}{t_s - g \times \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_{10}}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{b_{10}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{10}}{2g} \right)^2} \right]} \quad (34)$$

$$K_{cr} = \frac{t_r}{t_r - g \times \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_{20}}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{b_{20}}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{20}}{2g} \right)^2} \right]} \quad (35)$$

$$K_c = K_{cs} \times K_{cr} \quad (36)$$

که در این روابط g طول فاصله هوایی، K_{cs} ضریب کارتر استاتور، K_{cr} ضریب کارتر روتور و K_c ضریب کارتر کلی است. همچنین t_s و t_r گام متوسط شیار استاتور و روتور هستند. این پارامترها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$t_s = \frac{\pi}{2S_s} (D_o + D_i) \quad (37)$$

$$t_r = \frac{\pi}{2S_r} (D_o + D_i) \quad (38)$$

$$L_g = K_c \times g \quad (39)$$

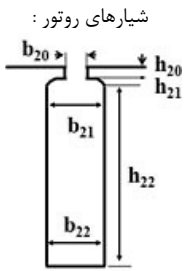
$$A_{ag} = \frac{\pi}{4P} (D_o^2 - D_i^2) \quad (40)$$

$$B_g = \frac{\Phi_p}{0.637A_{ag}} \quad (41)$$

بنابراین خواهیم داشت:

Table (1): The designed dimensions of a 6-pole and 560 watts AFIM with permanent capacitor

جدول (۱): ابعاد طراحی شده یک موتور ۶ قطب ۵۶۰ وات شار محوری تکفاز خازن دائم

پارامتر	نماد	واحد	مقدار	
توان خروجی	P_{out}	W	۵۶۰	
فرکانس	F	Hz	۵۰	
ولتاژ	V	V	۲۲۰	
تعداد قطب	P	-	۶	
طول فاصله هوایی	L_g	mm	۱	
قطر خارجی استاتور	D_o	mm	۱۸۷/۴	
قطر داخلی استاتور	D_i	mm	۱۰۶/۷	
طول کل استاتور	L_1	mm	۴۰	
طول کل روتور	L_2	mm	۱۷/۵	
عمق یوغ استاتور	dc_1	mm	۹	
عمق یوغ روتور	dc_2	mm	۸/۵	
تعداد شیارهای استاتور	S_1	-	۳۶	
تعداد شیار روتور	S_2	-	۴۵	
 <p>شیارهای استاتور:</p>	عرض شیار بالای استاتور	b_{10}	mm	۵
	عرض شیار فرورفتگی استاتور	b_{11}		۶
	عرض شیار پایین استاتور	b_{12}		۵
	عمق دهانه استاتور	h_{10}		۱
	عمق گوه استاتور	h_{11}		۲
	عمق شیار استاتور	h_{12}		۲۸
 <p>شیارهای روتور:</p>	دهانه شیار روتور	b_{20}	mm	۱
	عرض شیار روتور	b_{21}		۴/۵
	عرض شیار روتور	b_{22}		۴/۵
	عمق دهانه روتور	h_{20}		۱
	عمق بالایی شیار روتور	h_{21}		۱
	عمق شیار روتور	h_{22}		۷
زاویه کج شدگی شیار استاتور/ روتور	α_{skew}	degree		۰/۲۰

$$AT_{ag} = \frac{1}{\mu_0} B_g L_g \quad (42)$$

کل آمپر دور و ضریب اشباع برابر است با:

$$AT_t = AT_{ag} + AT_{t_s} + AT_{t_r} + AT_{c_s} + AT_{c_r} \quad (43)$$

$$\text{sat.f} = \frac{AT_t}{AT_{ag}} \quad (44)$$

۳-۹- محاسبه پارامترهای مدار معادل

برای محاسبه مقاومت سیم پیچ اصلی، باید طول کلی سیم در زیر هر قطب را به دست آورد [۳]:

$$L_{mt} = T_{pcm} \times (D_o - D_i + 2W_{cui} + 2W_{cuo} + l_{ei} + l_{eo}) \quad (45)$$

ابتدا مقاومت ویژه در دمای کارکرد موتور به دست آورده می‌شود. سپس با توجه $S_m = \frac{\pi d_m^2}{4}$ داریم:

$$R_{ms} = \rho_{75^\circ C} \times \frac{L_{mt} \times P}{S_m} \quad (46)$$

برای محاسبه مقاومت سیم پیچ کمکی ابتدا طول کلی سیم در زیر هر قطب به وسیله رابطه زیر به دست می‌آید [۳]:

$$L_{at} = T_{pca} \times (D_o - D_i + 2W_{cui} + 2W_{cuo} + l_{ei} + l_{eo}) \quad (47)$$

و با توجه به $S_a = \frac{\pi d_a^2}{4}$ داریم:

$$R_{sa} = \rho_{75^\circ C} \times \frac{L_{at} \times P}{S_a} \quad (48)$$

و در نهایت باید اثر پوستی را نیز لحاظ نماییم. در این روابط W_{cui} و W_{cuo} به ترتیب اندازه لبه داخلی و خارجی کلاف در جهت شعاعی می‌باشند. طول هادی حامل به صورت زیر به دست می‌آید [۴]:

$$l_{e,i} = \frac{2 \times \pi (D_i/2 + T_{pc} \times d_c + W_{cui})}{S_1 / \text{coil span}} \quad (49)$$

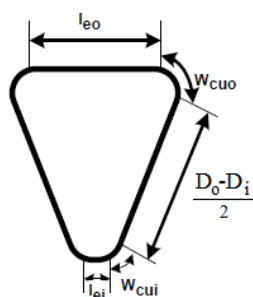
$$l_{e,o} = \frac{2 \times \pi (D_o/2 + T_{pc} \times d_c + W_{cuo})}{S_1 / \text{coil span}} \quad (50)$$

که d_c قطر هادی و coil span دهانه سیم پیچ است. اندازه لبه داخلی و خارجی کلاف به صورت زیر به دست می‌آید [۴]:

$$W_{cui} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{D_i^2 + \frac{2A(D_o + D_i)}{K_{cu} J}} - D_i \right) \quad (51)$$

$$W_{cuo} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{D_o^2 + \frac{2A(D_o + D_i)}{K_{cu} J}} - D_o \right) \quad (52)$$

پارامترهای مربوط به ابعاد سیم پیچی در شکل (۶) نشان داده شده است:



شکل (۶): ابعاد سیم پیچی

Figure (6): The winding dimensions

برای محاسبه مقاومت روتور که بعد از محاسبه تلفات و تقسیم آن بر مربع جریان به دست می‌آید، طبق [۳] داریم:

$$R_r = \rho_{75^\circ C} S_2^2 \left(\frac{D_o - D_i}{2A_b N_b \cos \alpha_{skew}} + \frac{1}{\pi} \frac{K_{R_{in}} D_{m_{in}} + K_{R_{out}} D_{m_{out}}}{P^2 A_{er}} \right) \quad (53)$$

