

بهینه‌سازی ماشین شار سوئیچینگ محوری تحریک سطحی با استفاده از روش پاسخ سطح

هانی فکری^۱ محمدعلی شمس‌نژاد^۲ سید محمود هاشمی‌نژاد^۳

۱- مری- گروه مهندسی برق و کامپیوتر - واحد بم - دانشگاه آزاد اسلامی - بم - ایران
فارغ التحصیل دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران
fekri@iaubam.ac.ir

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

۳- استادیار- پژوهشکده انرژی - پژوهشگاه مواد و انرژی - کرج - ایران
hashemi@merc.ac.ir

چکیده: در این مقاله، ساختاری جدید از انواع ماشین‌های شار سوئیچینگ محوری برای استفاده در توربین‌های بادی در سرعت‌های پایین، پیشنهاد شده است. این ماشین از یک استاتور و یک روتور دیسکی تشکیل شده است. روتور فاقد هر گونه سیستم تحریک بوده و آهنرباها در سطح استاتور قرار گرفته‌اند. سیم‌پیچی سه‌فاز نیز در فضای بین آهنرباها قرار گرفته است. با استفاده از معادلات توان ابعاد اولیه ماشین استخراج شده سپس برخی از پارامترهای مهم مانند ضخامت تیغه روتور، ضخامت یوغ استاتور و زاویه تیغه روتور با هدف افزایش نیروی محرکه الکتریکی، کاهش گشتاور دندانه و کاهش اعوجاج هارمونیک کل، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و روش پاسخ سطح و با کمک نرم‌افزار المان محدود بهینه‌سازی شده و ترکیب مناسب آنها انتخاب شده است. در انتها یک نمونه اولیه بر مبنای فناوری کامپوزیت مغناطیسی نرم ساخته شده و خروجی با نتایج حاصل از روش پاسخ سطح و المان محدود مقایسه گردیده است. با استفاده از این روش بهینه‌سازی نیروی محرکه الکتریکی به میزان ۱۸٪ افزایش و اعوجاج هارمونیک کل و گشتاور دندانه به ترتیب ۵۶٪ و ۶۳٪ کاهش داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: انرژی بادی، ماشین‌های شار سوئیچینگ محوری، طراحی آزمایش‌ها، روش پاسخ سطح، المان محدود.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.175

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

نام نویسنده مسئول: هانی فکری

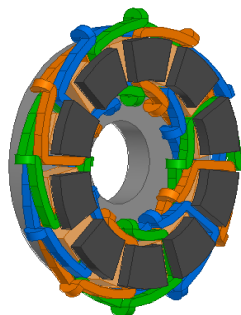
نشانی نویسنده مسئول: ایران - بم - دانشگاه آزاد اسلامی واحد بم - دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

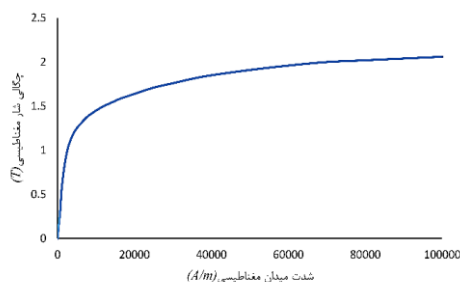
ژنراتور مغناطیس دائم یکی از گزینه‌های مناسب در سیستم تبدیل انرژی توربین‌های بادی [۱] و خودروهای برقی [۲] است. بسته به جهت شار که از فاصله هوایی ماشین عبور می‌کند، ماشین‌های مغناطیس دائم به دودسته اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: الف) ماشین‌های شار شعاعی و ب) ماشین‌های شار محوری. در ماشین‌های شار شعاعی، شار از طریق شکاف هوا در جهت شعاعی حرکت می‌کند در حالی که در ماشین‌های شار محوری مسیر شار عمده‌تاً محوری است. ژنراتورهای شار محوری اگرچه مزایای بی‌شماری از جمله نسبت گشتاور به وزن بالا به علت استفاده از ماده هسته کمتر، ابعاد کوچک‌تر، فاصله هوایی مسطح و قابل تنظیم، سروصدا و لرزش کمتر نسبت به ماشین‌های شار شعاعی دارند [۳]، اما مشکلاتی همچون نیروی جاذبه قوی بین روتور و استاتور که منجر به انحراف صفحه روتور می‌شود، تولید بدنه موزق برای استاتور دیسکی، هزینه بالا و نیز در مواردی پیچیدگی ساختار روتور و استاتور سرعت رشد این فناوری را با چالش روبرو کرده است [۴].

ماشین‌های شار سوئیچینگ یکی از انواع ماشین‌های بدون جاروبک با ساختار برجستگی مضاعف است که دارای منبع تحریک بوده و سیم‌پیچ‌های آرمیچر بر روی استاتور قرار می‌گیرد و روتور فاقد آهن‌ربا و یا سیم‌پیچی می‌باشد [۵]. ماشین‌های مغناطیس دائم شار سوئیچینگ محوری با داشتن مزایایی همچون روتور سبک به علت قرارگیری سیستم تحریک یا همان آهن‌رباهای دائم در استاتور، بازدهی بالا، کنترل‌پذیری آسان پاسخی مناسب به چالش پیچیده موجود است. پس از ارائه اولین نمونه از ماشین‌های مغناطیس دائم شار سوئیچینگ محوری در سال ۲۰۱۱ [۶، ۷] تا کنون مدل‌های مختلفی از آن برای کاربردهای انرژی بادی [۸]، خودروهای برقی [۹] و با ساختارهای دو روتور [۱۰]، دو استاتور [۱۱، ۱۲]، تحریک هیبریدی [۱۳]، مقاوم در برابر خطا ارائه شده است [۱۴]. برخی از این پژوهش‌ها نیز باهدف بهینه‌سازی و یا کاهش گشتاور [۱۵-۱۷] صورت گرفته است. از دیگر مزایای این نوع ماشین‌ها تغییر سرعت ماشین با تغییر قطب‌های روتور و مستقل از قطب‌های استاتور می‌توان نام برد. استفاده از کامپوزیت‌های مغناطیسی نرم (SMC) [۱۸-۲۰] از دیگر راه کارهای مناسب برای کاهش هزینه‌ها و تولید ماشین‌های با طراحی پیچیده است.

