

طراحی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی یک نوع جدید از ژنراتورهای شار متقاطع روتور دیسکی مغناطیس دائم

حسین آذرین‌فر^۱، دانشجوی دکتری؛ محمدرضا آقاابراهیمی^۲، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - hazarinfar@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - aghaebrahimi@birjand.ac.ir

چکیده: ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم به‌عنوان ماشین‌هایی با چگالی توان و گشتاور بالا شهرت یافته‌اند. این مقاله یک نوع جدید از ژنراتورهای مغناطیس دائم شار متقاطع روتور دیسکی را ارائه می‌دهد. ابتدا الگوریتم طراحی اولیه (معادله ابعادی^۱) برای ساختار پیشنهادی ارائه می‌شود و سپس این الگوریتم، توسط الگوریتم ازدحام ذرات تغییریافته (NPSO^۲) که با روش جستجوی تصادفی محلی (LRS^۳) ترکیب شده، بهینه‌سازی می‌شود. در فرآیند بهینه‌سازی، باید چگالی توان و بازده ژنراتور حداکثر و اعوجاج هارمونیک کل (THD^۴) ولتاژ داخلی آن حداقل گردد. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم طراحی اولیه تلفیق و ابعاد و پارامترهای مختلف ژنراتور محاسبه می‌شود. با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی میدان توسط روش اجزای محدود سه‌بعدی^۵، مشخصات عملکردی ژنراتور بهینه‌شده به‌دست می‌آید. در نهایت نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌شده با نتایج حاصل از اجزا محدود سه‌بعدی مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم، الگوریتم طراحی اولیه، بهینه‌سازی، الگوریتم NPSO، روش اجزاء محدود.

Design, Optimization and Simulation of a Novel Transverse Flux Permanent Magnet (TFPM) Generators

H. Azarinfar¹, PhD Student; M. R. Aghaebrahimi²; Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: hazarinfar@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: aghaebrahimi@birjand.ac.ir

Abstract: Transverse flux permanent magnet machines are known as machines with high power density and torque. This article presents a novel transverse flux permanent magnet disk-rotor generator. First, the initial design of the algorithm (sizing equation) for the proposed structure provide and then by (NPSO) combined with Local Random Search (LRS) method, optimized. In The optimization process, power density and efficiency should be maximum and total harmonic distortion (THD) of the internal voltage of the generator is minimized. Optimization process incorporated into the initial design of the algorithm and different dimensions and parameters of optimization generator is calculated. Electromagnetic field analysis of the optimized generator is subjected through 3D-FEA to obtain the generator' characteristics. Finally, the results obtained from the optimization algorithm are compared with those of the 3D- FEM.

Keywords: Transverse flux permanent magnet (TFPM) machine, initial design algorithm, optimization, NPSO algorithm, finite element method.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸، ۱۳۹۶/۰۲/۰۵ و ۱۳۹۶/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۱

نام نویسنده مسئول: محمدرضا آقاابراهیمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

پ- در این ماشین‌ها معمولاً هسته‌های استاتور در بیرون و داخل روتور قرار می‌گیرند و هر دو طرف فعالانه در تولید گشتاور شرکت می‌کنند [۱۵، ۱۴، ۱۲، ۳].

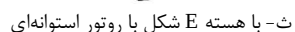
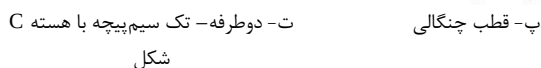
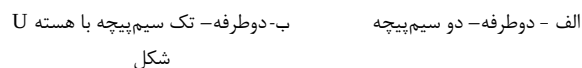
۱- دوطرفه - دو سیم پیچه

۳- دوطرفه- تک سیم پیچه با هسته C شکل

۵۔ قطب چنگالی [۴].

شکل ۱ نمای کلی

شکل ۱ نمای کلی ساختارهای پایه TFPM را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نمای کلی ساختارهای پایه TFPM [۴]

امروزه حوزه بهبود ساختار ماشین‌های الکتریکی زمینه بسیار مناسبی برای گسترش و توسعه دارد. از جمله دلایل این امر می‌توان به گسترش و پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت و مواد مناسب‌تر برای ساخت ماشین‌ها اشاره کرد. مبدل‌های الکترونیک قدرت که برای کنترل ماشین‌ها استفاده می‌شوند امکان تغذیه موتورها را با فرکانس‌های مختلف را فراهم می‌کنند هم‌چنین استفاده از مواد جدید همانند مواد مغناطیسی نرم (SMC^c) و مواد مغناطیسی دائم باقابلیت بالا، امکان بهبود ساختاری ماشین‌ها را فراهم نموده است [۱]. ماشین‌های مغناطیس دائم به دلیل ساختار ساده، چگالی توان بالا، خنک‌سازی بهتر و عملکرد بهتر در سرعت بالا مورد توجه قرار گرفته است [۲]. در میان ماشین‌های الکتریکی امروزه ساختارها با چگالی توان و گشتاور بالا و ساختار فشرده بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد [۲، ۱]. از جمله این ساختارهای فشرده می‌توان به ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم اشاره نمود. ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم یا به اختصار TFPM^۷ به عنوان ماشین‌هایی با چگالی توان و گشتاور بالا شهرت یافته‌اند. در این ماشین‌ها مسیر عبور شار بر جهت حرکت روتور و جهت جریان عمود است [۳، ۴]. چگالی توان و گشتاور بالا با استفاده از تعداد قطب‌های زیاد و بارگذاری الکتریکی بالا به دست می‌آیند [۵].

تفاوت اصلی ماشین‌های شار متقاطع با ماشین‌های شار شعاعی و شار محوری این است که در ماشین‌های شار متقاطع می‌توان فضای سیم‌پیچی را افزایش داد، بدون آنکه مسیر عبور شار کاهش پیدا کند [۶].

این ماشین‌ها در موتورهای ربات‌ها و کشتی‌های الکتریکی و وسایل خانگی مانند ماشین لباسشویی کاربرد دارند. از طرف دیگر به دلیل ساختار فشرده کاربرد این ژنراتور در گشتاور بالا و سرعت پائین همانند ژنراتور توربین‌های بادی و موتور وسایل نقلیه الکتریکی ترجیح داده می‌شود [۱۷-۷].

جنبه نامطلوب این ماشین‌ها بالا بودن شار پراکندگی و پائین بودن ضریب قدرت، به دلیل تعداد قطب‌های زیاد، است [۱۸]. متأسفانه مسیرهای سه‌بعدی خطوط شار، مسیرهای پیچیده شار نشستی و اشباع قابل توجه هسته به مشکلات طراحی این ماشین‌ها می‌افزایند [۱۹، ۱۶، ۹]. از جمله مشکلات دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود بالا بودن گشتاور دندانه^۸ است که البته این مشکل مربوط به تمام ماشین‌های مغناطیس دائم است [۲۰].

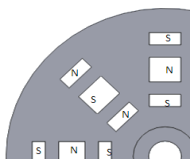
از جمله مزایایی که این ماشین را از ماشین‌های معمولی متمایز کرده است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- هر فاز موتور کاملاً از فازهای دیگر مجزا است، بنابراین از لحاظ الکتر و مغناطیسی هیچ گونه تزیوح بین فازها وجود ندارد.

ب- هر سیم پیچی استاتور شامل یک سولنوئید است که توسط هسته مربوط به خود احاطه می شود.

قطب‌های ماشین، هسته E شکل وجود دارد که در دو طرف دیسک روتور و روی بدنه‌های استاتور ثابت می‌شوند. سیم‌پیچی‌های این طرح به صورت کلاف‌های ساده به دور بازوی وسطی هسته‌های E شکل پیچیده می‌شوند. این سیم‌پیچی‌ها با هم موازی می‌شوند. باید در هنگام موازی کردن سیم‌پیچی‌های دو قطب مجاور، دقت نمود که جهت ولتاژ القایی در هر کدام از قطبها مخالف قطب کناری است. با این ساختار متفاوت، قدرت کلی این ماشین بین قطبها تقسیم می‌شود. علاوه بر توان خروجی بیش‌تر، چنانچه برای هر کدام از سیم‌پیچی‌ها مشکلی پیش آید، می‌توان با خارج نمودن این سیم‌پیچی از مدار خروجی، ژنراتور با توان کمتر به کار خود ادامه دهد و این امر قابلیت اطمینان کلی ماشین را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر داشتن سه ردیف آهنربا در امتداد شعاع دیسک روتور تعادل و بالانس بیش‌تر روتور را در فاصله هوائی به همراه دارد. از جمله جنبه‌های نامطلوب این طرح می‌توان به بالا بودن اعوجاج هارمونیک کل شکل موج ولتاژ (THD) و افزایش تلفات اهمی ماشین اشاره نمود. البته می‌توان با یک طراحی درست این دو مقدار را به حداقل رساند.

روتور دیسکی این ماشین محل قرار گرفتن آهنرباهای دائم است. نحوه قرارگیری آهنرباهای دائم بر روی دیسک روتور به صورت شکل ۴ است.

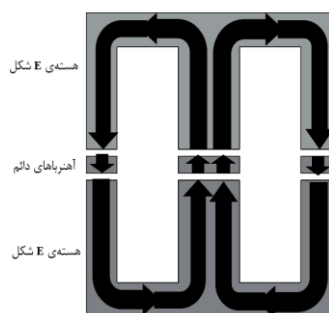


شکل ۴: نحوه قرار گرفتن آهنرباهای دائم روی دیسک روتور

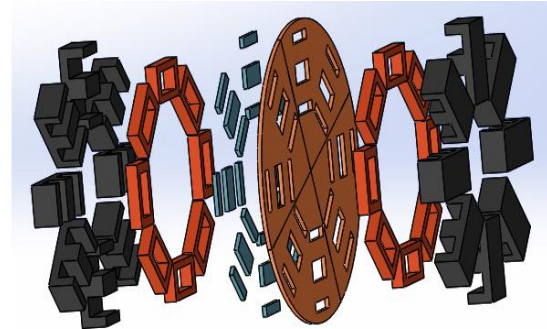
دیسک روتور باید از مواد عایق مغناطیسی باشد تا نشت شار بین آهنرباها در سطح دیسک ناچیز بوده و شار به راحتی وارد فاصله هوائی گردد. بدنه استاتور نقش ثابت نگهداشتن هسته‌های E شکل را بر عهده دارد. جنس بدنه نیز باید از مواد عایق مغناطیس باشد تا نشت شار بین قطب‌های مجاور به حداقل برسد.

۲-۱- معرفی پارامترهای ابعادی ماشین

قبل از معرفی پارامترهای ابعادی طرح پیشنهادی، برای فهم بهتر مراحل طراحی، مسیر عبور شار در هر یک از قطب‌های ماشین در شکل ۵ نمایش داده می‌شود.