که در این رابطه A_b و A_{er} سطح مقطع میله و حلقه انتهایی، $D_{m_{in}}$ و $D_{m_{out}}$ قطر متوسط حلقه‌های داخلی و خارجی، $K_{R_{in}}$ و $K_{R_{out}}$ ضریب حلقه درونی و بیرونی هستند. در نتیجه مقدار مقاومت منتقل شده از دید سیم پیچ اصلی به سمت استاتور برابر است با:

$$R_{rm}' = P \times N_m^2 \times K_{Wm}^2 \times R_r \quad (54)$$

۳-۱۰- محاسبه راکتانس‌ها

راکتانس‌های ناشی موتور شامل راکتانس ناشی شیار (X_{SS})، راکتانس زیگزاگ (X_{ZZ})، راکتانس کله سیم‌ها (X_e)، راکتانس ناشی کمربندی (X_{belt})، راکتانس کج شدگی (X_{skew})، راکتانس مغناطیس‌کننده (X_M) و راکتانس ناشی روتور (X_r) است.

$$X_{SS} = 2.512 \times K_x \times (K_{s1} C_x + K_{s2} \frac{S_1}{S_2}) \times \frac{D_o - D_i}{2S_1} \quad (55)$$

که در این رابطه:

$$K_x = 2\pi f (N_m K_{wm})^2 \times 10^{-8} \quad (56)$$

$$K_{s1} = \text{constA} \times \frac{h_{12}}{b_{12}} + \frac{h_{10} + h_{11}}{b_{12}} \quad (57)$$

$$K_{s2} = \text{constB} \times \frac{h_{22}}{b_{22}} + \frac{h_{20}}{b_{20}} + \frac{2h_{21}}{b_{20} + b_{21}} \quad (58)$$

C_x ضریب تصحیح دلخواه است و برای سیم پیچی دو فاز ۰/۷۵ است، K_{s1} و K_{s2} ثابت شیارهای استاتور و روتور است [۳]. راکتانس زیگزاگ به وضعیت نسبی استاتور و روتور و پهنای دندانه‌های روبروی هم بستگی دارد و برای محاسبه آن داریم:

$$X_{ZZ} = K_x \times K_{ZZ} \times \frac{0.838 \times (D_o - D_i)}{2S_1 L_g} \quad (59)$$

که در این رابطه ثابت K_{ZZ} بر اساس منبع [۳] از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_{ZZ} = \frac{\pi(D_o + D_i)(S_1 + S_2) - 2S_1 S_2 (b_{10} + b_{20})}{\pi(D_o + D_i)(S_1 + S_2)} \quad (60)$$

راکتانسی که به دلیل شار ناشی در کله سیم‌ها بوجود می‌آید، با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_e = 1.236 \times K_x \times D_g \times \frac{T_{pc}/T_{pp}}{S_1 P} \quad (61)$$

که در این رابطه T_{pc} تعداد دور بر کوئل و T_{pp} تعداد دور بر قطب و D_g قطر اصلی فاصله هوایی است. راکتانس تفاضلی یا کمربندی به علت تفاوت در شکل موج نیروی محرکه روتور و استاتور، که بر روی هم تزویج ایجاد می‌کنند، به وجود می‌آید و مقدار آن برابر است با:

$$X_{belt} = 9.29 \times 10^{-3} \times K_x K_B \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4K_{ag} L_g \times \text{sat.f} \times P} \quad (62)$$

که K_B ثابت نشت کمربندی که مقدار آن برابر میانگین تعداد شیار در هر قطب است. راکتانس کج شدگی که بدلیل کج بودن میله‌های روتور نیروی محرکه تولید می‌کند، برابر است با [۳]:

$$X_{skew} = \frac{0.2546 \times \pi(D_o^2 - D_i^2)}{4K_{ag} L_g \times \text{sat.f} \times P} \times \frac{K_x K_P}{4} \times \left(\frac{\alpha_{skew}}{100}\right)^2 \quad (63)$$

که K_P ضریب شار اولیه است. از جمع کلیه این راکتانس‌ها، راکتانس ناشی کل استاتور محاسبه می‌گردد.

$$X_{Lm} = X_{ss} + X_{zz} + X_e + X_{belt} + X_{skew} \quad (64)$$

راکتانس مغناطیس‌کنندگی برابر است با [۳]:

$$X_M = \frac{0.2546 \times \pi(D_o^2 - D_i^2) K_x}{4K_{ag} L_g \times \text{sat.f} \times P} \times \frac{\sin(\alpha_{skew}/2)}{\pi \times \alpha_{skew} / 360} \quad (65)$$

۳-۱۱- محاسبه خازن

با توجه به این که نسبت تبدیل تعداد دور سیم پیچ کمکی به اصلی برابر a است و این مقدار برابر نسبت تبدیل ولتاژها و معکوس

جریان‌ها است، در نتیجه خواهیم داشت:

$$I_{\text{aph}} = \frac{I_{\text{mph}}}{a} \quad (66)$$

$$V_{\text{an}} = V_{\text{mn}} \times a \quad (67)$$

بنابراین مقدار ولتاژ دو سر خازن برابر است با:

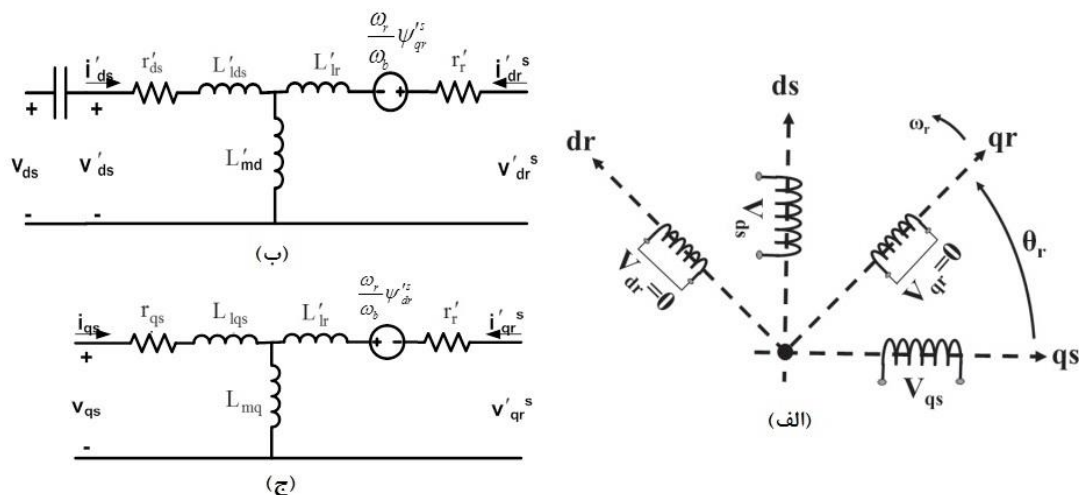
$$V_c = \sqrt{V_s^2 + V_{\text{an}}^2} \quad (68)$$