روش‌های طراحی آزمایش‌ها (DOE) [۲۱، ۲۲] اصطلاحاً به مجموعه روش‌های علمی مبتنی بر آمار جهت بررسی میزان و شدت تأثیر متغیرهای مستقل بر خروجی مورد نظر اطلاق می‌شود. در این روش‌ها ابتدا آزمایش‌هایی فیزیکی یا شبیه‌سازی‌های کامپیوتری با میزان مشخص از متغیرهای ورودی، طراحی و انجام می‌شود. سپس با استفاده از علم آمار به تحلیل پاسخ‌ها پرداخته شده و حتی تأثیر حالات مختلف نیز با دقت قابل قبول پیش‌بینی می‌شود. اگر چه استفاده از این روش‌ها در دیگر علوم بسیار رایج است اما اخیراً در



شکل (۱): ماشین مغناطیس دائم شار سوئیچینگ پیشنهادی



شکل (۲): منحنی BH نرم مغناطیس کامپوزیتی مورد استفاده

زمینه مهندسی برق و حتی طراحی ماشین‌های الکتریکی نیز تحقیقاتی ارزشمند مشاهده شده است.

در این پژوهش ساختاری جدید از ماشین‌های شار سوئیچینگ محوری ارائه شده است که با استفاده از آهن‌ربا در سطح استاتور و نیز طراحی ابتکاری در چیدمان آهن‌ربا، رتور و استاتور، خروجی مناسب را ایجاد نموده و نهایتاً بهینه‌سازی فرآیند طراحی، منجر به ساخت یک دستگاه نمونه بر مبنای فناوری کامپوزیت مغناطیسی نرم شده است. این مقاله در چند بخش تنظیم شده است. ابتدا به معرفی ساختار پیشنهادی و اصول کار آن پرداخته شده، سپس با استفاده از معادلات الکترومغناطیس و مشخصات SMC طراحی اولیه‌ای صورت گرفته است. ساختار طراحی شده با استفاده از روش پاسخ سطح و نرم‌افزارهای المان محدود بهینه‌سازی شده است. ابعاد بهینه در نرم‌افزار المان محدود آزموده و با مقادیر مورد پیش‌بینی مقایسه و در انتها نتایج نمونه آزمایشی ساخته شده ارائه شده است.

۲- ساختار ماشین مغناطیس دائم شار سوئیچینگ محوری

ماشین مغناطیس دائم شار سوئیچینگ پیشنهادی از یک روتور و یک استاتور ساخته شده است. تفاوت اصلی بین این ساختار و دیگر ماشین‌های موجود این است که در این ساختار سیستم تحریک که همان آهن‌رباهای دائمی می‌باشند در سطح استاتور قرار می‌گیرند. میدان مغناطیسی آهن‌رباها نیز در راستای محور ماشین می‌باشد؛ بر خلاف دیگر انواع ماشین‌های مغناطیس دائم شار سوئیچینگ محوری که آهن‌رباها در میان بخش‌های استاتور احاطه شده و میدان مغناطیسی در راستای محیط ماشین است. جهت میدان مغناطیسی هر

۳- معادلات طراحی الکترومغناطیسی

مانند همه ماشین‌های شار محوری ابعاد اصلی ماشین با استفاده از معادلات توان به دست می‌آید؛ بنابراین قطر خارجی ماشین از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$D = \sqrt[3]{\frac{240P_2N_s}{\sqrt{2}\pi^3N_rk_dk_Fk_{i0}(1-k_{i0}^2)A_sB_{gmax}\alpha_i n\eta}} \quad (1)$$

که در اینجا P_2 توان خروجی ماشین، N_s و N_r به ترتیب قطب‌های استاتور و روتور، k_d ضریب نشتی شار، k_F ضریب توزیع چگالی شار در فاصله هوایی، k_{i0} نسبت قطر داخلی و خارجی ماشین، A_s بیشینه چگالی جریان، B_{gmax} بیشینه چگالی شار فاصله هوایی، α_i نسبت سطح دندان استاتور به سطح استاتور، n سرعت روتور و η بازده ماشین می‌باشد.

رابطه بین قطب‌های استاتور و روتور نیز توسط فرمول زیر نشان داده می‌شود [۲۴]:

$$N_s = N_r \pm k \quad (2)$$

که در اینجا k عددی طبیعی و زوج می‌باشد یعنی: $k = 2, 4, 6, \dots$ و سرعت روتور نیز با رابطه زیر بیان می‌شود [۲۵]:

$$n = \frac{60f}{N_r} \quad (3)$$

در این رابطه نیز f فرکانس ولتاژ القایی در سیم پیچ‌های ماشین می‌باشد.

بنابراین باتوجه به روابط بالا و ترکیب معادلات (۱) و (۳) قطر خارجی یک ماشین شار سوئیچینگ محوری اختصاصاً از معادله زیر به دست می‌آید:

$$D = \sqrt[3]{\frac{2\sqrt{2}P_2N_s}{\pi^3N_rk_dk_Fk_{i0}(1-k_{i0}^2)A_sB_{gmax}\alpha_i f\eta}} \quad (4)$$