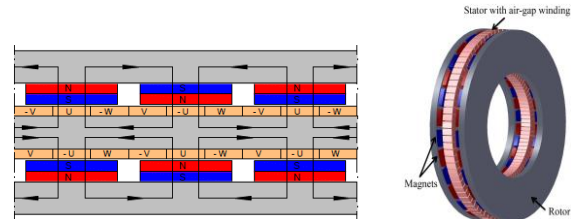
شکل ۵: مسیر عبور شار در یک قطب از طرح پیشنهادی



هسته‌های E شکل سیم‌پیچی‌ها دیسک روتور آهنرباهای دائم سیم‌پیچی‌ها هسته‌های E شکل

شکل ۲: طرح کلی ماشین TFPM با هسته E شکل

شاید این سؤال در ذهن خواننده پیش آید که این ساختار شبیه ماشین‌های شار محوری است و تفاوت آن با ماشین‌های شار محوری چیست؟ در پاسخ به این سؤال تصویر یک ماشین شاری از نوع TORUS و بدون شیار با آهنرباهای سطحی شکل ۳ آمده است.



نمای بخشی از ماشین برای نمایش مسیر عبور شار

نمای کلی یک نمونه از

ماشین‌های شار محوری

شکل ۳: یک نمونه ماشین شار محوری [۲۱]

مشاهده می‌شود که در ماشین‌های شار محوری، مسیر شار در بعضی از موقعیت‌ها با جهت حرکت موازی می‌شود. ولی در ماشین‌های شار متقاطع و خصوصاً ساختار مطرح‌شده در این مقاله همواره مسیر شار بر مسیر حرکت روتور عمود است.

در این مقاله ابتدا ساختار کلی این ژنراتور به صورت مختصر معرفی شده و سپس الگوریتم طراحی اولیه برای طراحی این ژنراتور ارائه می‌شود. الگوریتم طراحی اولیه توسط یک ویرایش جدید از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جدید (NPSO) به همراه یک روش جستجوی محلی (LRS) بهینه‌سازی می‌شود. بعد از این فرآیند با استفاده از الگوریتم طراحی بهینه‌شده، ابعاد ژنراتور و مشخصات عملکردی ژنراتور به دست می‌آید. حال به منظور تأیید عملکرد به دست‌آمده از الگوریتم طراحی بهینه‌شده، از روش اجزا محدود سه‌بعدی استفاده می‌شود و در نهایت نتایج الگوریتم با نتایج حاصل از اجزا محدود با هم مقایسه خواهند شد.

۲- معرفی مختصر ژنراتور شار متقاطع پیشنهادی

در طرح پیشنهادی روتور از حالت استوانه‌ای خارج شده است. چراکه روتور استوانه‌ای باعث بزرگ‌تر شدن اندوکتانس سیم‌پیچی‌های آرمیچر و کاهش ضریب قدرت ماشین می‌گردد [۲۲]. هم‌چنین، نیروی گریز از مرکز وارده بر آهنرباهای دائم در ساختارهای دیسکی به مراتب کمتر از ساختارهای استوانه‌ای خواهد بود. در این طرح به تعداد دو برابر تعداد

۳- الگوریتم طراحی اولیه

در این بخش روند طراحی ساختار و ابعاد اساسی ماشین شار متقاطع روتور دیسکی مغناطیس دائم با جزئیات لازم ارائه می‌شود. روابط ریاضی به کاررفته در طراحی نیز توصیف و یا اثبات می‌شوند. روند محاسبه پارامترهای ابعادی ماشین شامل به دست آوردن مشخصات نامی و محدودیت‌های کلی ماشین موردنظر به شرح زیر است:

۱-۳ پارامترهای اصلی طراحی

پارامترهای اصلی طراحی که عبارت‌اند از مشخصات نامی ژنراتور در جدول ۲ به همراه مقادیر آن ارائه شده است.

جدول ۲: پارامترهای اصلی طراحی

پارامتر	تعریف	مقدار
N_s	سرعت چرخش نامی موتور برحسب دور در دقیقه	۲۵۰۰
$P_{out} [W]$	توان خروجی الکتریکی	۴۰۰
m	تعداد فازها	۱
$f [Hz]$	فرکانس ولتاژ خروجی ژنراتور	۵۰۰
$V_{out} [V]$	ولتاژ خروجی ژنراتور	۵۰
$\cos \phi$	ضریب قدرت ژنراتور	۰/۸۵ فوق تحریک
p	تعداد قطب‌های ماشین	۲۴

۲-۳ متغیرهای انتخابی

در مسئله طراحی معمولاً مواردی پیش می‌آید که از بین چندین پارامتر طراحی، باید برخی را به عنوان متغیرهای انتخابی و مستقل انتخاب کرد. محدوده این متغیرها باید با ملاحظات خاصی که معمولاً در اثر تجربه به دست می‌آیند، انتخاب شود. در مسئله طراحی ماشین با توجه به اینکه تعداد مجهولات از معادلات بیشتر است لذا باید با توجه به نوع تعریف مسئله و محدودیت‌های طراحی، تعدادی از پارامترهای طراحی به عنوان متغیرهای انتخابی، انتخاب شوند.

متغیرهای انتخابی را می‌توان به دودسته زیر تقسیم نمود:

دسته اول متغیرهای انتخابی که دارای مقدار ثابت هستند. این

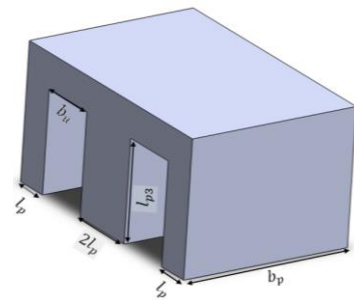
متغیرها متغیرهای ثابت نامیده می‌شوند. این متغیرها در جدول ۳ ذکر شده است.

دسته دوم: این دسته از متغیرها دارای مقادیر از پیش تعیین شده نیستند. برای انتخاب دقیق این متغیرها، می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. متغیرهای انتخابی دسته دوم به عنوان متغیرهای تصمیم برای الگوریتم بهینه‌سازی به کار برده می‌شود. روند کار در قسمت‌های بعد توضیح داده خواهد شد. متغیرهای تصمیم در جدول ۴ آمده است.

تمامی پارامترهای ابعادی این ماشین را می‌توان در نمایش دو قسمت زیر از ماشین معرفی نمود:

۱-۱-۲ هسته E شکل

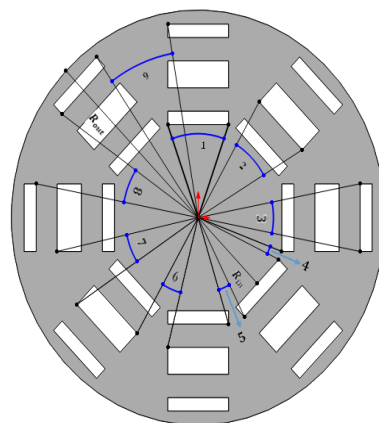
نمای هسته E شکل در شکل ۶ به همراه پارامترهای ابعادی آن به نمایش درآمده است.



شکل ۶: نمای هسته E شکل به همراه معرفی پارامترهای ابعادی آن

۲-۱-۲ نمای دیسک روتور

نمای دیسک روتور به همراه پارامترهای آن در شکل ۷ به نمایش درآمده است.



شکل ۷: نمای دیسک روتور به همراه معرفی پارامترهای ابعادی آن

در جدول ۱ پارامترهایی که در شکل ۵ به صورت عدد نمایش داده شده‌اند، آمده‌اند. ضخامت دیسک روتور که با ضخامت آهنربای دائم برابر است، با پارامتر l_{pm} مشخص می‌شود.

جدول ۱: معرفی ابعاد مشخص شده در شکل ۷

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نشانه	α	β	ξ	θ_{g1}	θ_{g2}	θ_{g3}	θ_{g4}	θ_{g5}	θ_{g6}

لازم به ذکر است که متغیرهای جدول ۱ به عنوان متغیرهای وابسته هستند؛ به عبارت دیگر چنانچه ابعاد l_p, b_p, b_u, R_{in} تعیین گردند، این متغیرها به راحتی قابل محاسبه خواهند بود.

جدول ۳: متغیرهای انتخابی دسته اول (متغیرهای ثابت)

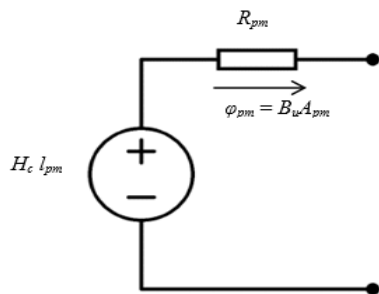
پارامتر	تعریف	مقدار
k_i	ضریب شکل موج جریان	۱/۴۱۴
k_p	ضریب شکل موج توان	$\cos \varphi / 0.5$
μ_0	ضریب نفوذپذیری نسبی مغناطیسی خلأ	$\pi \times 10^{-7}$
μ_r	ضریب نفوذپذیری نسبی هسته‌های E و I شکل	۳۰۰۰
μ_{rpm}	ضریب نفوذپذیری آهنرباهای دائم	۱/۰۵
k_{le}	ضریب نشت شار در فاصله هوایی	۱/۱۵
$B_r [T]$	چگالی شار پسماند آهنربای دائم	۱/۱۸
$H_c \left[\frac{A}{m} \right]$	شدت میدان مغناطیس‌زدای آهنربای دائم	۸۶۸۰۰۰
$\rho_{cu} [\Omega.m]$	مقاومت مخصوص مس در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد	$2/0.052 \times 10^{-8}$
$J \left[\frac{A}{mm^2} \right]$	چگالی جریان	۴

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهنربای دائم (μ_{pm}) را می‌توان از شکل ۸ محاسبه نمود. درواقع می‌توان گفت که μ_{pm} همان شیب خط در شکل ۸ است. بر این اساس، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهنربای دائم (μ_{pm}) و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آن (μ_{rpm}) به ترتیب به‌صورت روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شوند [۲۳].

$$\mu_{pm} = \frac{B_r}{H_c} = \mu_{rpm} \mu_0 \quad (1)$$

$$\mu_{rpm} = \frac{\mu_{pm}}{\mu_0} = \frac{B_r}{\mu_0 H_c} \quad (2)$$

بر اساس روابط فوق، می‌توان آهنربای دائم را به‌صورت مدار معادل تونن مغناطیسی شکل ۹ معادل‌سازی کرد.



