
An Optimized Design to Reduce Cogging Torque in the Flux Reversal Motor

M. Shokri^{*}, S. A. Gholamian

^{*} Master's student, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

(Received: 18/02/2021; Accepted: 17/04/2021)

Abstract

The flux reversal machine (FRM) integrates the features of permanent magnet synchronous machines and switch reluctance machines due to the presence of permanent magnets in the stator tooth and the robust structure of the rotor. In this paper, a typical model of a 250-watt flux reversal machine with 12 stator slots and 17 rotor teeth is designed. Using the Taguchi optimization method with the help of Minitab, the flux reversal machine is designed to achieve the minimum torque ripple and the maximum output torque. The most important achievement of this paper is optimization with precise planning of the Taguchi method in order to determine the optimal combination of the desired parameters as well as acceptable compliance of the predicted results with the simulation results of Altair Flux.

Keywords: Optimal Design, Flux Reversal Motor, Taguchi Method, Reluctance Torque, Torque Ripple, Cogging Torque.

طراحی بهینه موتور شار معکوس با هدف کاهش ریپل گشتاور

محمد شکری^{۱*}، سید اصغر غلامیان^۲

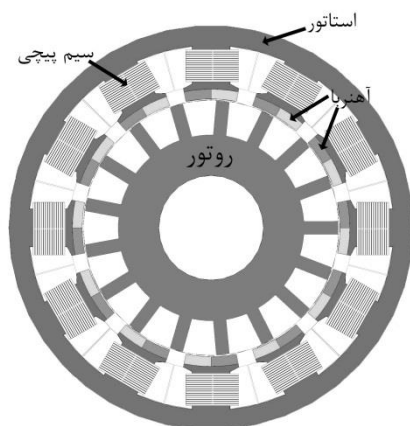
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲ دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶)

چکیده

ماشین‌های شار معکوس (FRM) به علت وجود آهنربای دائم در دندانه استاتور و ساختار یکپارچه روتور، ویژگی‌های ماشین‌های سنکرون با آهنربا دائم و ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس را در خود ادغام کرده است. در این مقاله یک نمونه ماشین شار معکوس ۲۵۰ وات با تعداد ۱۲ شیار استاتور و ۱۷ دندانه روتور طراحی شده است. با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی و به کمک نرم‌افزار Minitab، ماشین شار معکوس طراحی شده جهت دستیابی به کمینه ریپل گشتاوری و بیشینه گشتاور خروجی بهینه‌سازی شد. مهم‌ترین دستاورد این مقاله بهینه‌سازی با برنامه‌ریزی دقیق روش تاگوچی برای تعیین ترکیب بهینه پارامترهای مورد نظر و همچنین انطباق قابل قبول نتایج پیش‌بینی شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار Altair Flux هست.

کلیدواژه‌ها: طراحی بهینه، موتور شار معکوس، روش تاگوچی، گشتاور رلوکتانسی، ریپل گشتاور، گشتاور دندانه‌ای



شکل (۱): ماشین شار معکوس

علت نام‌گذاری این ماشین را تغییر مسیر شار تولیدی آهنربا در مسیر سیم‌پیچی فاز در یک سیکل کاری بیان کرده‌اند. با تغییر شار پیوندی متغیر، نیرومحرکه الکتریکی ایجاد می‌شود که با جریان‌های متغیر آرمیچر تقابل دارد. اگر چه شار تحریک توسط آهنربای دائم تولید می‌شود، اما شار پیوندی سیم‌پیچی آرمیچر تولید شده به علت تغییرات اندازه مقاومت مدار مغناطیسی ناشی از تغییرات زاویه روتور بدون تغییر موقعیت آهنربا، باعث القای نیرومحرکه الکتریکی دو قطبی می‌شود. استفاده از آهنربای دائم در موتورهای شار معکوس منجر به افزایش چگالی گشتاور شده است اما به همراه خود گشتاور دندانه‌ای را خواهد داشت [۱]. گشتاور دندانه‌ای در سرعت‌های بالا باعث ریپل گشتاوری، هارمونیک‌های مراتب بالاتر گشتاور و نویز در ماشین می‌شود. بر اساس پژوهش‌های انجام شده آرایش