۴- بهینه‌سازی

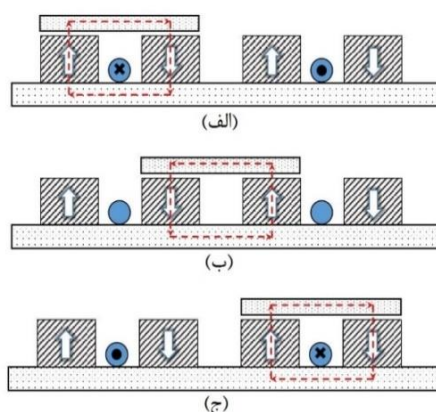
برای بهبود عملکرد ماشین از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. یکی از بهترین گزینه‌ها برای بهینه‌سازی ابعاد ماشین استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها است [۲۶]. طراحی آزمایش‌ها یک رویکرد علمی است که با استفاده از علم آمار به محققان اجازه کسب دانشی برای فهم بهتر یک فرایند و همچنین تعیین چگونگی تأثیر ورودی‌ها بر روی خروجی‌ها را می‌دهد [۲۷]. بسیاری از منابع در بهینه‌سازی خروجی ژنراتور عوامل مختلفی را در نظر گرفته‌اند اما میزان تأثیرگذاری این عوامل در نظر گرفته نشده است به طوری که ممکن است عاملی بی‌تأثیر نیز باشد و یا ممکن است متغیری در یک خروجی نقش داشته و در خروجی دیگر بی‌تأثیر باشد [۲۸]؛ بنابراین تحلیل‌های مورد استفاده در طراحی آزمایش‌ها می‌تواند پاسخی قانع‌کننده و مستند به این چالش داشته باشند. در این روش اگر فرض کنیم پاسخ y تابعی از متغیرهای مستقل x_1, x_2, x_3, \dots باشد بنابراین داریم:

$$y = f(x_1, x_2, \dots) + \epsilon \quad (5)$$

آهنربا در خلاف جهت آهنرباهای مجاور است. هر فاز از سیم‌پیچی‌های سه‌فاز آرمیچر به صورت متمرکز دو آهنربای مجاور را احاطه کرده و به صورت دولاویه در بین این آهنرباها جای می‌گیرند. اما روتور این ماشین دقیقاً مانند دیگر انواع این نوع ماشین‌ها فاقد تحریک بوده و تنها از مواد مغناطیسی نرم جهت هدایت شار مغناطیسی ساخته می‌شود.

شکل (۱) تصویری از یک ماشین شار سوئیچینگ مغناطیس دائم آهنربای سطحی سه‌فاز ۱۲/۱۰ (قطب‌های روتور/ قطب‌های استاتور) را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی صورت گرفته از اطلاعات آهنربای NdFeB مدل N42 برای سیستم تحریک و مشخصات نرم مغناطیس کامپوزیتی Somaloy 7001P برای بدنه استفاده شده است. منحنی تغییرات چگالی شار مغناطیسی ماده کامپوزیتی ذکر شده در شکل (۲) آمده است.

نحوه پیوند شار مغناطیسی در بین سیم‌پیچ‌ها و آهنربا در تغییر مکان روتور و ایجاد ولتاژ نیز در شکل (۳) تبیین شده است. برای بیان شرایط مختلف تولید ولتاژ سه حالت را می‌توان در نظر گرفت. با قرار گرفتن روتور در مقابل دو آهنربای سمت چپ سیم‌پیچی (یک آهنربا داخل سیم‌پیچی و دیگری در خارج آن) مانند شکل (۳) الف - الف مسیر شار برقرار شده و باتوجه به جهت مغناطیسی آهنرباها، شار مغناطیسی پیوندی حداکثر مقدار خود را در جهت بالا به پایین خواهد داشت. اما اگر تیغه روتور در وضعیت مانند شکل (۳) ب باشد یعنی در مقابل دو آهنربای داخل سیم‌پیچی باشد از آنجاکه شار مغناطیسی برقرار شده هیچ‌گونه پیوندی با سیم‌پیچی مورد نظر ندارد لذا در القای ولتاژ نیز مشارکتی نخواهد داشت و نهایتاً در صورت قرار گرفتن تیغه روتور در مقابل آهنرباهای سمت راست سیم‌پیچی، (شکل ۳- ج) بیشترین شار پیوندی در جهت مخالف حالت اول با سیم‌پیچ برقرار خواهد شد؛ بنابراین در مجموع سه وضعیت ذکر شده شاهد برقراری شار پیوندی دوقطبی خواهیم بود که با مشتق‌گیری از این شار متعاقباً ولتاژ دو قطبی القا شده در سیم پیچ نیز محاسبه می‌شود.



شکل (۳): نحوه عملکرد ماشین مغناطیس دائم شار سوئیچینگ پیشنهادی با توجه به موقعیت سیم پیچ (الف) جریان شار پیوندی از بالا به پایین درون سیم پیچ (ب) شار پیوندی صفر (ج) جریان شار پیوندی از پایین به بالا

جدول (۱): داده‌های آزمایش‌ها برای طرح مرکب مرکزی

Run	Factor 1 h _r mm	Factor 2 h _{yok} mm	Factor 3 α degree	Response 1 EMF V	Response 2 Torque Nm	Response 3 THD %
1	5	16	29	50/2132	0/952591	3/65263
2	11	11	35	9/83402	0/656054	7/59936
3	16	16	11	1/5172	0/920467	124/884
4	11	11	20	27/8394	0/618294	5/90964
5	20	11	20	12/3103	0/736134	10/9112
6	5	5	29	50/0077	1/11652	3/71974
7	11	20	20	27/8379	0/653461	5/81528
8	1	11	20	23/884	0/854022	12/6091
9	11	11	20	27/8394	0/618294	5/90964
10	11	11	20	27/8394	0/618294	5/90964
11	11	11	20	27/8394	0/618294	5/90964
12	11	11	5	1/99318	0/800405	82/383
13	5	5	11	20/1012	0/972083	9/31836
14	11	11	20	27/8394	0/618294	5/90964
15	11	1	20	9/9774	0/414526	9/24607
16	5	16	11	20/0047	1/00003	9/20799
17	11	11	20	27/8394	0/618294	5/90964
18	16	5	11	1/55799	0/960902	118/381
19	16	16	29	24/1645	0/952202	5/77863
20	16	5	29	24/0892	1/04049	5/95217

آن‌ها به ترتیب مشکل خاصی ایجاد نمی‌کند. از سوی دیگر معمولاً در این گونه روش‌ها چند آزمایش برای نقطه مرکزی در نظر گرفته می‌شود که دقیقاً به همین علت این آزمایش‌ها یکبار انجام شده و نتایج در دیگر مراحل عیناً تکرار شده است.