شکل ۹: مدار معادل تونن مغناطیسی آهنربای دائم برحسب پارامترهای آن [۲۳]

در شکل ۹ پارامترهای B_u و R_{pm} به ترتیب معرف بارگذاری ویژه مغناطیس (چگالی شار متوسط در فاصله هوایی) و رلوکتانس داخلی آهنربای دائم است. رلوکتانس داخلی آهنربای دائم توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$R_{pm} = \frac{H_c l_{pm}}{B_r A_{pm}} = \frac{l_{pm}}{\mu_{pm} A_{pm}} = \frac{l_{pm}}{\mu_0 \mu_{rpm} A_{pm}} \quad (3)$$

در رابطه ۳ پارامتر A_{pm} سطح مقطع آهنربای دائم است و بقیه پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند. با توجه به مدار معادل آهنربای دائم و مدار معادل مغناطیسی ماشین می‌توان رابطه ۴ را برای محاسبه ضخامت آهنربای دائم استخراج کرد.

$$l_{pm} = \frac{2 \times B_g \times B_r \times g}{H_c \times (B_r - B_g) \times \mu_0} \quad (4)$$

۳-۳-۲ محاسبه جریان مؤثر مربوط به هر قطب ماشین

جریان مؤثر هر قطب را می‌توان طبق رابطه به‌صورت رابطه ۵ محاسبه کرد.

$$I_{rmsp} = \frac{P_{out}}{2p V_{out} \cos \varphi} \quad (5)$$

جدول ۴: متغیرهای انتخابی دسته دوم متغیرهای تصمیم‌گوریتیم بهینه‌سازی

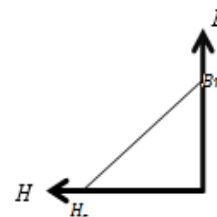
پارامتر	تعریف
N_p	تعداد دور
k_l	نسبت b_p به l_p
k_u	نسبت فاصله بین بازوی کناری و وسطی هسته E شکل به مجموع طول فاصله‌های هوایی دو طرف دیسک روتور و ضخامت آهنربای دائم
$B_g [T]$	چگالی شار متوسط در فاصله هوایی
$g [mm]$	فاصله هوایی

۳-۳-۳ پارامترهای محاسباتی

در این قسمت با استفاده از پارامترهای اصلی، متغیرهای انتخابی و روابط ارائه‌شده در بخش‌های آتی، ابعاد ژنراتور محاسبه می‌شود.

۳-۳-۱ محاسبه ضخامت آهنربای دائم

برای محاسبه ضخامت آهنربای دائم از مدار معادل مغناطیسی در لحظه‌ای که آهنرباهای دائم دقیقاً روبروی هسته E شکل قرار دارند، استفاده می‌شود. منحنی نحوه تغییرات چگالی شار روی سطح آهنربا برحسب شدت میدان آهنربای دائم در شکل ۸ رسم شده است.



شکل ۸: منحنی تغییرات چگالی شار برحسب شدت میدان آهنربای دائم [۲۳]

مرحله سوم: در این مرحله با استفاده از سری فوریه دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ داخلی ژنراتور مربوط به هر دور سیم‌پیچی طبق رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$E_{11maxp} = \left(\frac{4}{\pi} \right) \times \left(\frac{e_1 \times (1 - \cos((p \times \theta_{g1}) / 2)) + e_2 \times (\cos((p \times \theta_{g1}) / 2) - \cos((p \times \theta_{g3}) / 2)) + e_3 \times (\cos((p \times \theta_{g3}) / 2) - \cos((p \times \theta_{g5}) / 2)) + e_4 \times (\cos((p \times \theta_{g5}) / 2))}{\cos((p \times \theta_{g1}) / 2)} \right) \quad (11)$$

۳-۳-۴- محاسبه THD ولتاژ داخلی

در قسمت ۳-۳-۳ مؤلفه اصلی ولتاژ محاسبه گردید. می‌توان با استفاده از سری فوریه شکل موج ولتاژ داخلی، مؤلفه‌های مرتبه‌های بالاتر را به‌دست آورد. برای به‌دست آوردن THD ولتاژ از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} E_{1nmaxp}^2}}{E_{11maxp}} \quad (12)$$

در رابطه ۱۲ E_{1nmaxp} دامنه مؤلفه n ام ولتاژ داخلی هر دور سیم‌پیچی است.

۳-۳-۵- ارائه معادله خروجی طرح پیشنهادی

توان خروجی هر ماشین الکتریکی با صرف‌نظر کردن از راکتانس سنکرون و مقاومت سیم‌پیچی می‌تواند با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه شود [۲۴].

$$P_{out} = m 2pk_i k_p E_{1maxp} I_{rmsp} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، E_{1maxp} مقدار حداکثر مؤلفه اصلی ولتاژ داخلی است. وجود $2p$ در رابطه ۱۳ به این دلیل است که در این ماشین تعداد سیم‌پیچی‌ها دو برابر تعداد قطب‌های ماشین است.

۳-۳-۶- بارگذاری الکتریکی

بارگذاری الکتریکی ویژه یا همان چگالی آمپر هادی در واحد طول محیطی با افزایش توان و جریان نامی ماشین افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، برای یک ماشین الکتریکی با توان نامی، جریان و تعداد دور سیم‌پیچی مشخص، انتخاب مقدار بزرگ‌تر برای A_e (بارگذاری الکتریکی) به معنی طراحی ماشین با قطر خارجی کوچک‌تر است. با کاهش قطر خارجی ماشین، ضخامت یا طول محوری سیم‌پیچی و بنابراین رلوکتانس مسیر شار در آن افزایش یافته و طول محوری مغناطیس‌های دائم موردنیاز برای تولید شار لازم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بارگذاری الکتریکی بزرگ‌تر به معنی تلفات اهمی بیشتر و نیاز به سیستم خنک‌ساز قوی‌تر است [۲۶، ۲۵].

بارگذاری الکتریکی ماشین شار متقاطع روتور دیسکی می‌تواند توسط رابطه ۱۴ محاسبه شود.

۳-۳-۳- محاسبه دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ القاشده در هر دور سیم‌پیچی طرح پیشنهادی

با توجه به تغییرات ضرایب k_u و k_l می‌توان شش حالت زیر را برای زوایای ارائه‌شده در شکل ۷ متصور گردید (رابطه ۶).

$$\beta \geq (\theta_{g5} + \xi) / 2 \rightarrow \begin{cases} (1) \rightarrow \xi \geq \theta_{g5} > \theta_{g3} > \theta_{g1} \\ (2) \rightarrow \theta_{g5} > \xi \geq \theta_{g3} > \theta_{g1} \\ (3) \rightarrow \theta_{g5} > \theta_{g3} > \xi \geq \theta_{g1} \\ (4) \rightarrow \theta_{g5} > \theta_{g3} > \theta_{g1} > \xi \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta < (\theta_{g5} + \xi) / 2 \rightarrow \begin{cases} (5) \rightarrow \xi \geq \theta_{g1} \\ (6) \rightarrow \theta_{g1} > \xi \end{cases}$$

مراحل به‌دست آوردن دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ برای حالت اول به‌عنوان نمونه به‌صورت زیر می‌تواند تشریح گردد:

مرحله اول: در این مرحله شار دورزننده هر دور سیم‌پیچی هر قطب توسط آهنرباهای دائم در موقعیت‌های مختلف روتور (موقعیت‌های زیر) محاسبه می‌شود:

الف- موقعیت اول: تمامی سطح آهنرباها مقابل هسته E شکل قرار گیرد. (شار φ_1)

ب- موقعیت دوم: جابه‌جایی روتور به‌اندازه θ_{g1} نسبت به موقعیت اول. (شار φ_2)

پ- موقعیت سوم جابه‌جایی روتور به‌اندازه θ_{g3} نسبت به موقعیت اول. (شار φ_3)

ت- موقعیت چهارم: جابه‌جایی روتور به‌اندازه θ_{g5} نسبت به موقعیت اول. (شار φ_4)

ث- موقعیت پنجم: جابه‌جایی روتور به‌اندازه $(\theta_{g5} + \xi) / 2$ نسبت به موقعیت اول. (شار φ_5)

مرحله دوم: در این مرحله، ولتاژهای القائی در هر دور سیم‌پیچی با توجه به موقعیت روتور توسط مشتق‌گیری از نمودار شار محاسبه می‌شوند (روابط ۷ تا ۱۰).

$$e_1 = \frac{4\pi f \times (\varphi_1 - \varphi_2)}{p \times \theta_{g1}} \quad (7)$$

$$e_2 = \frac{4\pi f \times (\varphi_2 - \varphi_3)}{p \times (\theta_{g3} - \theta_{g1})} \quad (8)$$

$$e_3 = \frac{4\pi f \times (\varphi_3 - \varphi_4)}{p \times (\theta_{g5} - \theta_{g3})} \quad (9)$$

$$e_4 = \frac{4\pi f \times (\varphi_4 - \varphi_5)}{p \times (\xi - \theta_{g5})} \quad (10)$$

$$R_{pm2} = \frac{l_{pm}}{2\mu_{rpm}\mu_0 l_p b_p} \quad (21)$$

مرحله دوم: در این مرحله با استفاده از رلوکتانس به‌دست‌آمده در حالت قبل، اندوکتانس اولیه سیم‌پیچ و راکتانس اولیه سنکرون با استفاده از روابط ۲۲ و ۲۳ محاسبه می‌شوند.

$$L_{t1} = \frac{1}{R_t} \quad (22)$$

$$X_{s1} = 2\pi f L_{t1} \quad (23)$$

۳-۳-۸- محاسبه قطر سیم و مقاومت هر دور از سیم‌پیچ (R_{a1})

برای تعیین قطر سیم، ابتدا با توجه به چگالی جریان هادی‌های مسی، سطح مقطع سیم طبق رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود.

$$A_{cuw} = \frac{I_{rmsp}}{J} \quad (24)$$

حال اگر سطح مقطع هادی‌ها دایره‌ای شکل در نظر گرفته شود، قطر سیم طبق رابطه ۲۵ محاسبه خواهد شد.

$$D_w = 2\sqrt{\frac{A_{cuw}}{\pi}} \quad (25)$$

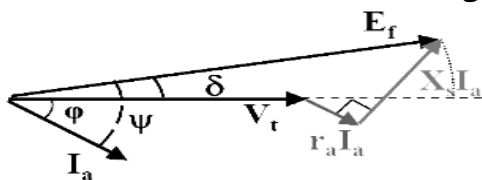
۳-۳-۹- محاسبه مقاومت هر دور سیم‌پیچ

برای محاسبه مقاومت سیم‌پیچ از مقاومت مخصوص مس و تعداد دور اولیه سیم‌پیچ استفاده می‌شود (رابطه ۲۶).

$$R_{a1} = 1.65 \rho_{cu} (2l_p + 2b_p) \quad (26)$$

۳-۳-۱۰- محاسبه زاویه قدرت ماشین (δ) در بار کامل

شکل ۱۱ دیاگرام برداری ولتاژی ژنراتور را در حالت تغذیه بار پس‌فاز نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱: دیاگرام برداری ولتاژی ژنراتور

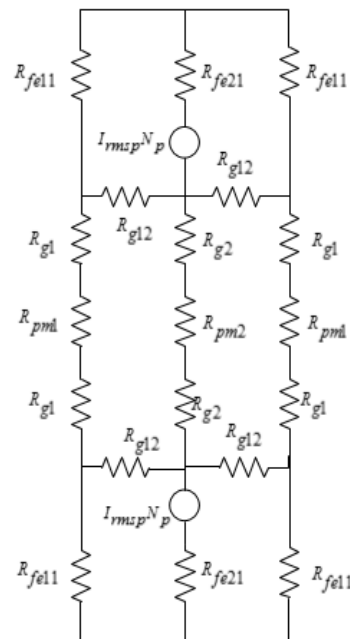
زاویه قدرت ماشین را می‌توان با استفاده از دیاگرام برداری ولتاژی ماشین به‌صورت رابطه ۲۷ محاسبه کرد.