و ظرفیت خازن برابر است با:

$$C = \frac{I_{\text{aph}}}{2\pi f \times V_c} \quad (69)$$

۴- مدل معادل عملکردی پیشنهادی

مدار معادل d-q ماشین القایی تکفاز دائم که در حالت گذرا و دائم قابل استفاده است، با اعمال اثر خازن، به صورت شکل (۷) می‌باشد [۳۰]:



شکل (۷): مدار معادل d-q ماشین القایی تکفاز شار محوری

(الف) مدار معادل ماشین القایی تکفاز، (ب) مدار معادل محور d، (ج) مدار معادل محور q [۳۰]

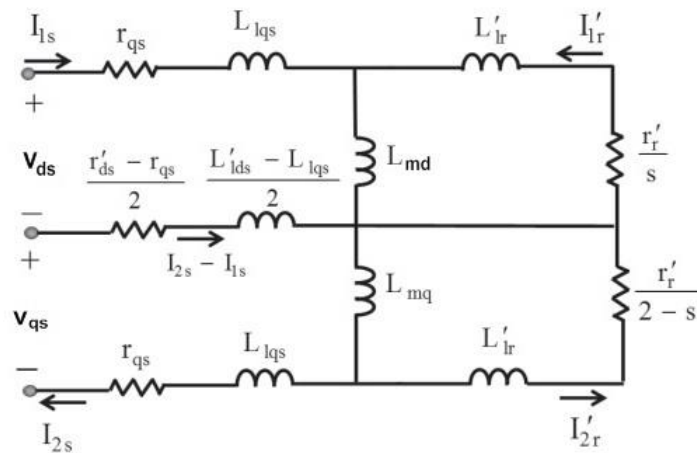
Figure (7): d-q equivalent circuit of single-phase axial flux induction machine
a) Equivalent circuit of single-phase induction machine b) b-axis equivalent circuit c) q-axis equivalent circuit

براین اساس مدار معادل پیشنهادی جهت تحلیل موتور القایی تک فاز شار محوری در حالت دائمی به صورت شکل (۸) پیشنهاد می‌شود. در نتیجه با استفاده از روابط فوق، مقادیر پارامترهای موتور ۶ قطب و ۵۶۰ وات محاسبه و در جدول (۲) نشان داده شده است.

۵- بهینه‌سازی طراحی موتور القایی شار محوری

۵-۱- تابع هدف ۱۸

برای به‌دست آوردن یک طراحی بهینه جهت افزایش بازده موتور القایی شار محوری، با توجه به مقادیر مربوط به حجم هسته (هزینه)، ضریب توان و بازده، تابع هدف به شرح زیر تعریف می‌شود:



شکل (۸): مدار معادل پیشنهادی موتور القایی تکفاز شار محوری در حالت دائمی

Figure (8): Equivalent circuit of the proposed single-phase axial flux induction motor in steady state

Table (2): The parameters calculated for the 6-pole and 560 watts AFIM with permanent capacitor
جدول (۲): پارامترهای محاسبه شده برای موتور ۶ قطب ۵۶۰ وات تکفاز شار محوری خازن دائم

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
نسبت تبدیل اسکالر	a	-	۱/۲
تعداد دور سیم‌پیچ اصلی	N_m	turn	۷۲
قطر سیم‌پیچ اصلی	d_m	mm	۰/۹
تعداد دور سیم‌پیچ کمکی	N_a	turn	۸۷
قطر سیم‌پیچ کمکی	d_a	mm	۰/۷
مقاومت سیم‌پیچ اصلی استاتور	r_{sm}	Ω	۷/۲۲
مقاومت سیم‌پیچ کمکی استاتور	r_{sa}	Ω	۱۴/۵
مقاومت سیم‌پیچ اصلی روتور	r'_{rm}	Ω	۱۳/۹
مقاومت سیم‌پیچ کمکی روتور	r'_{ra}	Ω	۱۹/۷
راکتانس نشتی استاتور	X_{lm}	Ω	۱۳/۵
راکتانس نشتی روتور	X'_r	Ω	۳/۳۵
راکتانس مغناطیس‌کنندگی	X_M	Ω	۱۳۰
راکتانس خازن	X_C	Ω	۱۲۷/۳
مقدار خازن	C	μF	۲۵

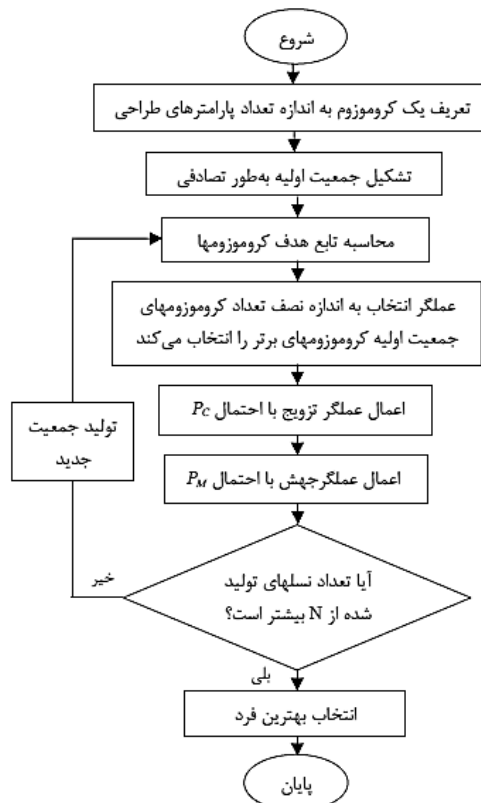
$$J(x_1, \dots, x_{10}) = \frac{V_{core}(x_1, \dots, x_{10})}{\eta(x_1, \dots, x_{10}) \times \cos \varphi(x_1, \dots, x_{10})} \quad (70)$$

که در این رابطه V_{core} حجم هسته، $\cos \varphi$ ضریب توان و x_1, \dots, x_{10} متغیرهای طراحی بهینه که به ترتیب عبارت‌اند از: نسبت سیم‌پیچی، طول فاصله هوایی، عرض شیار استاتور و روتور، نسبت قطر بیرونی به قطر داخلی هسته، قطر سیم‌پیچ اصلی و کمکی، چگالی جریان استاتور، چگالی شار فاصله هوایی و مقدار خازن.