بعد از طراحی و انجام آزمایش‌ها، عوامل مؤثر بر خروجی و میزان تأثیر آن‌ها و نیز ضرایب چندجمله‌ای رویه پاسخ با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA^۵) توسط نرم افزار تعیین می‌شود.

جدول (۲) تا (۴) نتایج تحلیل واریانس را برای ضد نیروی محرکه، گشتاور دندانه و THD نشان می‌دهد. تبدیل لگاریتمی برای ضد نیروی محرکه و معکوس جذر برای THD مورد استفاده قرار گرفته و برای همه پاسخ‌ها نیز مدل مرتبه دوم پیشنهاد شده است. پارامترهایی که احتمال وقوع آنها بیشتر از ۰/۹۵ باشد تأثیرشان در خروجی مورد نظر معنی‌دار است.

جدول (۲): نتایج تحلیل ANOVA برای مدل نیروی محرکه الکتریکی

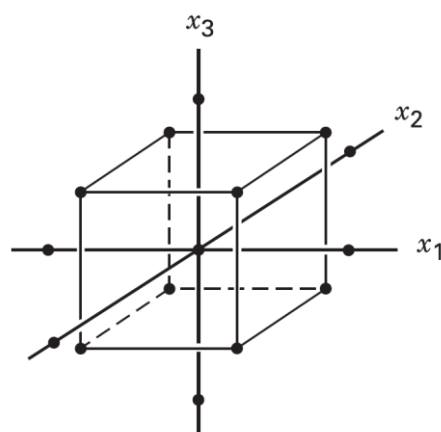
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
A-hr	0/6828	1	0/6828	17/46	0/0008
C-alpha	0/5856	1	0/5856	14/97	0/0015
AC	0/3184	1	0/3184	8/14	0/0121
C ²	0/8835	1	0/8835	22/58	0/0003
Residual	0/5868	15	0/0391		
Cor Total	4/00	19			

که در اینجا ε خطای مشاهده شده در پاسخ y است. در این حالت سطحی را که f معرف آن است را رویه پاسخ می‌نامیم. در بسیاری از مسائل رابطه موجود میان پاسخ و متغیرهای مستقل ناشناخته است؛ بنابراین نخستین گام در روش‌های رویه پاسخ، یافتن تقریب مناسبی از رابطه تابعی واقعی میان y و مجموعه متغیرهای مستقل است. می‌توان تابع f را به صورت یک چندجمله‌ای مرتبه دوم از متغیرهای مستقل به صورت زیر نوشت [۸]:

$$f(x_1, x_2, \dots) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (۶)$$

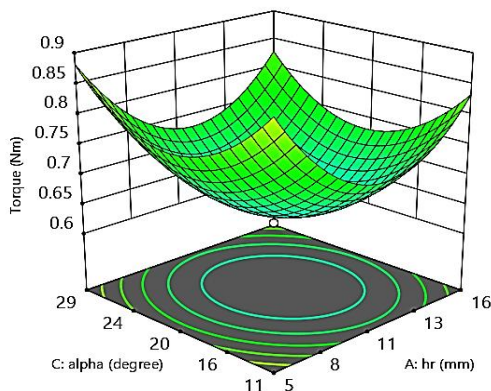
که در آن $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ ضرایب رگرسیون می‌باشند که با استفاده از روش کمترین مربع خطا بدست می‌آیند.

به همین منظور زاویه تیغه روتور، ضخامت تیغه روتور و ضخامت یوغ استاتور به عنوان متغیر ورودی انتخاب می‌شود و تأثیر این سه عامل بر نیروی محرکه الکتریکی، اعوجاج هارمونیک کل (THD) و نیز گشتاور دندانه بررسی می‌گردد. معمولاً در اکثر موارد از طرح فاکتوریل دوسطحی استفاده می‌شود اما با توجه به اینکه انتظار می‌رود تأثیر متغیرها بر خروجی رفتاری غیرخطی داشته باشد از طرح مرکب مرکزی (CCD^۶) استفاده می‌شود (شکل (۴)). بنابراین برای هر متغیر با توجه به بازه مورد نظر برای آن پنج سطح انتخاب می‌گردد (جدول ۱). طرح‌های CCD طرح‌هایی بس کارا برای برازیدن مدل‌های مرتبه دوم است. با توجه به این سطوح برای هر عامل و با استفاده از نرم افزار Design Expert 11 جدول طراحی آزمایش‌ها ساخته می‌شود؛ سپس داده‌های هر سطر جدول به نرم افزار ANSYS Maxwell 16 داده شده و خروجی‌های متناظر با هر سطر استخراج می‌گردد (جدول ۱).

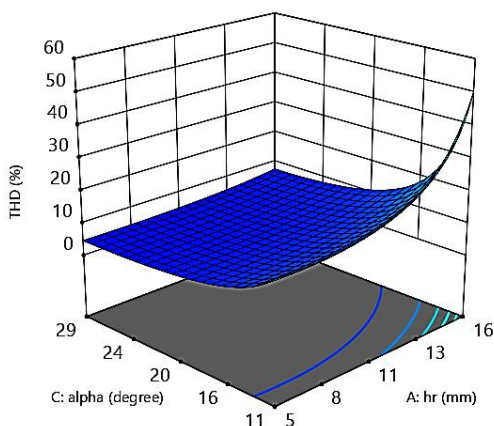


شکل (۴): طرح مرکب مرکزی

برای حذف اثر عوامل محیطی بهتر است که آزمایش‌ها بصورت تصادفی انجام شود اما از آنجا که در این پژوهش، آزمایش‌ها توسط نرم افزار المان محدود صورت می‌گیرد و در محیط نرم افزار اثر عوامل کنترل نشده برای تمامی آزمایش‌ها یکسان می‌باشد بنابراین انجام



شکل (۶): رویه و نمودار تراز پاسخ گشتاور



شکل (۷): رویه و نمودار تراز پاسخ THD

$$\frac{1}{\sqrt{THD}} = -0/117416 + 0/127518h_r + 0/381779\alpha - 0/0011283h_r^2 - 0/00655411\alpha^2 \quad (9)$$

نمودارهای رویه پاسخ و تراز برای معادلات فوق در شکل‌های (۵) تا (۷) آمده است.