۱- مقدمه

ماشین‌های شار معکوس^۱ شکل (۱) ماشین‌های دو برجستگی با آهنربای دائم در دندانه استاتور هستند. این نوع ماشین الکتریکی برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط تی.جی.ای میلر^۲ ارائه شده که در آن نقاط مثبت ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس^۳ و ماشین‌های مغناطیس دائم^۴ باهم ادغام شدند. در این ماشین به علت وجود آهنربا دائم چگالی توان قابل ملاحظه می‌باشد و همچنین به علت یکپارچه بودن ساختار روتور، تولید و ساخت مقرون به صرفه‌ای دارد. شار پیوندی حاصل از آهنربای دائم، شار حاصل از سیم‌پیچی را بر روی دندانه روتور متمرکز می‌کند. سادگی در ساخت این نوع ماشین‌ها آن‌ها را مورد مناسبی برای تولید انبوه کرده‌اند. این نوع ماشین‌ها اندوکتانس خودی و متقابل کمی دارند و ثابت زمانی الکتریکی پایین و ضریب اطمینان بالای در خطاهای فاز از دیگر ویژگی‌های این نوع ماشین است. به دلیل استفاده از آهنربای دائم چگالی شار در این موتور بسیار زیادی است اما استفاده از آهنربای دائم منجر به تولید گشتاور دندانه‌ای^۵ می‌شود و از طرف دیگر به دلیل استفاده از آهنربا در دندانه استاتور فاصله هوایی در این موتورها زیاد است و این دلیل منجر به افزایش شار پراکندگی می‌شود [۱].

* نویسنده پاسخگو: Shokri630@nit.ac.ir

^۱ Flux Reversal Machines

^۲ T.J.E Miller

^۳ Switch Reluctance Machine

^۴ Permanent Magnetic Synchronous Machine

^۵ Cogging Torque

جدول (۱): ترکیب شیار- قطب برای ماشین‌های شار معکوس سه فاز [۱۳]

شیار استاتور	دندانه روتور	۱۳	۱۴	۱۶	۱۷	۱۹	۲۰
۶	P	۳	۱	۱	۲	۲	۱
	SPP	۰/۵	۱	۱	۰/۵	۰/۵	۱
	PR	۶/۵	۱۷	۱۶	۸/۵	۹/۵	۲۰
	Kwn	۰/۸۶۶	۰/۵	۰/۵	۰/۸۶۶	۰/۸۶۶	۰/۵
	Kwr	۰/۸۶۶	۱	۱	۰/۸۶۶	۰/۸۶۶	۱
۱۲	P	۵	۴	۲	۱	۱	۲
	SPP	۰/۴	۰/۵	۱	۲	۲	۱
	PR	۲/۶	۳/۵	۸	۱۷	۱۹	۱۰
	Kwn	۰/۹۳۳	۰/۸۶۶	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵
	Kwr	۰/۹۳۳	۰/۸۶۶	۱	۰/۹۶۶	۰/۹۶۶	۱

اما مهم‌ترین نکته در مورد ماشین‌های شار معکوس وجود رپیل گشتاوری بالاست که در سرعت‌های بالا باعث ایجاد نویز و لرزش می‌شود. بدین ترتیب در مقاله پیش رو علاوه بر طراحی ماشین با رویکرد کمترین گشتاور دندانه‌ای، تمرکز اصلی بر روی طراحی و بهینه‌سازی ماشین در جهت کاهش رپیل گشتاوری و تولید گشتاور متوسط بیشتر است.