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{X_s I_{rmsp} \cos \phi - R_a I_{rmsp} \sin \phi}{V_{out} + X_s I_{rmsp} \sin \phi + R_a I_{rmsp} \cos \phi} \right) \quad (27)$$

$$A_e = \frac{N_p I_{rmsp}}{l_{p3}} \quad (14)$$

۳-۳-۷- محاسبه راکتانس سنکرون مربوط به هر دور سیم‌پیچی (راکتانس سنکرون اولیه سیم‌پیچی)

برای محاسبه راکتانس اولیه سنکرون مراحل زیر را می‌توان طی کرد: مرحله اول: در مرحله اول باید رلوکتانس دیده‌شده از دو سر سیم‌پیچی را به‌دست آورد. برای این کار از مدار معادل مغناطیسی داده‌شده در شکل ۱۰ استفاده می‌شود. رلوکتانس دیده‌شده از دو سر سیم‌پیچی با علامت (R_t) نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۰: مدار معادل مغناطیسی مربوط به سیم‌پیچی هر قطب

مقادیر هر یک از رلوکتانس‌های مشخص‌شده در شکل ۱۰ طبق روابط ۱۵ تا ۲۱ قابل‌محاسبه است.

$$R_{fe11} = \frac{l_{p3} + 2l_p + b_u}{\mu_0 \mu_{fe} l_p b_p} \quad (15)$$

$$R_{fe21} = \frac{0.5l_p + l_{p3}}{2\mu_0 \mu_{fe} l_p b_p} \quad (16)$$

$$R_{g1} = \frac{g}{k_{le} \mu_0 l_p b_p} \quad (17)$$

$$R_{g2} = \frac{g}{2k_{le} \mu_0 l_p b_p} \quad (18)$$

$$R_{g12} = \frac{b_u}{k_{le} \mu_0 (l_{p3} + 2g + l_{pm}) b_p} \quad (19)$$

$$R_{pm1} = \frac{l_{pm}}{\mu_{rpm} \mu_0 l_p b_p} \quad (20)$$

۵- روند بهینه‌سازی و تلفیق آن با روابط طراحی

بهبود عملکرد ماشین‌های الکتریکی، با استفاده از بهبود طراحی آن‌ها همواره مورد توجه مهندسين بوده است. در این زمینه، روش‌های الگوریتم‌های بهینه‌سازی و شبکه‌های عصبی در طراحی ماشین‌های الکتریکی استفاده شده‌اند [۲۷].

در این مقاله برای بهینه‌سازی از یک ویرایش جدید الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (NPSO) ترکیبی با روش جستجوی تصادفی محلی (LRS) استفاده می‌شود. در ادامه از این الگوریتم ترکیبی بانام الگوریتم NPSO-LRS استفاده می‌شود.

اساس کار PSO کلاسیک بر این اصل استوار است که در هر لحظه، هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند.

هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب موقعیت خود را طبق رابطه ۳۰ تغییر می‌دهد.

$$x_i^{m+1} = x_i^m + v_i^{m+1} \quad (30)$$

که در رابطه ۳۰، x_i^{m+1} موقعیت ذره i ام در تکرار $m+1$ ام، x_i^m موقعیت ذره i ام در تکرار m ام و سرعت ذره i ام در تکرار $m+1$ ام از رابطه ۳۱ به دست می‌آید.

$$v_i^{m+1} = w \times v_i^m + c_1 r_1 \times (Pbest_i - x_i^m) + c_2 r_2 \times (Gbest - x_i^m) \quad (31)$$

که در رابطه ۳۱، w ضریب اینرسی، c_1 و c_2 به ترتیب ضرایب یادگیری شخصی و جمعی، r_1 و r_2 اعدادی تصادفی در بازه بین ۰ تا ۱ است، $Pbest_i$ بهترین موقعیتی را که تاکنون ذره به آن رسیده و $Gbest$: بهترین موقعیتی که کل ذرات تجربه کرده‌اند، است [۲۸].

در الگوریتم NPSO سرعت ذرات در هر تکرار بر اساس دو عامل به‌روز می‌شود ۱- تجربه خوب: این بخش دقیقاً همان بخش مربوط به PSO کلاسیک است. بخش دوم: تجربه بد: این تجربه بد به ذرات کمک می‌کند تا بدترین موقعیت خود را به خاطر داشته باشند و دوباره به این نقطه برنگردند. با توجه به بحث فوق سرعت ذره در تکرار $m+1$ ام از رابطه ۳۲ به دست می‌آید.

$$v_i^{m+1} = w \times v_i^m + c_1 r_1 \times (Pbest_i - x_i^m) + c_2 r_2 \times (Gbest - x_i^m) + c_3 r_3 \times (x_i^m - Pworst_i) \quad (32)$$

که در رابطه ۳۲، $Pworst_i$ بدترین موقعیتی است که تا به حال هر ذره تجربه کرده است و c_3 ضریب شتاب ذره به سمت بدترین موقعیت خود و r_3 یک عدد تصادفی بین ۰ تا ۱ است. با انتخاب این

۳-۱۱- محاسبه چگالی حجمی ژنراتور (Den)

برای محاسبه چگالی حجمی ژنراتور از رابطه ۲۸ استفاده می‌شود.

$$Den = \frac{P_{out}}{V_{Gen}} \quad (28)$$

در رابطه ۲۸ P_{out} توان خروجی ژنراتور و V_{Gen} حجم مواد به کاررفته در ژنراتور است.

۳-۱۲- محاسبه بازده ژنراتور (η)

بازده ژنراتور از رابطه ۲۹ محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cun} + P_{fe}} \quad (29)$$

که در رابطه ۲۹، P_{fe} تلفات آهنی و P_{cun} تلفات مسی نامی است.

۴- مراحل گام به گام طراحی ژنراتور شار متقاطع روتور دیسکی

تا اینجا در مورد پارامترها و متغیرهای گوناگونی که در طراحی ژنراتور وجود داشت، صحبت شد. در این قسمت و قبل از فرآیند بهینه‌سازی، مراحل گام به گام طراحی ژنراتور به طور اجمالی بیان می‌شود:

مرحله اول: به متغیرهای انتخابی چه دسته اول و چه دسته دوم مقادیر اولیه داده می‌شود و یک مقدار اولیه به l_p داده می‌شود.

مرحله دوم: با توجه به متغیرهای انتخابی، مقدار l_p ، پارامترهای اصلی ژنراتور (مقادیر نامی) و پارامترهای محاسباتی، پارامترهای $b_p, b_u, r_{inf}, E_{pm}, a, p_3$ تعیین می‌شوند.

مرحله سوم: با توجه به چگالی جریان و جریان خروجی نامی هر سیم‌پیچ سطح مقطع سیم‌پیچ تعیین می‌شود. حال با استفاده از روابط ارائه شده مقاومت سیم‌پیچ محاسبه می‌گردد (R_a). همچنین راکتانس سنکرون نیز با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه می‌شود (X_s).

مرحله چهارم: با توجه به مراحل دوم و سوم و نمودار برداری ولتاژ ژنراتور سنکرون مقدار اندازه جریان محاسبه می‌گردد. چون اندازه جریان محاسبه می‌شود، بنابراین نباید این اندازه دارای مقدار موهومی باشد. لذا اگر چنانچه این مقدار جریان دارای قسمت موهومی باشد، می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار اولیه l_p را باید افزایش داد. چراکه این ابعاد ژنراتور نمی‌تواند این توان نامی را به دست دهد. بعد از افزایش مقدار l_p مراحل دوم تا چهارم مجدداً باید انجام شود. اگر چنانچه مقدار این جریان فقط دارای مقدار حقیقی باشد، آنگاه با توجه به ولتاژ خروجی و ضریب قدرت، مقدار توان خروجی محاسبه می‌گردد. این توان با مقدار توان نامی مقایسه می‌گردد. اگر توان محاسباتی از توان نامی کمتر باشد باید l_p افزایش یابد و مراحل دوم تا چهارم مجدداً تکرار گردد. در غیر این صورت فرآیند طراحی به پایان می‌رسد.

$$\begin{aligned} \text{If } F_{best}^{m+1} < F_{best}^m &\Rightarrow F_{opt} = F_{best}^{m+1}, Y_{opt} = Y_{best}^{m+1} \\ \text{If } F_{best}^{m+1} > F_{best}^m &\Rightarrow F_{opt} = F_{best}^m, Y_{opt} = Y_{best}^m \end{aligned} \quad (35)$$

مرحله چهارم: محدوده جستجو به صورت رابطه ۳۶ کاهش می‌یابد.

$$R^{m+1} = R^m \times (1 - \alpha) \quad (36)$$

که در رابطه ۳۶، α پارامتر کاهش تعریف می‌شود.

مرحله پنجم: اگر تعداد تکرارها به حداکثر تکرارها نرسیده باشد، یک واحد به m اضافه‌شده و مراحل دوم تا پنجم مجدداً تکرار می‌شود و اگر تعداد تکرارها به حداکثر تکرارها رسیده باشد، بردارهای Y_{opt} و F_{opt} عنوان نتایج بهینه‌سازی ارائه می‌گردد [۲۹].

در بهینه‌سازی ساختار ارائه‌شده در این مقاله، از الگوریتم NPSO-LSR استفاده‌شده است. محدوده متغیرهای تصمیم (Var_{min} و Var_{max}) در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵: محدوده متغیرهای تصمیم (ورودی) به الگوریتم ترکیبی

NPSO-LSR			
ردیف	پارامتر	حد پائین	حد بالا
۱	k_l	۱	۵
۲	N_p	۱۰۰	۶۰۰
۹	k_u	۱	۵
۳	$B_g [T]$	۰/۵	۰/۹
۴	$g [mm]$	۱	۳

تابع هدفی که در این طراحی قرار است، حداقل گردد، به صورت رابطه ۳۷ است.

$$CostFunction = THD + \frac{w_1}{Den} + \frac{w_2}{\eta} \quad (37)$$

که در رابطه ۳۷، THD ضریب اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ خروجی، Den چگالی حجمی ژنراتور و η بازده ژنراتور است. مقدار ضرایب وزنی w_1 و w_2 به ترتیب ۳۰۰۰ و ۰/۰۲ است. این ضرایب برای هم ارزش شدن دو تابع $\frac{1}{Den}$ و $\frac{1}{\eta}$ با تابع THD استفاده می‌شوند. با انتخاب این مقادیر برای این ضرایب وزنی، هر سه تابع هدف $\frac{1}{Den}$ ، $\frac{1}{\eta}$ و THD در محدوده بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ قرار می‌گیرند.

تمامی پارامترهای مربوط به تنظیمات الگوریتم ترکیبی NPSO-LSR در جدول ۶ ارائه‌شده است.