همانگونه که از نتایج تحلیل واریانس و معادلات رویه پاسخ برمی آید، تنها تأثیر دو عامل ضخامت و زاویه تیغه روتور بر پاسخ های فوق معنی دار است و ضخامت یوغ استاتور تأثیر زیادی ندارد. شکل (۸) میزان تأثیر عوامل مختلف را بر پاسخ‌های موردنظر نشان می‌دهد.

همان گونه که نشان داده شده است با افزایش ضخامت تیغه روتور ضد نیروی محرکه کاهش و THD افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش زاویه تیغه روتور با افزایش در ضد نیروی محرکه و کاهش در THD همراه است. در همه موارد ذکر شده تأثیر عوامل فوق بر ضد نیروی محرکه بسیار شدیدتر از THD است. شدت تأثیر دو عامل ضخامت و زاویه روتور بر گشتاور دندانه تقریباً یکسان بوده و در نقاط میانی یک مقدار کمینه دارد. باتوجه به نکات مطرح شده و وزن بیشتر به ضد نیروی محرکه، نقطه بهینه‌ای مطابق با جدول (۵) به دست می‌آید.

جدول (۳): نتایج تحلیل ANOVA برای مدل گشتاور دندانه

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
A-hr	0/2270	1	0/2270	9/30	0/0081
C-alpha	0/1364	1	0/1364	5/59	0/0320
A ²	0/2180	1	0/2180	8/93	0/0092
C ²	0/1420	1	0/1420	5/82	0/0292
Residual	0/3662	15	0/0244		
Cor Total	0/7070	19			

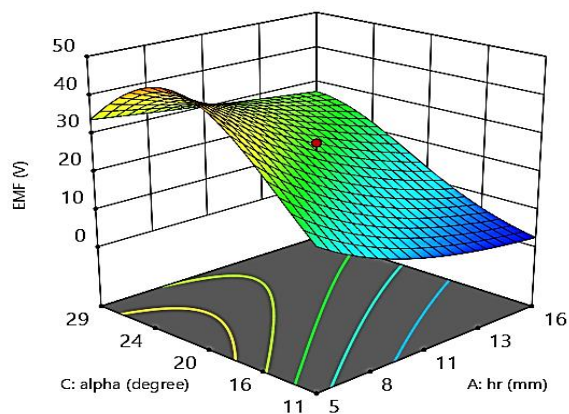
جدول (۴): نتایج تحلیل ANOVA برای مدل THD

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
A-hr	0/0050	1	0/0050	1/33	0/2669
C-alpha	0/0790	1	0/0790	20/84	0/0004
A ²	0/0151	1	0/0151	3/98	0/0644
C ²	0/0392	1	0/0392	10/35	0/0058
Residual	0/0569	15	0/0038		
Cor Total	0/2935	19			

معادلاتی که با استفاده از تحلیل‌های فوق برای خروجی‌ها استخراج شده و رابطه بین متغیرهای مستقل و پاسخ را نشان می‌دهد به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Log}(EMF) = & 0/704224 - 0/122971h_r \\ & + 0/117988\alpha \\ & + 0/00397415\alpha h_r \\ & - 0/00309764\alpha^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Logging Torque} = & 1/61441 - 0/855486h_r \\ & - 0/0501576\alpha \\ & + 0/00384782h_r^2 \\ & + 0/00124685\alpha^2 \end{aligned} \quad (8)$$

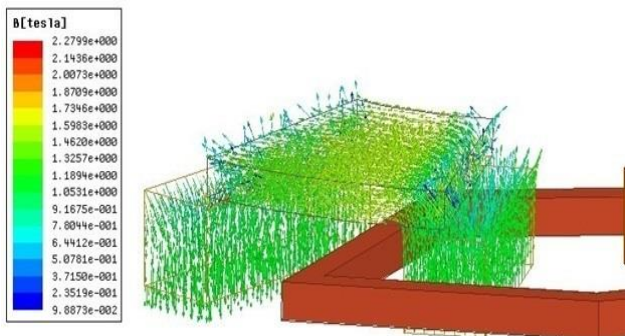


شکل (۵): رویه و نمودار تراز پاسخ نیروی محرکه الکتریکی

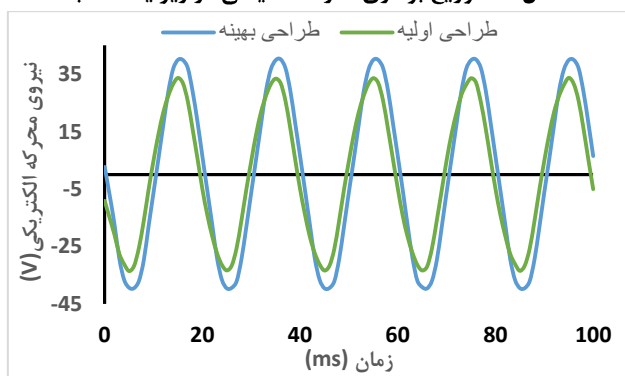
ژنراتور پیشنهادی با ابعاد بهینه با استفاده از نرم‌افزار المان محدود مجدداً شبیه‌سازی شده و مقادیر پیش‌بینی شده با نتایج نرم‌افزار مقایسه گردیده است. مشخصات نهایی ماشینی در جدول (۶) آمده است.