۲- طراحی

مسئله مهم در بررسی یک ماشین الکتریکی روش طراحی ماشین است. ماشین‌های شار معکوس را ترکیبی از ماشین‌های آهنربای دائم^۲، جعبه‌دنده مغناطیسی^۳ و ماشین ورنیر^۴ بیان کرده‌اند. به همین دلیل معمولاً جهت طراحی ماشین‌های شار معکوس از روش کلاسیک طراحی ماشین‌های الکتریکی استفاده می‌شود. اما برای بهبود بخشیدن به طراحی‌های انجام شده، روش کلی ارائه شده است که به‌طور مختصر به‌صورت الگوریتم در شکل (۲) نمایش داده شده است [۱۳]. برای بهترین ترکیب تعداد دندانه روتور و استاتور از جدول (۱) معرفی شده در این مقاله استفاده شد. معادله گشتاور این نوع ماشین با در نظر گرفتن ۳ فرضیه به‌دست می‌آید. (۱) از مقاومت مغناطیسی هسته آهنی صرف نظر شود. (۲) هیچ انحرافی برای جهت شار آهنربا در نظر گرفته نشود. (۳) جریان تغذیه به‌صورت سینوسی در نظر گرفته شود.

بنابراین گشتاور خروجی ماشین به تعداد دور سیم‌پیچی، طول ماشین، شعاع فاصله هوایی بستگی دارد. روابطی از ضد محرکه الکتریکی^۵ و بار الکتریکی و مغناطیسی معرفی شد که با استفاده از آن ابعاد ماشین محاسبه می‌شود. با بررسی تأثیرات بار الکتریکی، بار مغناطیسی، اندازه فاصله هوایی و تأثیر ضخامت بر

آهنربا در دندانه استاتور و شکل دندانه روتور بیشترین تأثیر را در میزان گشتاور دندانه‌ای دارد [۲]. یکی از مهم‌ترین روش‌های کاهش گشتاور دندانه کاهش پراکندگی است و با ایجاد شیاری بین آهنرباهای استفاده شده در دندانه استاتور می‌توان شار پراکندگی را کنترل کرد و میزان گشتاور دندانه‌ای را کاهش داد [۳]. کاهش مقاومت رلوکتانسی در این نوع ماشین‌ها تأثیر بسیار زیادی در کنترل شار پراکندگی دارد و با حذف یک از آهنرباها از هر دندانه، با توجه به مدار مغناطیسی ارائه شده مقاومت رلوکتانسی فاصله‌های مسیر شار پراکندگی در توپولوژی پیشنهادی کمتر شده‌اند (۴ و ۵). نحوه سیم‌پیچی تأثیر به‌سزایی در نیرومحرکه و به طبع گشتاور خروجی و رپیل گشتاوری دارد [۶، ۷ و ۸].

برای کنترل شار پراکندگی و کاهش گشتاور دندانه می‌توان از آرایش هال باخ^۱ برای آهنرباهای استاتور استفاده کرد. در این روش از مقدار آهنربای بیشتر استفاده می‌شود، که به علت قرار گرفتن آهنربا در مسیر شار تولیدی خطر مغناطیس زدایی افزایش می‌یابد [۹ و ۱۰]. همانند ماشین‌های مغناطیس دائم، با روش چند تکه کردن آهنرباهای دائم، امکان تغییر در میزان چگالی گشتاور، گشتاور دندانه‌ای و مهم‌تر از آن رپیل گشتاوری را فراهم می‌آورد [۱۱ و ۱۲]. یکی از بهترین روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای و به همراه آن کاهش خطر مغناطیس زدایی تغییر آرایش آهنربا جهت تغییر مسیر شار تولید است [۱۳]. از آنجایی که روتور ماشین‌های FRM یکپارچه و ساخت این نوع روتورها آسان است، تغییرات در شکل و ظاهر روتور کاری آسان و بهینه برای کاهش گشتاور دندانه‌ای است. با اضافه کردن برآمدگی نیش مانند در دندانه روتور گشتاور دندانه‌ای کمتری تولید می‌شود. با اعمال این تغییر در دندانه، شار عبوری از استاتور به روتور هنگام گردش روتور، تغییرات بیشتری را می‌بیند و با این کار گشتاور دندانه‌ای کاهش می‌یابد [۱۴]. ماشین‌های شار معکوس دارای دندانه‌های روتور برجسته هستند و این برجستگی علت اصلی تولید گشتاور دندانه‌ای و رپیل گشتاوری است در نتیجه با ایجاد شیاری بر روی دندانه روتور می‌توان گشتاور دندانه‌ای را کنترل کرد و در نتیجه به مقدار رپیل گشتاوری کمتری دست یافت [۱۵]. همچنین با ایجاد انحراف در روتور ماشین از میزان این گشتاورهای مزاحم می‌توان کاست [۱۶].