۵-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روشی است که با استفاده از آن می‌توان دستگاه معادلات غیرخطی و مسائل بهینه‌سازی پیچیده را حل نمود. این الگوریتم بهینه‌سازی، در بسیاری از مسائل عملی از جمله طراحی موتورهای القایی تکفاز با استفاده از سه عملگر تولید مثل (انتخاب^{۱۹}، تزویج^{۲۰} و جهش^{۲۱}) به نتایج خوبی می‌رسد. این عملگرها که از فرآیند تکامل طبیعی اقتباس شده‌اند،

جمعیت کروموزومها^{۲۲} را به‌سوی تکامل، که به‌معنی بزرگتر شدن تابع معیار است، پیش می‌برند. در شکل (۹) فلوچارت مربوط به نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای مربوط به عملگرهای الگوریتم ژنتیک با توجه به [۳۱] در جدول (۳) تعریف شده است:



شکل (۹): فلوچارت مربوط به نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک

Figure (9): The flowchart of the performance of the genetic algorithm

Table (3): The values related to the genetic algorithm operators

جدول (۳): مقادیر مربوط به عملگرهای الگوریتم ژنتیک

مقدار	نماد	پارامتر
۵۵	P	جمعیت اولیه
۱۵۰۰	G	تعداد نسل‌ها
۰/۵	P_C	نرخ ترکیب
۰/۱	P_M	نرخ جهش

۵-۳- الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات بهبود یافته (IPSO^{۲۳})

الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) از جمله الگوریتم‌های جستجوی تصادفی الهام گرفته از طبیعت است. در این الگوریتم جمعیتی L فردی از بردارهای X در نظر گرفته می‌شود و بردار X یک بردار n عضوی است. در ابتدا جمعیت ذرات به‌صورت تصادفی مقادیردهی شده و در روند اجرای الگوریتم ذرات بسوی هدف که همان یافتن نقطه بهینه می‌باشد، هدایت می‌گردند. موقعیت هر ذره در واقع بردار X مربوط به آن است و ارزش آن نیز مقدار تابع برازش^{۲۴} در موقعیت مربوطه است. در روند اجرای الگوریتم می‌توان بهترین تجربه هر ذره و موقعیت مربوط به آن را ذخیره نمود. بهترین تجربه ذره i ام، $pbest_i$ و موقعیت متناظر مربوط به آن را $xpbest_i$ گویند. به‌همین ترتیب بهترین تجربه موجود در بین تمام ذرات و موقعیت مربوط به آن به‌ترتیب با $gbest_i$ و $xgbest_i$ نشان داده می‌شود. در حرکت به‌سوی نقطه مینیمم، سرعت حرکت هر ذره و موقعیت جدید هر ذره با استفاده از روابط زیر مشخص می‌شود [۳۲-۳۴]:

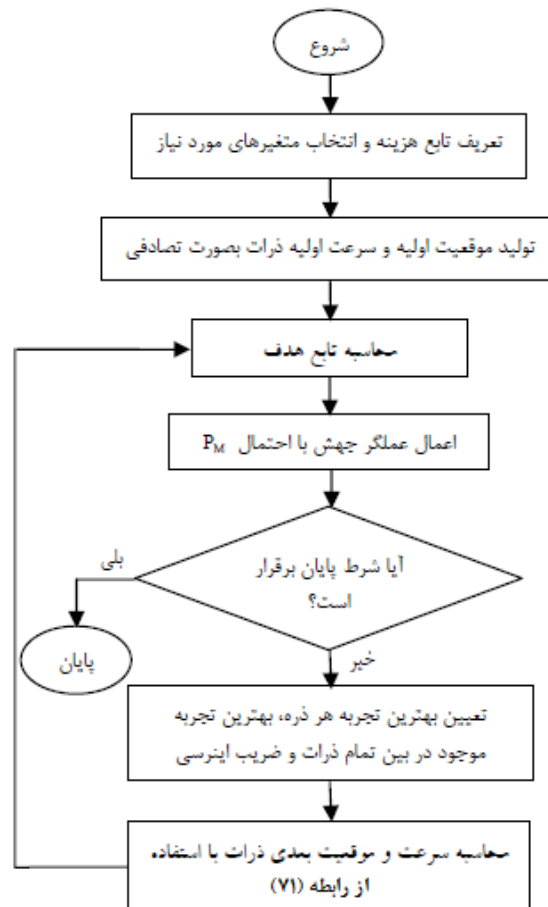
$$V_i(t+1) = \omega.V_i(t) + r_1 C_1 (Xpbest_i - X_i(t)) + r_2 C_2 (Xgbest_i - X_i(t)) \quad (71)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1)$$

که در آن ω ضریب اینرسی^{۲۵} ذره، C_1 و C_2 ضرایب شتاب هستند. برای تصادفی کردن ماهیت سرعت، ضرایب C_1 و C_2 در اعداد تصادفی r_1 و r_2 ضرب شده‌اند. معمولاً در اجرای الگوریتم PSO، مقدار ω در طی یادگیری تنظیم می‌شود و به صورت خطی از یک تا نزدیکی صفر کاهش می‌یابد. به طور کلی ضریب اینرسی ω مطابق زیر تنظیم می‌گردد:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (72)$$

که در آن iter_{\max} ماکزیمم شماره تکرار، iter شماره تکرار کنونی، ω_{\max} و ω_{\min} به ترتیب مقدار ماکزیمم و مینیمم ضریب اینرسی می‌باشند. با توجه به رابطه فوق می‌توان فهمید که بهترین موقعیت ذرات همزمان با $pbest_i$ اتفاق می‌افتد، در این حالت ذرات تنها در نقطه ای از وزن اینرسی ω باقی می‌مانند. اگر سرعت ذرات خیلی به صفر نزدیک شود، این ذرات قادر به جابجایی جهت رسیدن به $gbest_i$ نخواهند بود، این بدان معناست که ذرات به‌بهترین تجربه هر ذره همگرا شده و از ذرات گروهی دور خواهند شد، در این حالت سرعت همگرایی کاهش خواهد یافت. در این مقاله برای جبران این مشکل از الگوریتم تجمع ذرات بهبودیافته (IPSO) استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی مطابق الگوریتم PSO بوده با این تفاوت که با عملگر جهش که یکی از عملگرهای الگوریتم ژنتیک می‌باشد، تلفیق شده است. این عملگر سبب می‌شود که ذرات به خارج از مکان بهینه محلی^{۲۶} پرش کرده و در دیگر نواحی فضای بهینه‌سازی به جستجو بپردازند. این عمل موجب افزایش سرعت همگرایی^{۲۷} و دقت الگوریتم می‌شود. فلوجارت روش پیشنهادی در شکل شماره (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): فلوجارت پیشنهادی در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته (IPSO)
 Figure (10): The proposed flowchart in the improve particle swarm optimization algorithm (IPSO)

در این الگوریتم، مقادیر پارامترهای بکار رفته شده برای به‌دست آوردن بهترین جواب برای مساله بهینه‌سازی با توجه به [۲۸] به‌صورت جدول (۴) هستند.