شکل (۹) توزیع شار مغناطیسی را در زیر یک قطب و در حالتی که چگالی شار بیشینه مقدار را دارد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که چگالی شار کمتر از مقدار اشباع بوده و دارای توزیع تقریباً یکنواخت می‌باشد.

شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نیروی محرکه الکتریکی، گشتاور دندانه و محتوای هارمونیکی نیروی محرکه الکتریکی برای طراحی اولیه و ماشین بهینه سازی شده را نشان می‌دهد. براساس نتایج نیروی محرکه الکتریکی ۱۸٪ افزایش و THD به میزان ۵۶٪ کاهش داشته است. از سوی دیگر بیشینه گشتاور دندانه نیز مقداری به مراتب کمتر از ۱ Nm دارد و در فرایند بهینه سازی ۶۳٪ کاهش داشته که این مقدار در راه اندازی و کار در حالت بی باری مشکل چندانی ایجاد نمی‌کند. نتایج دستیابی به یک ساختار بهینه را تأیید می‌نماید.

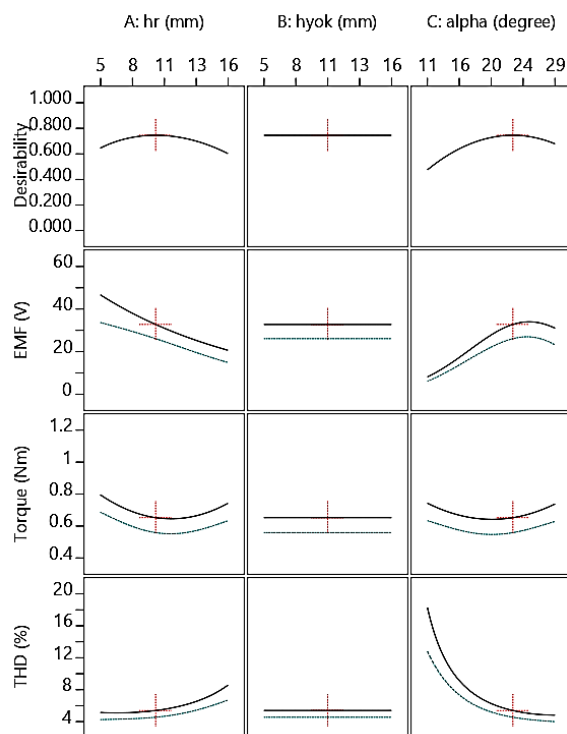


شکل (۹): توزیع برداری شار مغناطیسی در زیر یک قطب



شکل (۱۰): مقایسه نیروی محرکه الکتریکی

جدول (۷) نیز مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از روش پاسخ سطح و مقادیر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را مقایسه کرده است، از نتایج پیداست THD و گشتاور دندانه به مقادیر پیش‌بینی شده نزدیک است و تنها در مقادیر شبیه‌سازی و پیش‌بینی نیروی محرکه الکتریکی تفاوت جزئی مشاهده می‌شود. جهت بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، نمونه‌ای اولیه از ماشین موردنظر ساخته شده است شکل (۱۳).



شکل (۸): میزان تأثیر عوامل مختلف بر پاسخ‌ها

جدول (۵): مقدار ابعاد بهینه

مقدار	عامل
۱۰ mm	h_r
۱۱ mm	h_{yok}
۰۲۴	α

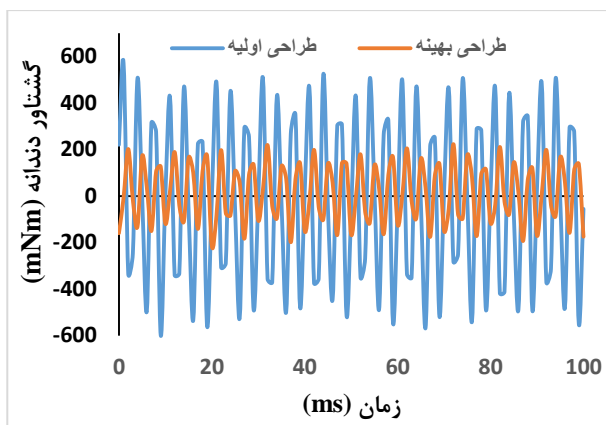
جدول (۶): پارامترها و ابعاد ماشین بهینه

مقدار	پارامتر
۶۰ mm	شعاع خارجی
۴۰ mm	شعاع داخلی
۱ mm	فاصله هوایی
۱۰ mm	ضخامت استاتور
۱۰ mm	ضخامت روتور
۲۰×۱۰×۱۰ mm	ابعاد آهنربا
۸۰۰ دور	تعداد دورهای سیم‌پیچی
۰۳۰	گام قطبی استاتور
۱۲	تعداد قطب استاتور
۱۰	تعداد قطب روتور
۰۲۴	گام قطبی روتور
۳۰۰ rpm	سرعت نامی
۲۵۷	ولتاژ نامی

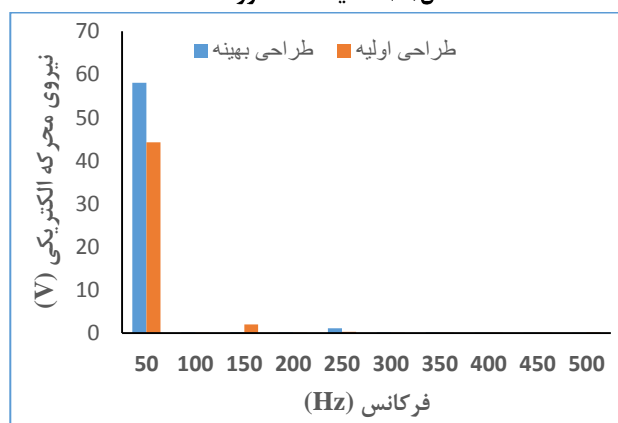


شکل (۱۳): نمایی از ژنراتور ساخته شده

شکل موج سه فاز که توسط اسیلوسکوپ به نمایش گذاشته شده نیز در شکل (۱۴) آمده است. نمودار محتوای هارمونیکی پیوسته محاسبه شده ولتاژ فاز توسط اسیلوسکوپ نیز در شکل (۱۵) نشان داده شده است. THD برای ماشین تحت آزمایش 5/58٪ بدست آمده است که بسیار به مقدار مربوط به نتایج شبیه‌سازی یعنی 4/1٪ نزدیک است.