باید توجه داشت که در هر تکرار الگوریتم ترکیبی NPSO-LSR باید با توجه به متغیرهای تصمیم، متغیرهای ثابت، پارامترهای اصلی و روابط طراحی، ابعاد و پارامترهای ژنراتور به طور کامل محاسبه شود. روند تلفیقی طراحی و بهینه‌سازی در نمودار شکل ۱۲ آمده است.

سرعت برای ذرات در هر تکرار یک مسیر ویژه برای رسیدن به بهترین موقعیت با امیدواری بیشتر ایجاد می‌گردد.

الگوریتم‌های هیوریستیک همانند ژنتیک، PSO در فضاهای کوچک به خوبی عمل می‌کنند، ولی در فضاهای بزرگ دارای عملکرد خوبی نیستند. به خصوص در فضاهای پیچیده احتمال این که این الگوریتم‌ها نقاط بهینه محلی را ارائه دهند، زیاد است. در الگوریتم‌های هیوریستیک باید بین دو موضوع زیر تعادل ایجاد کرد: ۱- جستجوی کل فضای مسئله برای یافتن موقعیت‌های امیدوارکننده. ۲- جلوگیری از به دام افتادن در نقاط بهینه محلی. باید دقت داشت که انجام این دو موضوع در یک الگوریتم بهینه‌سازی به تنهایی کار بسیار مشکلی است. برای غلبه بر این مشکلات از یک سری از روش‌های ترکیبی با الگوریتم‌های هیوریستیک همانند روش جستجوی محلی (LRS) استفاده می‌شود.

مراحل روش LRS در زیر شرح داده می‌شود:

نقاط اولیه جستجو در الگوریتم NPSO با Y^1 و مقدار تابع هدف در این نقطه با F_{best}^1 نمایش داده می‌شود.

مرحله اول: محدوده جستجوی اولیه در اطراف Y^1 از رابطه ۳۳ طریقه زیر معین می‌گردد:

$$\begin{aligned} Y_{min}^{min} &= Var_{min} + (Y^1 - Var_{min}) \times \beta \\ Y_{max}^{max} &= Var_{max} - (Var_{max} - Y^1) \times \beta \\ R^1 &= Y_{max}^{max} - Y_{min}^{min} \end{aligned} \quad (33)$$

که در رابطه ۳۳، Y_{min}^{min} و Y_{max}^{max} مرزهای پائین و بالا ناحیه جستجوی محلی هستند. β پارامتر ناحیه محلی نامیده می‌شود. Var_{min} و Var_{max} حدود بالا و پائین متغیرهای تصمیم هستند. مقدار R^1 محدوده جستجوی محلی اولیه است. شمارنده تکرار m برابر ۱ فرض می‌گردد. Y_{best}^1 (بهترین نقطه جستجو در ابتدای روش LRS) و Y_{opt} (نقطه جستجوی بهینه) برابر با مقدار Y^1 قرار می‌گیرند.

مرحله دوم: نقاط جستجوی محلی که تعداد آن‌ها برابر N_L است، با استفاده از رابطه ۳۴ به دست می‌آید.

$$Y_n^{m+1} = Y_{best}^m + R^m \times r(N_{Var}, 1), n = 1, 2, \dots, N_L \quad (34)$$

که در رابطه ۳۴ $r(N_{Var}, 1)$ یک بردار ستونی است که اعداد تصادفی بین ۱- تا ۱ تولید می‌کند. باید دقت نمود که N_{Var} تعداد متغیرهای تصمیم است. اگر هر کدام از نقاط جستجوی محلی از محدودیت‌های تعیین‌شده در مرحله اول خارج شوند، آنگاه این نقاط محدود به مرزها می‌شوند.

مرحله سوم: برای هر کدام از نقاط جستجوی محلی تابع هدف محاسبه می‌گردد. آنگاه کمترین مقدار تابع هدف در این نقاط در متغیر F_{best}^{m+1} قرار می‌گیرد. نقاط متناظر با این تابع هدف نیز در Y_{best}^{m+1} قرار می‌گیرد. نقطه بهینه به صورت رابطه ۳۵ به روز می‌گردد:

بعد از اجراهای مکرر این فرآیند تلفیقی مقادیر جدول ۷ برای متغیرهای تصمیم به‌دست آمد.

جدول ۷: نتایج به‌دست آمده از الگوریتم PSO

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	k_l	۳
۲	N_p	۵۰۰
۳	k_u	۲
۴	$B_g [T]$	۰/۷۸
۵	$g [mm]$	1

همچنین بعد از اعمال متغیرهای تصمیم جدول ۷ به الگوریتم طراحی، ابعاد و پارامترهای جدول ۸ محاسبه گردید.

جدول ۸: ابعاد و پارامترهای محاسباتی ماشین

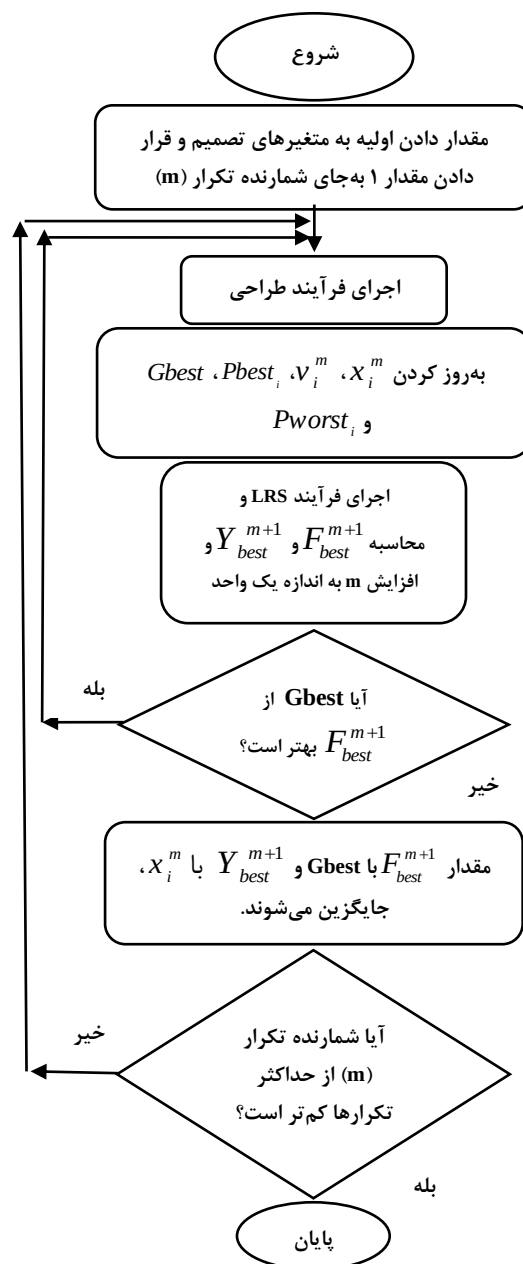
ردیف	تعریف	پارامتر	مقدار
۱	شعاع داخلی دیسک روتور	$R_{in} [mm]$	۴۵/۲
۲	شعاع خارجی دیسک روتور	$R_{out} [mm]$	۸۵
۳	ضخامت محوری آهنرباهای دائم	$l_{pm} [mm]$	۴/۴
۴	طول دو بازوی کناری هسته E شکل	$l_p [mm]$	۳/۵
۵	ضخامت هسته E شکل	$b_p [mm]$	۱۰/۵
۶	فاصله بین بازوی کنار و بازوی وسط هسته E شکل	$b_u [mm]$	۱۲/۷
۷	تعداد دور سیم‌پیچی	N_p	۵۰۰
۸	مقدار مؤثر مؤلفه اول ولتاژ داخلی	$E_f [V]$	۵۹/۲
۹	مقاومت سیم‌پیچ	$R_a [\Omega]$	۱۳/۳
۱۰	راکتانس سنکرون	$X_s [\Omega]$	۵۶/۲
۱۱	زاویه قدرت ماشین	$\delta [^\circ]$	۶/۸۷

۶- تأیید صحت الگوریتم طراحی بهینه‌شده به کمک تحلیل اجزاء محدود

در این قسمت عملکرد ژنراتور طراحی‌شده توسط الگوریتم تلفیقی طراحی- بهینه به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود JMAG Designer 10.5 به‌دست می‌آید. در الگوریتم‌های طراحی اولیه ماشین‌های الکتریکی، برخی پدیده‌ها از جمله مسیرهای پیچیده شار نشستی و تلفات جریان‌های گردابی وجود دارند که پیش‌بینی آن‌ها بسیار دشوار است و وارد کردن این پیچیدگی‌ها به مسئله طراحی در طراحی اولیه منطقی به نظر نمی‌رسد. به همین دلیل باید نتایج حاصل از الگوریتم طراحی اولیه که همان عملکرد ماشین است، توسط روش تحلیل الکترومغناطیسی میدان که توسط روش اجزاء محدود انجام می‌شود، تأیید گردد.

جدول ۶: پارامترهای مربوط به تنظیمات PSO

ردیف	تعریف	پارامتر	مقدار
۱	تعداد جمعیت اولیه	N_{pop}	۲۰۰
۲	تعداد متغیرهای تصمیم	N_{Var}	۵
۳	تعداد نقاط جستجوی محلی	N_L	۳۰
۴	تعداد حداکثر تکرار	Max_{it}	۱۰۰
۵	ضریب یادگیری شخصی	C_1	۲/۰۵
۶	ضریب یادگیری جمعی	C_2	۲/۰۵
۷	ضریب شتاب ذره به سمت بدترین موقعیت خود	C_3	۰/۴
۸	ضریب اینرسی	w	۱
۹	پارامتر کاهش	α	۰/۰۵
۱۰	پارامتر ناحیه محلی	β	۰/۳



شکل ۱۲: نمودار روند تلفیقی بهینه‌سازی و طراحی ماشین

منابع جریان شکل ۱۴ می‌توانند دارای هر شکل موج جریان دلخواهی باشند. با تغییر این منبع جریان می‌توان شرایط عملکردی مختلف را مدل‌سازی کرد.

ب- شرایط مرزی

شرایط مرزی مربوط به تقارن

همان‌طور که در قسمت‌های قبل ذکر شد، برای تحلیل عملکرد ژنراتور مدل کردن یک جفت قطب از ماشین کافی است. برای مدل‌سازی یک جفت قطب باید تقارن‌های موجود در شکل به نرم‌افزار معرفی گردد. این تقارن‌ها همان شرایط مرزی هستند.

شرایط مرزی مربوط به عایق مغناطیسی

تعیین شرط مرزی عایق مغناطیسی یعنی مشخص کردن مرز محدوده‌ای که در آن میدان مغناطیسی وجود ندارد. این شرط مرزی می‌تواند برای اطمینان بیشتر با یک فاصله هوایی بر روی سطحی که ماشین را کاملاً دربر می‌گیرد اعمال شود. در این صورت نرم‌افزار فرض خواهد کرد که مؤلفه عمودی شار مغناطیسی بر روی این سطح صفر است.