Table (4): The values of the parameters used in the improve particle swarm optimization algorithm

جدول (۴): مقادیر پارامترهای بکار رفته شده در الگوریتم بهینه‌سازی PSO بهبود یافته

مقدار	نماد	پارامتر
۰/۱	P_M	احتمال جهش
۰/۷	ω_{max}	ماکزیمم ضریب اینرسی
۰/۴	ω_{min}	مینیمم ضریب اینرسی
۲	C_1	ضریب شتاب ۱
۲	C_2	ضریب شتاب ۲
تصادفی بین ۰ و ۱	r_2 و r_1	ضرایب تصادفی

۵-۴- مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی

با اجرای الگوریتم‌های ژنتیک و تجمع ذرات بهبود یافته، با توجه به محدودیت‌های مربوط به هر یک از متغیرهای تابع هدف، مقادیر بدست آمده برای این متغیرها در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. در نتیجه با استفاده مقادیر بدست آمده برای متغیرهای تابع هدف، مقادیر بهینه پارامترهای موتور محاسبه و در جدول (۶) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر به‌دست آمده و مقایسه مقادیر طراحی بهینه می‌توان گفت با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، پارامترهای تابع هدف بهبود یافته‌اند. بر این اساس بازده موتور از ۶۷٪ به ۷۱٪ در طراحی الگوریتم ژنتیک و به ۷۷٪ در طراحی الگوریتم IPSO افزایش یافته‌است، به عبارت دیگر مقدار بازده به ترتیب در طراحی‌های الگوریتم ژنتیک و IPSO حدود ۶٪ و ۱۵٪ افزایش یافته‌است. همچنین ضریب توان از ۰/۸۵ به ۰/۹۱ در طراحی الگوریتم ژنتیک و به ۰/۹۴ در طراحی الگوریتم IPSO افزایش داشته‌است. علاوه بر این حجم هسته به ترتیب در طراحی‌های الگوریتم ژنتیک و IPSO حدودا ۱۵٪ و ۱۲٪ کاهش یافته است. ضریب توان موتور نیز از ۰/۸۵ به ۰/۹۱ در طراحی الگوریتم ژنتیک و به ۰/۹۴ در طراحی الگوریتم IPSO افزایش یافته است، پس می‌توان گفت مقدار بازده به ترتیب در طراحی‌های الگوریتم ژنتیک و IPSO حدود ۷٪ و ۱۱٪ افزایش یافته است.

مقایسه بین نمودارهای بازده حاصل از طراحی کلاسیک و طراحی‌های بهینه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان گفت بازده در نقطه کار پایدار، افزایش یافته است. این افزایش بازده در طراحی الگوریتم IPSO نسبت به الگوریتم ژنتیک بیشتر است.

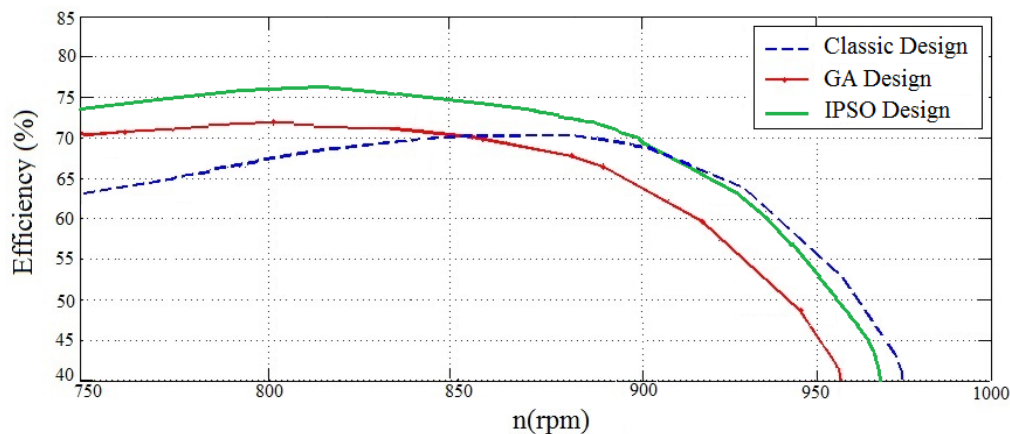
Table (5): The limitations and parameters of single-phase axial flux induction motor based on genetic algorithm and IPSO

جدول (۵): محدودیت‌ها و مقادیر طراحی شده موتور القایی تک‌فاز شار محوری براساس الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات بهبود یافته

نام متغیر	مقیاس	محدودیت‌ها	طراحی کلاسیک	طراحی الگوریتم ژنتیک	طراحی الگوریتم IPSO
نسبت سیم‌پیچی	-	$1 \leq a \leq 2$	۱/۲	۱	۱
طول فاصله هوایی	mm	$0.5 \leq L_g \leq 4$	۱	۰/۶	۰/۵۵
عرض شیار استاتور	mm	$4 \leq b_{12} \leq 6$	۵	۵/۵	۵/۶
عرض شیار روتور	mm	$3 \leq b_{22} \leq 5$	۴/۵	۵	۵
قطر بیرونی به داخلی	-	$1.1 \leq \lambda \leq 3$	۱/۷۳	۱/۹۵	۱/۹۸
قطر سیم‌پیچی اصلی	mm	$0.5 \leq d_m \leq 1$	۰/۷	۰/۵۴	۰/۵۵
قطر سیم‌پیچی کمکی	mm	$0.5 \leq d_a \leq 1$	۰/۹	۰/۸۱	۰/۷۷
چگالی جریان استاتور	A / mm ²	$4 \leq J_s \leq 8$	۷	۸	۸
چگالی شار فاصله هوایی	T	$0.6 \leq B_g \leq 1$	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۹۲
مقدار خازن	μF	$10 \leq C \leq 40$	۲۵	۲۰	۲۰

Table (6): The results of optimization parameters of a 6-pole and 560 watts AFIM with permanent capacitor
جدول (۶): نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای موتور ۶ قطب ۵۶۰ وات تکفاز شار محوری خازن دائم