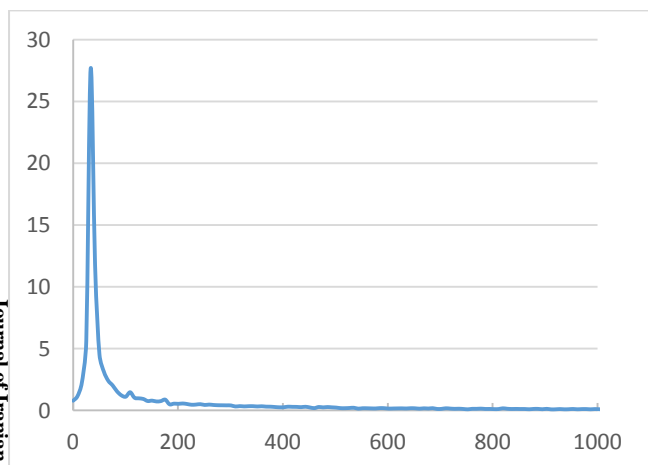
شکل (۱۱): مقایسه گشتاور دندانه



شکل (۱۲): مقایسه محتوای هارمونیکی نیروی محرکه الکتریکی

جدول (۷): مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با شبیه‌سازی شده

کمیت خروجی	مقدار پیش‌بینی شده	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا
نیروی محرکه الکتریکی	32/67 V	26/07 V	۲۴
گشتاور دندانه	0/6 Nm	0/63 Nm	4/7
THD	4/85	4/1	18



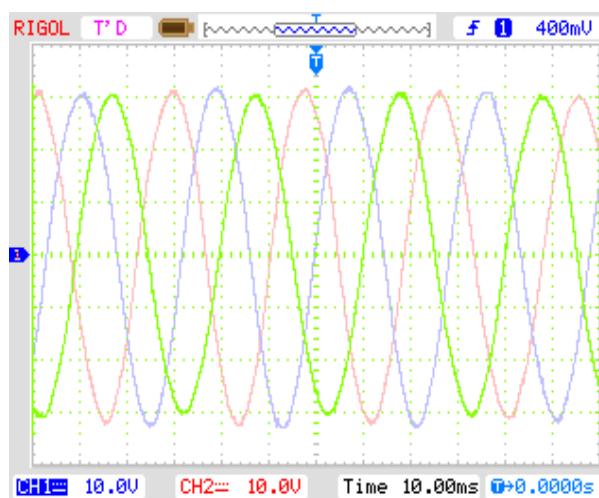
شکل (۱۵): محتوای هارمونیکی ولتاژ

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختاری جدید از انواع ماشین‌های شار سوئیچینگ محوری ارائه شده است. ابعاد ماشین با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و پاسخ سطح باهدف افزایش نیروی محرکه الکتریکی، کاهش گشتاور دندانه و کاهش THD بهینه‌سازی گردید.

مشاهده شد افزایش ضخامت روتور کاهش نیروی محرکه الکتریکی و افزایش THD را به دنبال دارد. اما افزایش زاویه روتور نتیجه‌ای کاملاً متفاوت دارد؛ یعنی نیروی محرکه الکتریکی را افزایش و THD را کاهش می‌دهد.

تأثیر این دو عامل بر گشتاور دندانه در مقادیر کوچک باعث کاهش گشتاور دندانه و در مقادیر بزرگ باعث افزایش آن می‌شود.



شکل (۱۴): نمایش شکل موج ولتاژ سه فاز نمونه اولیه ساخته شده

rotating wind turbine," *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2833, 2020.

[11] Y. Wang, M. Chen, T. Ching, and K. Chau, "Design and Analysis of a New HTS Axial-Field Flux-Switching Machine," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. 25, no.3, pp. 1-5, 2015.

[12] S. Wang, M. Lin, K. Lin, and Y. Kong, "Investigation of the Torque Production Mechanism of Dual-Stator Axial-Field Flux-Switching Permanent Magnet Motors," *Energies*, vol. 14, no. 17, p. 5498, 2021.

[13] W. Zhang, Z. Yang, L. Zhai, and J. Wang, "Speed sensorless control of hybrid excitation axial field flux-switching permanent-magnet machine based on model reference adaptive system," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 22013-22024, 2020.

[14] S. Jamali Arand and J. Rahmani Fard, "Model Predictive Control of a Fault-Tolerant-Hybrid Excitation Axial Field-Flux-Switching Permanent Magnet Motor," *AUT Journal of Electrical Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 6-6, 2021.

[15] D. Xu, X. Jiang, Y. Tu, N. Li, and Q. Li, "Investigation of cogging torque reduction for a 10/4 hybrid axial field flux-switching permanent magnet machine by harmonic field current injection," *IET Electric Power Applications*, vol. 14, no. 12, pp. 2499-2506, 2020.

[16] M. A. Baig, J. Ikram, A. Iftikhar, S. S. H. Bukhari, N. Khan, and J.-S. Ro, "Minimization of cogging torque in axial field flux switching machine using arc shaped triangular magnets," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 22201-22209, 2020.

[17] J. Zhao, X. Quan, X. Tong, and M. Lin, "Cogging Torque Reduction in Double-Rotor Hybrid Excited Axial Switched-Flux Permanent Magnet Machine," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 4, pp. 1-5, 2020.