معرفی حرکت روتور

چون هدف، تحلیل عملکرد حالت دائمی یک ماشین سنکرون با سرعت چرخش ثابت ۲۵۰۰ دور بر دقیقه است، این سرعت دوران ثابت مربوط به مجموعه اجزاء تشکیل‌دهنده روتور شامل هسته و آهنرباهای دائم روی آن باید به طریق مناسب به نرم‌افزار معرفی گردد.

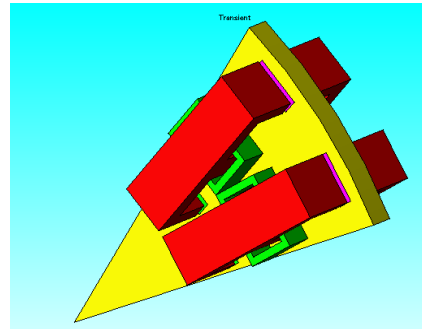
ایجاد ارتباط بین تحلیل مدار و اجزاء محدود

با مشخص شدن نحوه ارتباط یا اصطلاحاً تزویج بین مدل الکترومغناطیسی ساختار معرفی‌شده به نرم‌افزار اجزاء محدود و مدار خارجی، فرایند حل میدان می‌تواند آغاز شود. درواقع با این کار، ارتباط بین تحلیل مدار ورودی (شامل منبع جریان) و تحلیل اجزاء محدود برقرار می‌شود.

۶-۲- مش‌بندی

یکی از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی به کمک روش اجزاء محدود، مش‌بندی است. مش‌بندی تأثیر زیادی بر روی دقت جواب‌ها دارد. در حالت کلی مش‌بندی با مش‌های بزرگ و تعداد کم باعث پایین آمدن دقت و مش‌بندی ریز و تعداد زیاد باعث افزایش تصاعدی زمان موردنیاز برای حل مسئله می‌شود. درک صحیح و پیش‌بینی نحوه توزیع چگالی شار داخل ماشین کمک شایانی به انتخاب مش‌بندی مناسب خواهد کرد. شکل ۱۵ یک مش‌بندی سه‌بعدی انجام‌شده روی موتور TSPM موردنظر را نشان می‌دهد.

اولین گام در مدل‌سازی به کمک روش اجزاء محدود، ترسیم هندسه مسئله موردنظر است. این کار در این مقاله توسط نرم‌افزار SolidWorks که یکی از نرم‌افزارهای تخصصی ترسیم است، انجام‌شده است. شکل ۱۳ هندسه ترسیم‌شده یک جفت قطب از این ژنراتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: هندسه ترسیم‌شده یک جفت قطب

همان‌طور که قبلاً نیز یادآوری شد، این ژنراتور ۲۴ قطب است و الگوی مغناطیسی و هندسی یک جفت قطب به تعداد جفت قطب‌ها تکرار می‌شود؛ بنابراین، مدل‌سازی تنها یک جفت قطب برای تحلیل عملکرد متعادل و رسیدن به اهداف مسئله کافی است. پس از ترسیم هندسه باید مواد سازنده هر قسمت را مشخص کرد. این کار با توجه به جدول ۹ انجام می‌شود.

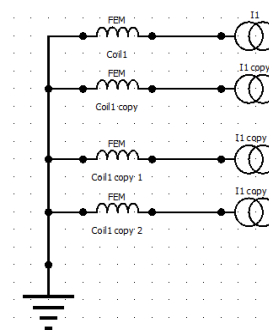
جدول ۹: مشخصات مواد سازنده موتور

قطعه	جنس
هسته استاتور	فولاد با ضریب نفوذپذیری ۷۰۰۰
هسته روتور	آلومینیوم
آهنربا	نئودیمیوم-آهن-برم با چگالی شار پسماند ۱/۳ تسلا
سیم‌پیچ	مس

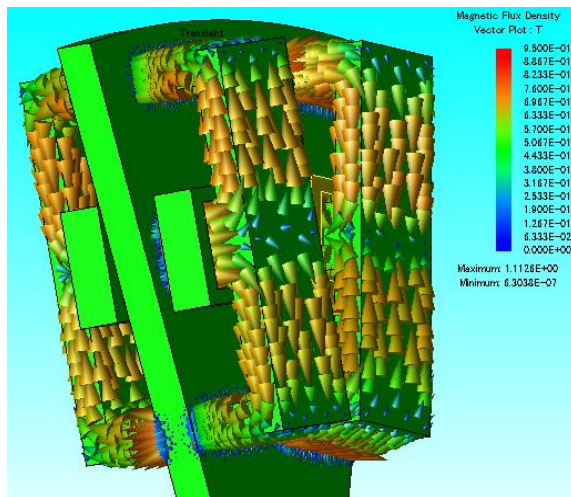
۶-۱- اختصاص تغذیه، شرایط مرزی و سایر تنظیمات

الف- تغذیه فاز

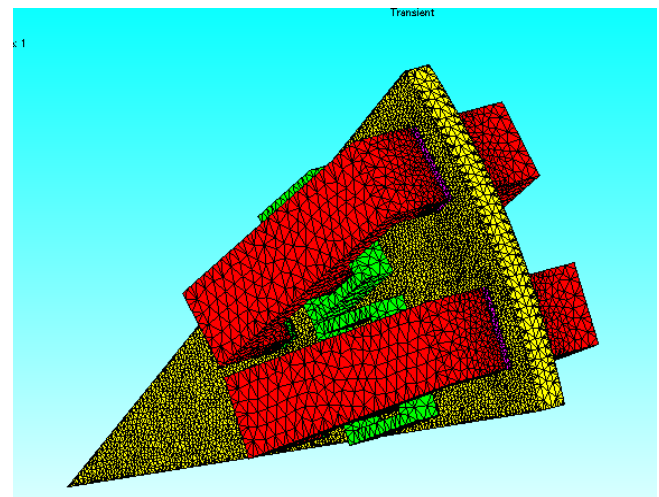
در این گزارش از یک مدار تغذیه سیم‌پیچ استاتور که معادلات آن به صورت هم‌زمان با معادلات میدان روش اجزاء محدود حل می‌شود، استفاده می‌شود. شماتیک این مدار در شکل ۱۴ آمده است.



شکل ۱۴: مدار تغذیه استاتور



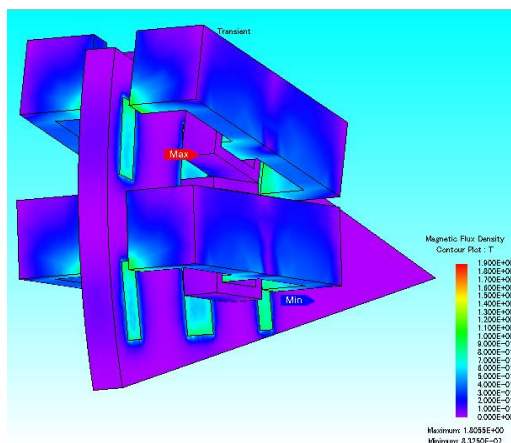
شکل ۱۶: نقشه خطوط شار در یک جفت قطب ژنراتور



شکل ۱۵: مش‌بندی انجام‌شده روی یک جفت قطب از موتور TFPM مورد بررسی

مشاهده می‌شود که توزیع شار در زیر هر قطب (زیر بازوهای هسته E شکل) یکنواخت است و لذا مقدار ماکزیمم و مقدار متوسط چگالی شار در فاصله هوایی یکسان خواهند بود. لازم به ذکر است که توزیع چگالی شار فاصله هوایی در هر گام قطبی در ماشین‌های شار شعاعی و شار محوری دارای توزیع یکنواخت نیست و در این ماشین‌ها باید نمودار چگالی شار در فاصله هوایی محاسبه و سپس مقدار متوسط آن محاسبه گردد.

شکل ۱۷ (الف و ب) به‌صورت یک نقشه رنگی (Contour Plot) توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی را در دو وضعیت مختلف روتور با موقعیت‌های ۱ و ۲ مشخص‌شده است، نمایش می‌دهد.

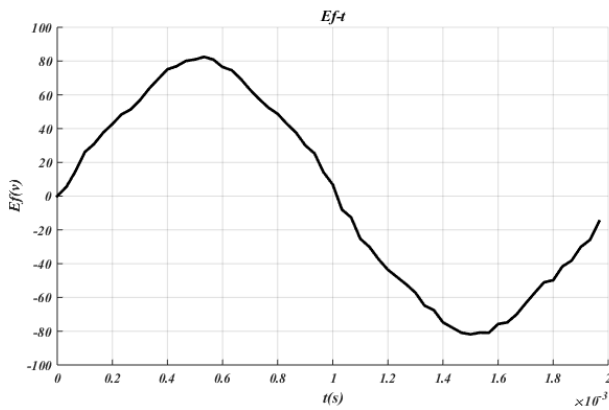


شکل ۱۷: الف: نقشه رنگی توزیع چگالی شار موتور در حالت مدار باز در موقعیت ۱

۳-۶- نتایج شبیه‌سازی
پس از اتمام فرایند حل (مرحله Processing)، مرحله مشاهده نتایج و استخراج نتایج که به مرحله Post Processing معروف است شروع می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در دو مرحله تحلیل استاتیکی و تحلیل دینامیکی ارائه می‌گردد:

۱-۳-۶- تحلیل استاتیکی
تحلیل استاتیکی بدین‌صورت انجام می‌پذیرد که اولاً جریان سیم‌پیچی‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود و ثانیاً آهنرباها دقیقاً روبروی هسته‌های E شکل قرار دارند. در این حالت نقطه کار با چگالی شار متوسط 0.783 تسلا به‌دست می‌آید. از طرف دیگر وقتی که حداکثر جریان در سیم‌پیچی هر قطب و در جهتی که شار حاصل از آن در جهت شار آهنرباهای دائم باشد، جاری شود نقطه کار به نقطه‌ای با چگالی شار 0.887 تسلا جابه‌جا خواهد شد. همچنین اگر جریان در خلاف جهت قبلی در سیم‌پیچی هر قطب جاری گردد نقطه کار به نقطه‌ای با چگالی 0.692 تسلا جابه‌جا می‌شود.

۲-۳-۶- تحلیل دینامیکی
۱-۲-۳-۶- توزیع چگالی شار در حالت مدار باز
در حالت مدار باز، توزیع چگالی شار فقط ناشی از حضور مگنت‌ها است. شکل ۱۶ نقشه خطوط شار را در یک جفت قطب نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: تغییرات ولتاژ داخلی بر حسب زمان

جدول ۱۰ مقادیر دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ و مقدار مؤثر و اعوجاج هارمونیک کل را نشان می‌دهد.