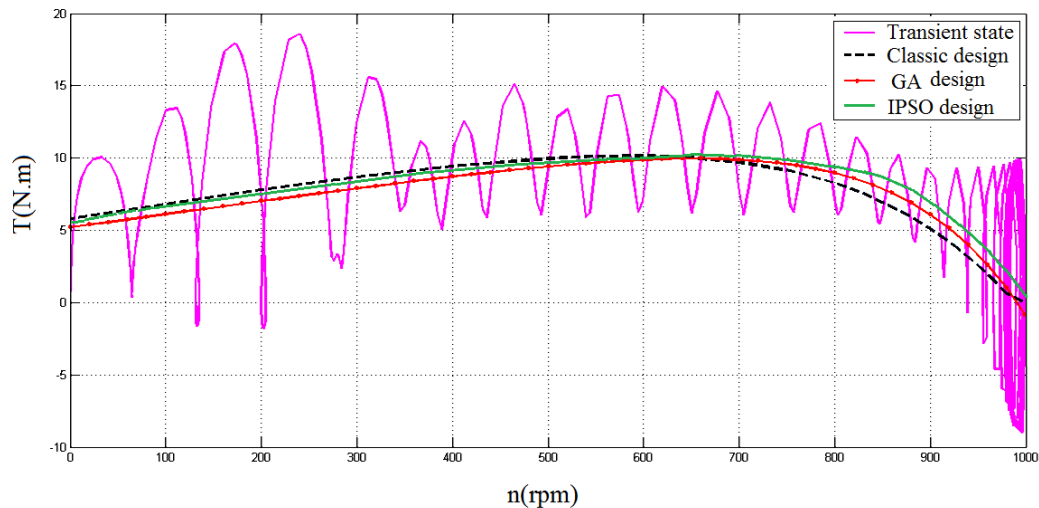
نام متغیر	نماد	مقیاس	طراحی کلاسیک	طراحی الگوریتم ژنتیک	طراحی الگوریتم IPSO
دور سیم‌پیچ اصلی	N_m	turn	۷۲	۶۵	۶۲
دور سیم‌پیچ کمکی	N_a	turn	۸۷	۶۵	۶۲
مقاومت اصلی استاتور	r_{sm}	Ω	۷/۲۲	۱۰/۴۵	۹/۸۷
مقاومت کمکی استاتور	r_{sa}	Ω	۱۴/۵	۱۰/۴۵	۹/۸۷
مقاومت اصلی روتور	r'_{rm}	Ω	۱۳/۹	۱۱/۴۶	۱۱/۳۲
مقاومت کمکی روتور	r'_{ra}	Ω	۱۹/۷	۱۱/۴۶	۱۱/۳۲
راکتانس نشتی استاتور	X_{lm}	Ω	۱۳/۵	۱۰/۲۶	۱۱/۴۳
راکتانس نشتی روتور	X'_r	Ω	۳/۳۵	۴/۵۳	۴/۱۲
راکتانس مغناطیس‌کنندگی	X_M	Ω	۱۳۰	۱۹۲	۱۸۶/۵
گشتاور راه اندازی	T_s	N.m	۴/۵۶	۵/۳۵	۴/۹۷
ضریب توان	$\cos \varphi$	-	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۹۴
بازده	η	-	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۷۷
حجم هسته	V_{core}	cm^3	۴۲۷	۳۷۲	۳۸۴



شکل (۱۱): مقایسه نمودارهای بازده - سرعت در طراحی‌های کلاسیک و بهینه موتور القایی تکفاز شار محوری
Figure (11): The comparison of efficiency-speed curves in classical and optimal designs of AFIM

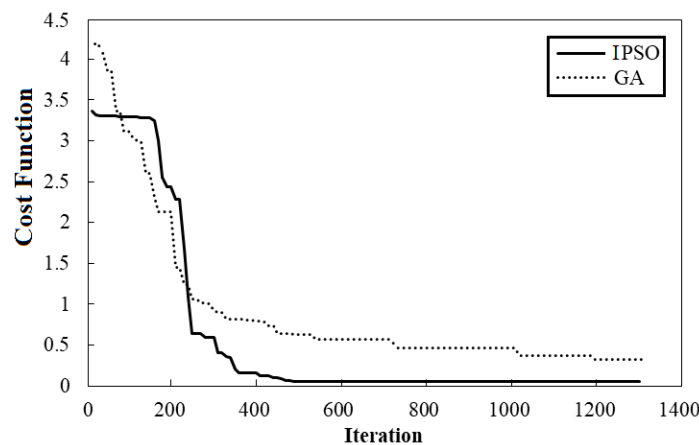
همچنین مقایسه بین نمودارهای گشتاور حاصل از طراحی کلاسیک و طراحی‌های بهینه در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است. با توجه به این نمودار می‌توان گفت در شرایط کار پایدار، گشتاور تولیدی نیز در طراحی الگوریتم IPSO افزایش بیشتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و طراحی کلاسیک داشته‌است.

تغییرات مقدار تابع هدف در طی اجرای الگوریتم‌های ژنتیک و IPSO در شکل (۱۳) رسم شده‌است. در این شکل روند کاهش مقدار تابع هدف طی اجرای الگوریتم‌ها قابل مشاهده می‌باشد. همچنین تغییرات ناچیز مقدار تابع هدف در تکرارهای پایانی گویای این است که الگوریتم‌های مورد استفاده به خوبی به پاسخ بهینه نزدیک شده‌است و پاسخ‌های به دست آمده از همگرایی قابل قبولی برخوردار هستند. همچنین کاهش تعداد تکرارهای الگوریتم IPSO نسبت به الگوریتم ژنتیک از ۱۲۰۰ به ۴۰۰ موید این واقعیت است که الگوریتم IPSO از سرعت و همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم ژنتیک برخوردار است.



شکل (۱۲): مقایسه نمودارهای گشتاور- سرعت در طراحی های کلاسیک و بهینه موتور القایی تکفاز شار محوری
Figure (12): The comparison of torque-speed curves in classical and optimal designs of AFIM

الگوریتم PSO با ایجاد ارتباط بین سرعت و موقعیت ذرات با سرعتی که حاصل از برآیند سرعت قبلی و بهترین موقعیت تجربه شده هر ذره و گروه (تمامی ذرات) است سبب همگرایی سریعتر الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌شود. همچنین علت بیشتر بودن سرعت همگرایی روش پیشنهادی IPSO را می‌توان استفاده از عملگر جهش در روند بهینه‌سازی دانست، زیرا این عملگر سبب می‌شود که ذرات با پرش به‌خارج از مکان بهینه محلی، درگیر این نقاط بهینه محلی نشده و در نواحی دیگر فضای بهینه‌سازی به جستجو نقاط بهینه سراسری^{۲۸} پرداخته که این عمل علاوه بر افزایش سرعت همگرایی، موجب افزایش دقت همگرایی نیز می‌شود.



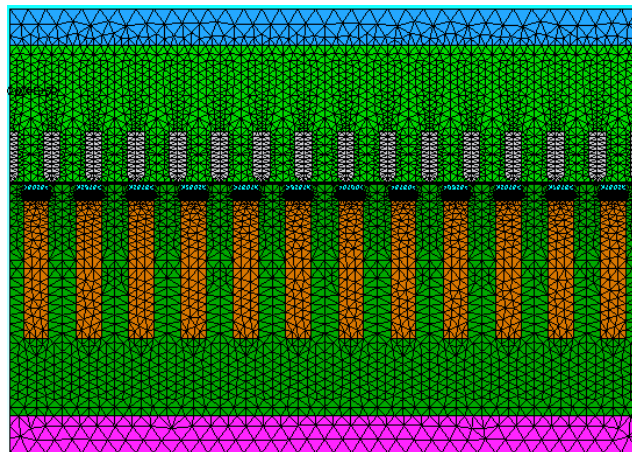
شکل (۱۳): تغییرات مقدار تابع هدف در طی اجرای الگوریتم‌های ژنتیک و تجمع ذرات بهبود یافته
Figure (12): Changes in the value of the cost function during the implementation of genetic and IPSO algorithms

۶- آنالیز اجزای محدود

آنالیز اجزای محدود، به وسیله تبدیل معادلات انتگرالی یا دیفرانسیلی حاکم بر مسائل پیچیده به تعداد زیادی معادله جبری ساده و تقسیم مدل به قسمت‌های کوچکتر و آنالیز آن‌ها، این معادلات را حل نموده و جواب بسیار دقیقی را تولید می‌نماید که شامل سه مرحله است:

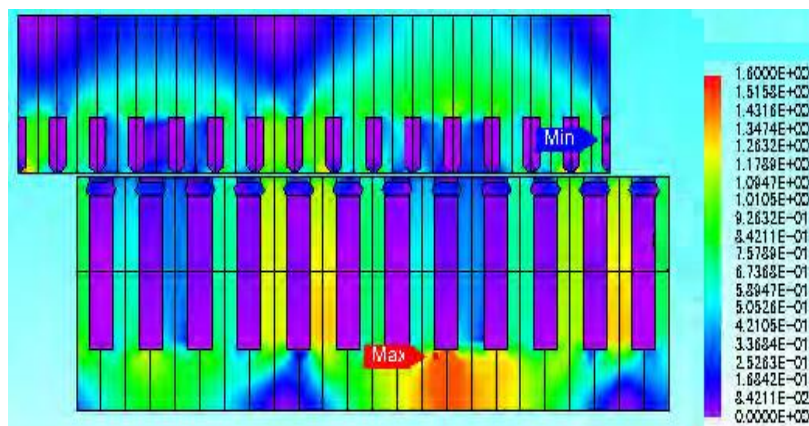
- ۱- مرحله پیش پردازش^{۲۹}: ترسیم شکل دو بعدی یا سه بعدی مساله، تعیین شرایط مرزی، مش بندی و تعیین خواص مواد
- ۲- مرحله حل کننده^{۲۰}: شامل تشکیل ماتریس‌ها، حل معادلات جبری حاکم بر مش‌ها و گره‌ها و ارائه پاسخ‌های اولیه شامل

مجموعه‌ای از پتانسیل گرہ‌ها
 ۳- مرحله پس پردازش^{۳۱}: شامل تحلیل نتایج، محاسبه مقادیر مقاومت، اندوکتانس، تلفات، نیرو و گشتاور و ...
 در این مقاله برای شبیه‌سازی موتور شار محوری، از مدل دو بعدی استفاده می‌شود که مش‌بندی آن در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی تعداد کل گرہ‌ها برابر ۵۹۶۱ و تعداد المان‌ها برابر ۱۰۷۵۳ است. نمودار مربوط به چگالی شار میدان مغناطیسی در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.
 همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، حداکثر چگالی شار دندان‌های استاتور برابر ۱/۵۵ تسلا است. از آنجا که چگالی شار بیشینه مواد تشکیل دهنده هسته ۱/۷ تسلا می‌باشد، مشکلی در مورد اشباع هسته وجود ندارد.



شکل (۱۴): مش‌بندی مدل دو بعدی رسم شده

Figure (14): Two-dimensional model meshing is drawn



شکل (۱۵): نمودار چگالی شار مغناطیسی مدل دو بعدی

Figure (15): The magnetic flux density diagram of the two-dimensional model

۷- نتیجه گیری

طراحی موتورهای القایی با استفاده از روش‌های کلاسیک، کارچندان مشکلی نیست که فقط نیاز به انتخاب درست مقادیر اولیه و کمی تکرار دارد. ولی بهینه‌سازی این موتورها با روش کلاسیک کاری سخت و بسیار وقت‌گیر است. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم‌های ژنتیک و تجمع ذرات فرآیند بهینه‌سازی را تسریع می‌بخشد.
 در این مقاله طراحی بهینه یک موتور القایی تک فاز شار محوری خازن دائم مورد بررسی قرار گرفت و ضمن بیان کلیه روابط حاکم بر این دسته از موتورها و ارائه یک مدار معادل پیشنهادی در حالت دائمی، یک الگوریتم طراحی جامع جهت افزایش بازده، افزایش ضریب توان و کاهش حجم هسته این دسته از موتورها ارائه گردید. در ادامه با استفاده از روش پیشنهادی جهت

کاهش فاصله هوایی، پس از طراحی اولیه موتور، کلیه پارامترهای ماشین که شامل ابعاد هندسی استاتور و روتور، پارامترهای سیم پیچ اصلی و کمکی و مدار معادل آن است، با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و تجمع ذرات بهبود یافته، بهینه‌سازی گردیده و با یکدیگر مقایسه شد. بر این اساس با توجه به سرعت همگرایی بیشتر و دقت بالاتر مقادیر به‌دست آمده در روش بهینه‌سازی الگوریتم IPSO، این الگوریتم برای طراحی بهینه موتور القایی شار محوری پیشنهاد می‌شود. در پایان نتایج به‌دست آمده توسط آنالیز در محیط متلب و همچنین فضای دو بعدی المان محدود مورد تجزیه و تحلیل و تایید قرار گرفت.