[18] H.-J. Pyo, J. W. Jeong, J. Yu, S. G. Lee, and W.-H. Kim, "Design of 3d-printed hybrid axial-flux motor using 3d-printed smc core," *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 30, no. 4, pp. 1-4, 2020.

[19] W. Geng, Z. Zhang, and Q. Li, "High torque density fractional-slot concentrated-winding axial-flux permanent-magnet machine with modular SMC stator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 3691-3699, 2020.

[20] H.-J. Pyo, J. W. Jeong, J. Yu, D.-W. Nam, S.-H. Yang, and W.-H. Kim, "Eddy Current Loss Reduction in 3D-Printed Axial Flux Motor Using 3D-Printed SMC Core," in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2020, pp. 1125-1121: IEEE.

[21] D. Pham, L. V. Pugazhenthii, G. T. Götz, and R. W. De Doncker, "Optimization of Single Pulse Control based on Design of Experiments for Switched Reluctance Machines," *IEEE Journal of Industry Applications*, p. 1256-2100, 2021.

[22] R. Nasiri-Zarandi, A. M. Ajamloo, and K. Abbaszadeh, "Design optimization of a transverse flux Halbach-array PM generator for direct drive wind turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 3, pp. 1485-1493, 2020.

[23] M. Lin, L. Hao, X. Li, X. Zhao, and Z. Zhu, "A novel axial field flux-switching permanent magnet wind power generator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 4457-4460, 2011.

[24] H. Zhang, W. Hua, and G. J. I. T. o. M. Zhang, "Analysis of back-EMF waveform of a novel outer-rotor-permanent-magnet flux-switching machine," vol. 53, no. 6, pp.1-4, 2017.

[25] J. Chen and Z. J. I. T. o. E. C. Zhu, "Winding configurations and optimal stator and rotor pole

همچنین با توجه به اثرات ناچیز ضخامت یوغ استاتور بر اهداف یاد شده، لذا این عامل از فرایند بهینه سازی خارج گردید. بنابراین با هدف افزایش نیروی محرکه الکتریکی و کاهش گشتاور دندانه و محتوای هارمونیک مقادیر بهینه انتخاب شد. نتایج بیانگر آن است که ساختار بهینه ۱۸٪ نیروی محرکه الکتریکی بیشتر و به ترتیب ۵۶٪ و ۶۳٪ THD و گشتاور دندانه کمتر دارد. در این بررسی اثر ضخامت یوغ استاتور بر روی اهداف فوق بی تأثیر تشخیص داده شد. در انتها یک نمونه آزمایشی از مدل بهینه ساخته شد و خروجی‌های حاصل از بهینه سازی با روش المان محدود و نتایج حاصل از آزمایش نمونه ساخته شده مقایسه گردید.

مراجع

- [۱] صمیمی محمد حامد، داورپناه مهدی. حذف جریان مؤلفه منفی ژنراتور سنکرون مقیاس کوچک در حالت کارکرد جزیره‌ای به کمک مولد با واسط اینورتری. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱): ۶۴-۵۵
- [۲] نوده محمدتقی، قلی زاده نرم حسین، حاجی زاده امین. استراتژی کنترل پیش بین برای مدیریت توان در خودروی الکتریکی هیبرید موازی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۵؛ ۱۳ (۳): ۴۹-۵۶
- [3] H. Mohammad Hossein, M. Nezami Vatandoost, and H. Radmanesh, "Design of Axial Flux Permanent Magnet Machine Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 15, no. 1, pp. 123-131, 2018
- [4] H. Chen, A. M. EL-Refaei, and N. A. Demerdash, "Flux-switching permanent magnet machines: a review of opportunities and challenges-part ii: design aspects, control, and emerging trends," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 2, pp. 699-713, 2019.
- [5] H. Chen, A. M. EL-Refaei, and N. A. Demerdash, "Flux-switching permanent magnet machines: a review of opportunities and challenges—part I: fundamentals and topologies," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 2, pp. 684-698, 2019
- [6] L. Hao, M. Lin, D. Xu, X. Fu, and W. Zhang, "Static Characteristics of a Novel Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet Motor with Three Stator Structures," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 1, pp. 1-4 2014
- [7] W. Zhang, X. Liang, and M. Lin, "Analysis and comparison of axial field flux-switching permanent magnet machines with three different stator cores," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, pp. 1-6, 2016.
- [8] A. Ghaheri, A. M. Ajamloo, H. Torkaman, and E. Afjei, "Design, modelling and optimisation of a slot-less axial flux permanent magnet generator for direct-drive wind turbine application," *IET Electric Power Applications*, vol. 14, no. 8, pp. 1327-1338, 2020
- [9] L. Cao, K. T. Chau, C. H. Lee, and H. Wang, "A double-rotor flux-switching permanent-magnet motor for electric vehicles with magnetic differential," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 2, pp. 1004-1015, 2020
- [10] F. Kutt, K. Blecharz, and D. Karkosiński, "Axial-flux permanent-magnet dual-rotor generator for a counter-

- combination of flux-switching PM brushless AC machines," vol. 25, no. 2, pp. 293-302, 2010.
- [26] P. Lombard, A. Soualmi, L. Huang, A. Rodriguez, and V. Leconte, "A New Methodology to Design Electric Motors for Automotive Applications Including Magnetic, Thermal, Structural and Vibration Constraints," in 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2020, pp. 515-520: IEEE.
- [27] R. Lee, "Statistical Design of Experiments for Screening and Optimization," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 91, no. 3, pp. 191-200, 2019
- [28] D. Fan, L. Quan, X. Zhu, Z. Xiang, and H. Que, "Airgap-harmonic-based multi-level design and optimization of a double-stator flux-modulated permanent magnet motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021.

زیر نویس ها

-
- ¹ Soft Magnetic Composite
² Design of Experiments
³ Total Harmonic Distortion
⁴ Central Composite Design
⁵ Analyze of Variance