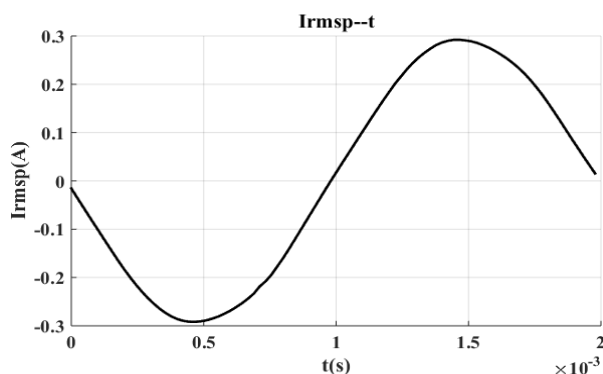
جدول ۱۰: مقادیر دامنه مؤلفه اصلی، مقدار مؤثر و اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ داخلی

مقدار	پارامتر	تعریف
۸۴/۰۶	$E_{f \max} [V]$	حداکثر ولتاژ بی‌باری
۵۹/۴۳	$E_{f \text{ rms}} [V]$	مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ داخلی
۴/۹ %	THD	اعوجاج هارمونیک کلی

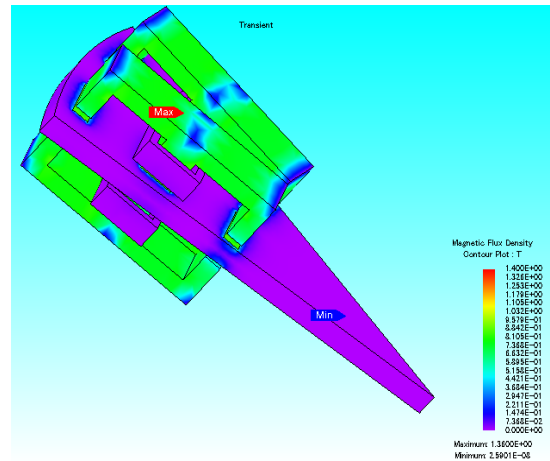
این مقدار THD ولتاژ داخلی برای این گونه ژنراتورها قابل قبول است. با توجه به قطب صاف بودن این ژنراتورها و نداشتن کفک‌های قطب‌ها و شکل آهنرباهای دائم این نتیجه برای THD ولتاژ بسیار مناسب است. البته این ژنراتورها اگر در قطب پائین طراحی گردند، دارای THD بالا خواهند بود.

۴-۲-۳-۶- نمودار تغییرات جریان خروجی هر قطب بر حسب زمان

شکل موج جریان خروجی مربوط به هر قطب به صورت شکل ۲۰ است. به هر کدام از سیم‌پیچی‌های مربوط به هر قطب، بار اهمی سلفی سری با مقدار مقاومت ۱۹۸/۴۲ اهم و اندوکتانس ۰/۰۳۹۱ هانری متصل شده است.



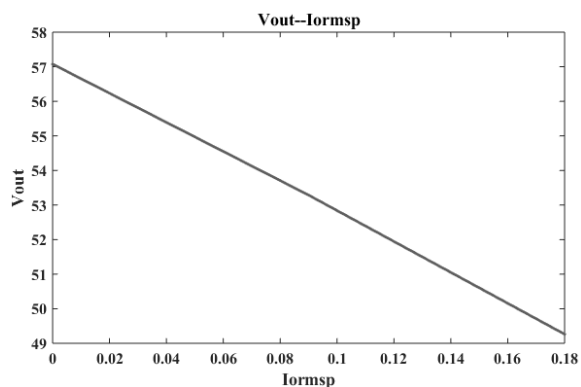
شکل ۲۰: نمودار تغییرات جریان خروجی هر قطب بر حسب زمان



شکل ۱۷: ب: نقشه رنگی توزیع چگالی شار موتور در حالت مدار باز در موقعیت ۲

۲-۲-۳-۶- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب جریان خروجی

در این بخش رفتار ژنراتور از بی‌باری تا بار نامی در شکل ۱۸ به نمایش درآمده است.



شکل ۱۸: نمودار ولتاژ خروجی بر حسب جریان خروجی هر قطب

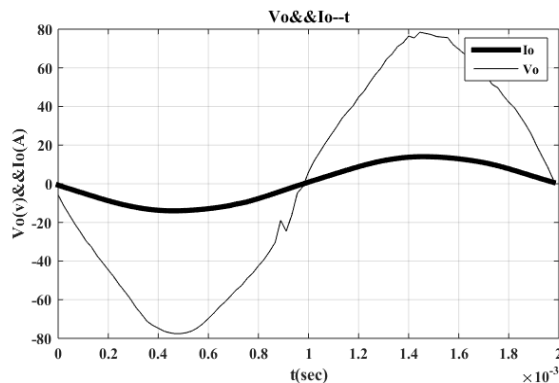
مشاهده می‌شود که تنظیم ولتاژ این ژنراتور در بار نامی ۱۲/۳۴ در صد است. این مقدار شاید در نگاه اول زیاد به نظر آید، ولی در این ژنراتور چون توان بین هسته‌های E شکل تقسیم می‌شود و به این ترتیب سهم هر کدام از این هسته‌های E شکل کم می‌شود، لذا این تنظیم ولتاژ طبیعی است. از طرفی چون کاربرد این ژنراتور در توربین‌های بادی است، لذا باید این ژنراتورها توسط مبدل‌های کامل^۹ الکترونیک قدرت به شبکه وصل شود. این مبدل‌ها این مشکل ژنراتور را حل می‌کنند.

۳-۲-۳-۶- نمودار تغییرات ولتاژ داخلی ژنراتور بر حسب زمان

در این بخش ولتاژ القائی بی‌باری (ولتاژ داخلی یا Back emf) مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییرات ولتاژ داخلی در یک سیکل الکتریکی که توسط نرم‌افزار JMAG Designer 10.5 محاسبه شده در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

۶-۳-۲-۶- نمودار تغییرات ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور بازمان در یک نمودار

شکل موج ولتاژ خروجی و جریان خروجی ژنراتور به صورت هم‌زمان در یک نمودار در شکل ۲۲ آمده است.

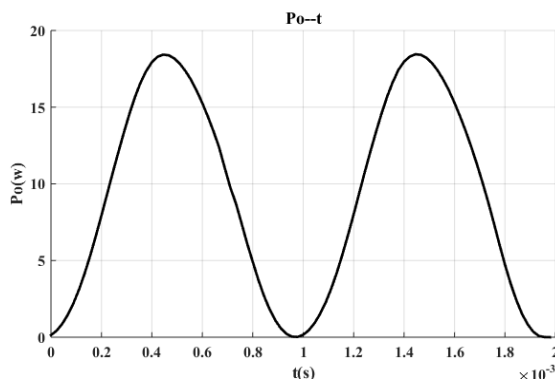


شکل ۲۲- نمودار ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور بر حسب زمان

لازم به ذکر است که تفاوت نمودار جریان در این قسمت با جریان قبلی این است که در این قسمت جریان خروجی ژنراتور رسم شده ولی در قسمت‌های قبل نمودار جریان هر سیم‌پیچی رسم شده است. جریان خروجی ژنراتور از ضرب کردن ۲ برابر تعداد قطب‌ها در جریان هر قطب به دست می‌آید.

۶-۳-۲-۷- نمودار تغییرات توان خروجی هر قطب ژنراتور بر حسب زمان

شکل موج توان خروجی مربوط به هر قطب به صورت شکل ۲۳ است.



شکل ۲۳: نمودار تغییرات توان خروجی هر قطب ژنراتور بر حسب زمان

جدول ۱۳ مقدار متوسط توان خروجی هر قطب را نشان می‌دهد.

جدول ۱۳: مقدار متوسط توان خروجی هر قطب

مقدار	پارامتر	تعریف
۹/۲۲	$P_{outp} [W]$	مقدار متوسط توان خروجی هر قطب

جدول ۱۱ مقادیر دامنه مؤلفه اصلی جریان و مقدار مؤثر و اعوجاج هارمونیک کل را نشان می‌دهد.

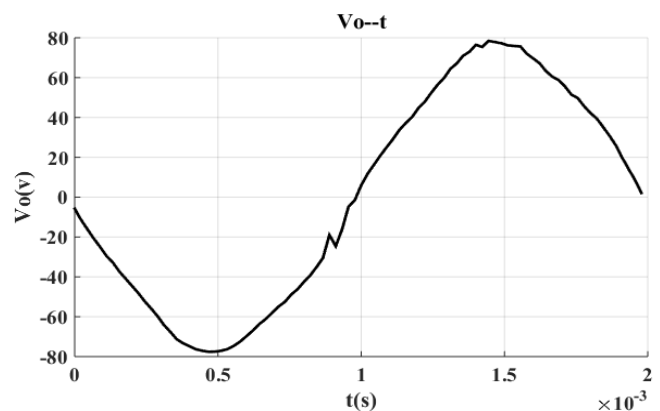
جدول ۱۱: مقادیر دامنه مؤلفه اصلی، مقدار مؤثر و اعوجاج هارمونیک کل جریان هر قطب

مقدار	پارامتر	تعریف
۰/۲۹۲۵	$I_{a max} [A]$	حداکثر جریان خروجی
۰/۲۰۶۸	$I_{a1ms} [A]$	مقدار مؤثر مؤلفه اصلی جریان خروجی
۱/۴۵ %	THD	اعوجاج هارمونیک کلی

مشاهده می‌شود که THD جریان از THD ولتاژ داخلی کمتر است. اعوجاج شکل موج‌های ولتاژ و جریان به دلیل وجود مؤلفه‌هایی غیر از مؤلفه اصلی است. مؤلفه‌های جریان از تقسیم مؤلفه‌های ولتاژ بر امپدانس مدار در فرکانس مربوط به آن مؤلفه‌ها به دست می‌آیند. امپدانس در ژنراتور، مجموع امپدانس بار و امپدانس سنکرون است که خاصیت سلفی دارد. لذا دامنه مؤلفه‌های جریان کمتر از دامنه مؤلفه‌های ولتاژ داخلی است؛ و به این ترتیب اعوجاج شکل موج جریان از ولتاژ کمتر است.

۶-۳-۲-۵- نمودار تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب زمان

شکل موج تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب زمان به صورت شکل ۲۱ است.



شکل ۲۱: تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب زمان

جدول ۱۲ مقادیر دامنه مؤلفه اصلی ولتاژ خروجی و مقدار مؤثر و اعوجاج هارمونیک کل را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲: مقادیر دامنه مؤلفه اصلی، مقدار مؤثر و اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ خروجی

مقدار	پارامتر	تعریف
۷۵/۶۴	$V_{o max} [V]$	حداکثر ولتاژ خروجی
۵۳/۴۹	$V_{o1ms} [V]$	مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خروجی [V]
۴/۰۴	THD	اعوجاج هارمونیک کلی

۶-۳-۲-۸- مقایسه بین نتایج حاصل از الگوریتم و روش اجزا محدود

جدول ۱۴ نتایج حاصل از الگوریتم را به همراه نتایج حاصل از روش اجزاء محدود را نمایش می‌دهد.