References

مراجع

- [1] Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani, "A survey on axial flux induction motors", *Electrical Review*, pp. 300-305, Feb. 2012.
- [2] R Wallace, L Mopan, G. Cea, F. Perez, "Design and construction of medium power axial flux induction motors", *Proceeding of the IEEE/ICEMD*, no. 341, pp. 260-265, London, UK, Sept. 1991.
- [3] Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani, "Optimal design of adjustable air-gap, two-speed, capacitor-run, single-phase axial flux induction motors", *IEEE Trans. on energy conversion*, vol. 28, no. 3, Sept. 2013 (doi: 10.1109/TEC.2013.2260826).
- [4] F. Tootoonchian, Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani, "Design, analysis, and implementation of extra low air-gap single-phase axial-flux induction motors for low-cost applications", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 26, no. 12, pp. 2516-2531, Sec. 2016 (doi: 10.1002/etep.2217).
- [5] P. Neelima, C. Manjeera, V.R. Babu, "Modelling of axial flux induction machines and its application as differential in electrical vehicles", *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, vol. 1, no. 12, pp. 1-10, Dec. 2014.
- [6] S. M. Mirimani, A. Vahedi, F. Marignetti, "Effect of inclined static eccentricity fault in single stator-single rotor axial flux permanent magnet machines", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 48, no. 1, pp. 143-148, Jan. 2012 (doi: 10.1109/TMAG.2011.2161876).
- [7] J. D. Bisschop, P. Sergeant, A. Hemeida, L. Dupre, "Analytical model for combined study of magnet demagnetization and eccentricity defects in axial flux permanent magnet synchronous machines", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 53, no. 9, May. 2017 (doi: 10.1109/TMAG.2017.2709267).
- [8] M. Gulec, E. Yolacan, M. Aydin, "Design, analysis and real time dynamic torque control of single-rotor-single-stator axial flux eddy current brake", *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 9, pp. 869-876, Oct. 2016 (doi: 10.1049/iet-epa.2016.0022).
- [9] P. Hekmati, R. Yazdanpanah, M. Mirsalim, "Design and analysis of double-sided slotless axial-flux permanent magnet machines with conventional and new stator core", *IET Electric Power Applications*, vol. 9, no. 3, pp. 193-202, Mar. 2015 (doi: 10.1049/iet-epa.2014.0216).
- [10] A. Nobahari, A. Darabi, A. Hassannia, "Axial flux induction motor, design and evaluation of steady state modeling using equivalent circuit", *Proceeding of the IEEE/PEDSTC*, pp. 353-358, Mashhad, Iran, Feb. 2017 (doi: 10.1109/PEDSTC.2017.7910351).
- [11] D. K. Banchhor, A. Dhabale, "Design, modeling, and analysis of dual rotor axial flux induction motor", *Proceeding of the IEEE/PEDES*, Chennai, India, Dec. 2018 (doi: 10.1109/PEDES.2018.8707644).
- [12] J. Mei, C. H. T. Lee, J. L. Kirtley, "Design of axial flux induction motor with reduced back iron for electric vehicles", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 293-301, Jan. 2020 (doi: 10.1109/TVT.2019.2954084).
- [13] C. Hong, W. Huang, Z. Hu, "Parameters and performance analysis of a dual stator composite rotor axial flux induction motor by an analytical method", *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 8, pp. 1158-1165, Sept. 2018 (doi: 10.1049/iet-epa.2017.0786).
- [14] C. Hong, W. Huang, Z. Hu, "Calculation methods of equivalent circuit parameters for a dual stator solid rotor axial flux induction motor", *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 16, pp. 1977-1983, Oct. 2018 (doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5103).
- [15] C. Hong, W. Huang, Z. Hu, "Design and analysis of a high-speed dual stator slotted solid rotor axial flux induction motor", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 71-79, Mar. 2019 (doi: 10.1109/TTE.2018.2880301).
- [16] C. Hong, W. Huang, Z. Hu, "Performance calculation of a dual stator solid rotor axial flux induction motor using the multi-slice and multi-layer method", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 55, no. 2, pp. 1-9, Feb. 2019 (doi: 10.1109/TMAG.2018.2872457).
- [17] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, R. Ravji, W. L. Soong, "Line-start axial-flux PM motors: introduction of a new machine topology", *Proceeding of the IEEE/ECCE*, pp. 7027-7034, Baltimore, MD, USA, Oct. 2019 (doi: 10.1109/ECCE.2019.8912992).

- [18] B. Dianati, S. Kahourzade, A. Mahmoudi, "Analytical design of axial-flux induction motors", Proceeding of the IEEE/VPPC, Hanoi, Vietnam, Oct. 2019 (doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952172).
- [19] B. Dianati, S. Kahourzade, A. Mahmoudi, "Axial-flux induction motors for electric vehicles", Proceeding of the IEEE/VPPC, Hanoi, Vietnam, Oct. 2019 (doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952278).
- [20] B. Dianati, S. Kahourzade, A. Mahmoudi, "Optimization of axial-flux induction motors for the application of electric vehicles considering driving cycles", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 35, no. 3, pp. 1522-1533, Sept. 2020 (doi: 10.1109/TEC.2020.2976625).
- [21] M. V. Deshpande, "Design & testing electrical machine", Phi Learning, 2th Edition, New Delhi: Wheeler Pub, 2010.
- [22] L. Xinzheng, S. Shaoping, C. Dunli, "Integrated cad software for axial flux induction machines", Proceeding of the IEEE/ICEMS, pp. 1136-1139, Shenyang, China, Aug. 2001 (doi: 10.1109/ICEMS.2001.971879).
- [23] C. C. Chan, "Axial-field electrical machines-design and applications", IEEE Trans. on energy conversion, vol.2, no.2, pp.294-300, June 1987 (doi: 10.1109/TEC.1987.4765844).
- [24] M. Ashari, H. Suryatomo, D. Candara R., R. Mardiyanto, D. Fahmi, K. B. Adam, S. Hidayat, "Design and implementation of axial flux induction motor single stator-single rotor for electric vehicle application", Iptek Journal of Proceeding Series, vol. 1, no.1, pp. 497-502, 2014 (doi: 10.12962/j23546026.y2014i1.250).
- [25] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, T. A. Lipo, "A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 2, pp. 185-192, June 1999 (doi: 10.1109/60.766982).
- [26] I. Boldea, S. A. Nasar, "The induction machines design handbook", 2th Edition, Boca Raton, FL: CRC press/Taylor & Francis, eBook Published, Sept. 2018 (doi: 10.1201/9781315222592).
- [27] Vtu Learning Course, "Design of induction motors", [Online] Available: <http://www.dokumen.tips>.
- [28] V. N. Mittle, A. Mittal, "Design of electrical machines", 4th Edition, New Delhi: Standard Publishers Distributors, 1996.
- [29] Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani, "Theoretical modeling of axial flux squirrel cage induction motor considering both saturation and anisotropy", International Trans. on Electrical Energy Systems, vol. 24, no. 3, pp. 335-346, Sept. 2012 (doi: 10.1002/etep.1691).
- [30] D. P. Kothari, I. J. Nagrath, "Electric machines", 4th Edition, New Delhi: Tata Mcgraw-Hill, Education Private Limited, 2010.
- [31] A. Raie, V. Rashtchi, "Accurate identification of parameters, in winding function model of induction motor, using genetic algorithm", Proceeding of the IEEE/SICE, pp. 2430-2434, Osaka, Japan, Aug. 2002 (doi: 10.1109/SICE.2002.1195791).
- [32] F. Khajeh-khalili, M.A. Honarvar, "Design and simulation of a wilkinson power divider with high isolation for tri-band operation using PSO algorithm", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 6, no. 23, pp. 13-20, Autumn 2015 (in Persian).
- [33] K. Khani, G. Shahgholian, "Analysis and optimization of frequency control in isolated microgrid with double-fed induction-generators based wind turbine", Journal of International Council on Electrical Engineering, vol. 9, no. 1, pp. 24-37, Feb. 2019 (doi: 10.1080/22348972.2018.1564547).
- [34] M. Momeni, S. Gharravi, F. Hourali, "Reducing the impact of SYN flood attacks by improving the accuracy of the PSO algorithm by adaptive effective filters", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 10, no. 37, pp. 51-57, Spring 2019 (in Persian).

زیر نویس‌ها:

1. Genetic algorithm
2. Improved particle swarm
3. Finite element method
4. Axial flux machines
5. Radial flux machines
6. Axial flux induction motor
7. Single sided axial air gap motor
8. Double side axial air gap motor
9. Multiple air gap axial flux motor
10. Axial flux permanent magnet motor
11. Campbell
12. Crawling
13. Cogging
14. Cusps
15. Hooks

16. Saturation factor
17. Carter's coefficient
18. Cost function
19. Selection
20. Crossover
21. Mutation
22. Chromosomes
23. Improved particle swarm optimization
24. Fit function
25. Inertia coefficient
26. Local optimization
27. Convergence speed
28. Global optimization
29. Preprocessing
30. Solver
31. Post processing