جدول ۱۴: مقایسه بین نتایج حاصل از الگوریتم و روش اجزاء محدود

پارامتر	الگوریتم طراحی اولیه	روش اجزا محدود	درصد خطا
$B_g [T]$	۰/۷۸۳	۰/۷۹۵	۱/۵۱
$E_f [V]$	۶۰/۷	۵۹/۴۳	۲/۲۹
$V_{out} [V]$	۵۰	۵۲/۴۹	۶/۵۲
$I_{msp} [A]$	۰/۱۹۶۱	۰/۲۰۶۸	۵/۱۷
$X_s [\Omega]$	۵۶/۳۵	۵۵/۴	۱/۷۱۴

مشاهده می‌شود که مقادیر به‌دست‌آمده از اجزا محدود با نتایج الگوریتم بهینه‌شده چندان تفاوتی ندارد. از این اختلاف اندک می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم طراحی ارائه‌شده برای طراحی ژنراتور شار متقاطع در این محدوده توان یک الگوریتم درست است. در مورد بهینه‌سازی شاید این ایراد به این مسئله وارد باشد که از کجا باید مطمئن بود که این نقطه یک نقطه بهینه برای این توان است. به همین دلیل شبیه‌سازی مجددی انجام شد و مقادیر متغیرهای تصمیم k_u ، k_l و N_p به‌صورت نمونه به ترتیب ۲/۹ و ۱/۹ و ۴۹۰ در نظر گرفته شد. ژنراتوری که با این مشخصات شبیه‌سازی شد، توان ۳۹۰ وات را تحویل می‌دهد. مشاهده می‌شود که ژنراتور نمی‌تواند توان نامی (۴۰۰ وات) را تحویل دهد.

۶-۳-۲-۹- مقادیر پریونیت شده ژنراتور

جدول ۱۵ مقادیر پریونیت شده ژنراتور را نمایش می‌دهد.

جدول ۱۵: مقادیر پریونیت‌شده ژنراتور

ردیف	مقدار	پارامتر	ردیف	مقدار	پارامتر
۱	۱	V_{out}	۲	۰/۲۲۱۲	X_s
۳	۱/۱۸۴۶	E_f	۴	۰/۰۵۲۲	R_a
			۵	۱	I_{msp}

۶-۳-۲-۱۰- مقایسه بین ژنراتور طراحی‌شده و برخی ساختارهای شار متقاطع

در جدول ۱۶، برخی پارامترهای طرح ارائه‌شده در این مقاله با پارامترهای در دسترس و موجود ساختارهای ارائه‌شده در مراجع [۳۰، ۴] باهم مقایسه می‌شوند. البته باید دقت نمود که اطلاعاتی از لحاظ تعداد قطب‌ها و سطح ولتاژ و توان ماشین‌های موجود در مرجع ۴ ذکر نشده است.

جدول ۱۶: مقایسه بین طرح پیشنهادی و ساختارهای پایه

ساختار TFPM و نویسنده	قطر (mm)	گشتاور نامی (Nm)	جرم مواد اکسید مس (kg)	گشتاور به جرم (Nm/Kg)	ضریب قدرت داینامی
دو طرفه-تک سیم پیچه با هسته C شکل [۴]	۱۲۰۰	۹۶/۷۵	-	-	-
دوطرفه- دو سیم پیچه [۴]	۵۰۰	۲۸۰	۲۷/۲	۱۰/۲	-
دو طرفه-تک سیم پیچه با هسته U شکل [۴]	۳۷۰	۱۲۶۰	۳۷	۱۷/۳	-
دو طرفه-تک سیم پیچه با هسته C شکل [۴]	۳۶۰	۲۸۰	۲۲/۷	۱۲/۳	۰/۵۳
قطب چنگالی [۴]	۳۹۰	۲۵۰۰	۱۱۰	۲۲/۷	۰/۴
قطب چنگالی [۴]	۳۴۰	۵۴۰	۲۰/۸	۲۶	-
روتور دیسکی با هسته U شکل [۳۰]	۱۶۶	۱۵۳	۱/۱۳۴	۱/۳۴۷۳	۰/۹۱
طرح پیشنهادی	۱۷۰	۱/۶۶۹	۱/۰۳۰۸	۱/۶۱۹۱	۰/۸۵

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار جدید از ژنراتورهای شار متقاطع مغناطیس دائم روتور دیسکی مطرح گردید. ازجمله مزیت‌های روتور دیسکی، ساختار ساده و کاربرد آن در سرعت‌های بالا است. این مقاله الگوریتم طراحی اولیه یک ژنراتور شار متقاطع با هسته E شکل را ارائه داد. الگوریتم طراحی اولیه توسط الگوریتم NPSO-LRS بهینه‌سازی شد و ابعاد و پارامترهای ژنراتور از الگوریتم طراحی بهینه‌شده، به‌دست آمد. برای تأیید رفتار ژنراتور بهینه‌شده، از روش اجزاء محدود سه‌بعدی استفاده شد. طرح ارائه‌شده در این مقاله به‌دلیل قطب‌های بالا می‌تواند جایگزین مناسبی برای ژنراتورهای شار شعاعی معمول در کاربردهای سرعت پائین باشد. از طرف دیگر، چون توان بین قطب‌ها تقسیم می‌شود، می‌توان گفت که این طرح نسبت به طرح‌های مشابه دارای قابلیت اطمینان بالاتری است.

مراجع

- [۱] حجت حاتمی، محمدباقر بناء شریفیان، محمدرضا فیضی، «ارائه روش جدید طراحی بهبودیافته ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری سرعت پائین مورد استفاده در خودروهای هیبریدی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۲، صفحه ۶۴-۵۱، تابستان ۱۳۹۴.
- [2] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim and W. P. Hew, "Design, Analysis, and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite-Element Analysis," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 4, pp. 1479-1492, April 2013.
- [3] I. Hasan, T. Husain, M. W. Uddin, Y. Sozer, I. Husain and E. Muljadi, "Analytical modeling of a novel transverse flux machine for direct drive wind turbine applications," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 2161-2168.

- Transactions. Magnetics, vol. 44, no. 1, pp. 75-80, Jan. 2008.
- [18] E. Muljadi, C. P. Butterfield and Yih-Huei Wan, "Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications," Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, St. Louis, MO, USA, 1998, pp. 174-178 vol.1.
- [19] I. A. Viorel, L. Strete and K. Hameyer, "Construction and Design of a Modular Permanent Magnet Transverse Flux Generator," Advances in Electrical and Computer Engineering, vol.10, no.1, pp.3-6, 2010.
- [20] M. R. Zare and M. Marzband, "calculation of cogging force in permanent magnet linear motor using analytical and finite element methods", majlesi journal of electrical engineering, vol 4, No 4, Des 2010.
- [21] A. Darabi, H. Moradi and H. Azarinfar, "Design and Simulation of Low Speed Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Machine," International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:6, No:1, 2012.
- [22] G. Patterson, T. Koseki, Y. Aoyama and K. Sako, "Simple Modeling and Prototype Experiments for a New High-Thrust, Low-Speed Permanent Magnet Disk Motor," in Proc. ICEMS2009, Tokyo, Japan, 15-18, pp. 1-6, November 2009.
- [23] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Published by John Wiley & Sons, Inc., Publication; Second edition, 2009.
- [24] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim and W. P. Hew, "Design, Analysis, and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite-Element Analysis," IEEE Transactions. Magnetics, vol. 49, no. 4, pp. 1479-1492, April 2013.
- [25] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T. A. Lipo, "A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations," IEEE Transactions. Energy Conversion, vol. 14, no. 2, pp. 185-192, Jun 1999.
- [26] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T. A. Lipo, "A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines," IEEE Transactions. Industry Applications, vol. 34, no. 1, pp. 92-97, Jan/Feb 1998.
- [27] محمدعلی توکلی، مهدی معلم، «بهینه‌سازی موتور سوئیچ لاکتانیسی دارای دو استاتور با روش تاگوچی بهبودیافته»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۴۹-۵۷، تابستان ۱۳۹۵.
- [28] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. of the International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1992-1994.
- [29] A. I. Selvakumar and K. Thanushkodi, "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 42-51, Feb. 2007.
- [30] S. Hosseini, J. S. Moghani, N. F. Ershad and B. B. Jensen, "Design, Prototyping, and Analysis of a Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 4, pp. 772-780, April 2011.
- [4] M. R. Dubois, Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct Drive Wind Turbines, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2004.
- [5] Z. Jia, H. Lin, S. Fang and Y. Huang, "A Novel Transverse Flux Permanent Magnet Generator with Double C-Hoop Stator and Flux-Concentrated Rotor," in IEEE Transactions, Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015.
- [6] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha and J. A. Ferreira, "Review of generator systems for direct-drive wind turbines," in European Wind Energy Conference & Exhibition, Belgium, pp. 1-11. 2008.
- [7] D. Svehkarenko, On Design and Analysis of a Novel Transverse Flux Generator for Direct-driven Wind Application, Ph.D. Thesis, KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden 2010.
- [8] N. Dehlinger and M. R. Dubois, "A New Design Method for the Claw Pole Transverse Flux Machine Application to the Machine No-Load Flux optimization. Part I: Accurate Magnetic Model with Error Compensation," Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference, 2010.
- [9] W. M. Arshad, P. Thelin, T. Backstrom and C. Sadarangani, "Use of transverse-flux machines in a free-piston generator," IEEE Transactions. Industry Applications, vol. 40, no. 4, pp. 1092-1100, July-Aug. 2004.
- [10] A. COSIC, Analysis of a Novel Transverse Flux Machine with a Tubular Cross-section for Free Piston Energy Converter Application, Ph.D. Thesis, KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden 2010.
- [11] S. Moghani and B. B. Jensen, "Accurate Modeling of a Transverse Flux Permanent Magnet Generator Using 3D Finite Element Analysis," Advances in Electrical and Computer Engineering, vol.11, no.3, pp.115-120, 2011.
- [12] C. Liu, J. Zhu, Y. Wang, G. Lei and Y. Guo, "Design Considerations of PM Transverse Flux Machines with Soft Magnetic Composite Cores," in IEEE Transactions. Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, June 2016.
- [13] D. Svehkarenko, On Analytical Modeling and Design of a Novel Transverse Flux Generator for Offshore Wind Turbines, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2007.
- [14] W. M. Arshad, T. Backstrom and C. Sadarangani, "Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine," Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International, Cambridge, MA, 2001, pp. 115-121.
- [15] C. Liu, J. Zhu, Y. Wang, G. Lei and Y. Guo, "Cogging Torque Minimization of SMC PM Transverse Flux Machines Using Shifted and Unequal-Width Stator Teeth," IEEE Transactions. Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, June 2016.
- [16] A. Mitcham, Rolls-Royce IRD Ltd, "Transverse Flux Motors for Electric Propulsion of Ships", New Topologies for Permanent Magnet Machines Conference, IEE Colloquium on Newcastle upon Tyne, 1997.
- [17] S. M. Hosseini, M. Agha-Mirsalim and M. Mirzaei, "Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial-Flux Coreless Permanent-Magnet Generator," IEEE

زیر نویس ها

5- Three-Dimensional Finite Element

6- Soft Magnetic Composite

7- Transverse Flux Permanent Magnet Machine

8- Cogging Torque

9 -Full Bridge

1- Sizing Equation

2- Particle Swarm Optimization

3- Local Random Search

4- Total Harmonic Distortion