یکی دیگر از روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای و همچنین رپیل گشتاوری جداسازی مسیر شار عبوری آهنرباها در دندانه استاتور از هم است. جهت مغناطش آهنرباها در خلاف جهت یکدیگر قرار گرفت و در نتیجه با چرخش روتور با عبور از دندانه استاتور، جهت خطوط شار دو بار تغییر می‌کند که فرکانس دو برابری را نسبت به ماشین‌های سنکرون ایجاد می‌کند [۶].

² Permanent Magnet Synchronous Machine

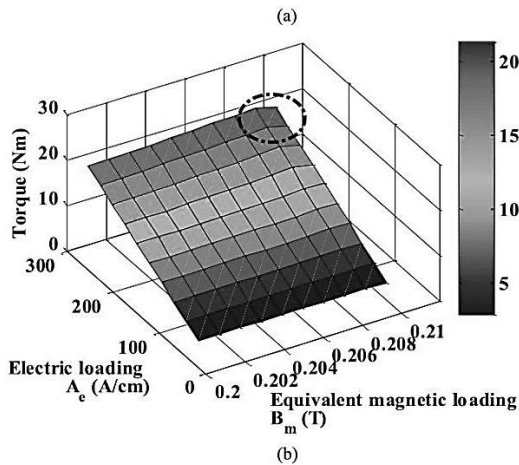
³ Magnetic Gear Box

⁴ Vernier Machine

⁵ Back-Emf

¹ Halback Array

SPP تعداد شیار در قطب در فاز، RP ضریب تعداد شیار روتور بر تعداد قطب، K_{wr} و K_{wn} ضرایب سیم پیچی را معرفی می کنند. برای محاسبات اندازه ماشین، مشخص کردن بار الکتریکی و مغناطیسی ماشین مورد نظر است. بنا بر نمودار معرفی شده در مرجع [۱۳] بار الکتریکی (A_e) و مغناطیسی (B_m) مناسب ترکیب تعداد دندانه ۱۲ به ۱۷، برای به دست آوردن گشتاور مورد نیاز به صورت شکل (۳) معرفی شد. بر اساس این مقادیر ابعاد ماشین و جزئیات ماشین طراحی می شود.



شکل (۳): بار الکتریکی و مغناطیسی

حجم ماشین مورد نظر از رابطه (۱) به دست خواهد آمد.

$$V_r = \frac{T_e}{\sqrt{2} * K_w Z_r A_e B_m} \quad (1)$$

در این رابطه، T_e گشتاور الکتریکی است. در ادامه با استفاده از روابط (۲ تا ۵) شعاع فاصله هوایی و طول ماشین به دست می آید. در این روابط نسبت شعاع ماشین به طول ماشین با نام k_{lr} نمایش داده می شود.

$$V_r = \pi * l_{stk} r_g^2 \quad (2)$$

$$k_{rl} = \frac{r_g}{l_{stk}} \quad (3)$$

$$r_g = \sqrt[3]{\frac{V_r k_{rl}}{\pi}} \quad (4)$$

$$l_{stk} = \sqrt[3]{\frac{V_r}{\pi * k_{rl}^2}} \quad (5)$$

تعداد دور سیم پیچی استاتور از رابطه (۶) به دست می آید:

$$N_s = \frac{2\sqrt{2} A_e \pi r_g}{6 I_p} \quad (6)$$

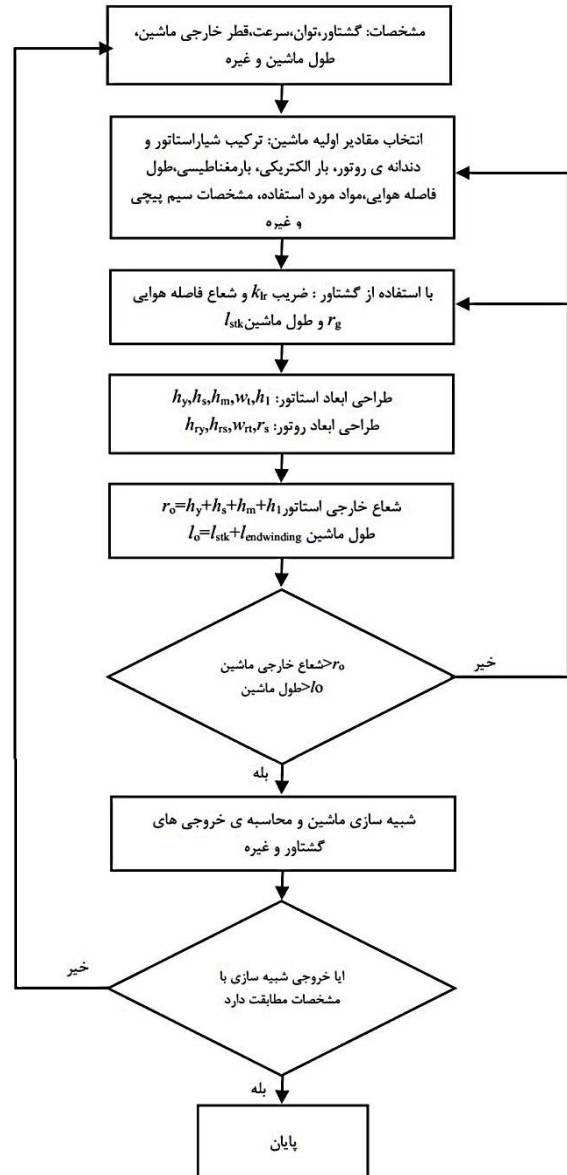
در این رابطه، R_g شعاع فاصله هوایی، A_e بار الکتریکی و I_p جریان استاتور است.

برای به دست آوردن فاصله هوایی از رابطه کلاسیک ماشین های الکتریکی [۱۶] استفاده شده است.

ضریب توان، نتایج مناسبی در مورد ماشین های شار معکوس ارائه شد. مشخصات اولیه ماشین شار معکوس مورد نظر به صورت جدول (۲) بیان شده است.

جدول (۲): مشخصات ماشین

اندازه	پارامتر
۲۵۰ W	توان
۵۰ V	ولتاژ
۳۰۰ rpm	سرعت
۸/۳ Nm	گشتاور
۱۲/۱۷	روتور/استاتور



شکل (۲): الگوریتم طراحی ماشین شار معکوس [۹]

برای انتخاب ترکیب مناسب می توان از جدول معرفی شده در مرجع [۱۳] استفاده کرد که به طور مختصر بخشی از آن در جدول (۱) نمایش داده شده است. در این جدول تعداد قطب،

جدول (۳): ضریب ثابت γ ماشین‌های سنکرون دارای برجستگی در روتور

ماشین‌های سنکرون قطب برجسته با فاصله هوایی یکنواخت	$\gamma = 7.0 \times 10^{-7}$
ماشین سنکرون قطب برجسته با فاصله هوایی برای تولید توزیع چگالی شار سینوسی	$\gamma = 4.0 \times 10^{-7}$
ماشین سنکرون قطب صاف	$\gamma = 3.0 \times 10^{-7}$
ماشین‌های جریان مستقیم بدون سیم‌پیچی جبران‌کننده و به همراه جابه‌جایی قطب	$\gamma = 5.0 \times 10^{-7}$
ماشین‌های جریان مستقیم بدون سیم‌پیچی جبران‌کننده و بدون جابه‌جایی قطب	$\gamma = 3.6 \times 10^{-7}$
ماشین جریان مستقیم به همراه سیم‌پیچی جبران‌کننده و جابه‌جایی قطب	$\gamma = 2.2 \times 10^{-7}$

که در آن، B_t چگالی شار دندان استاتور در نظر گرفته شده است.

از طرفی مساحت شیار استاتور به بار الکتریکی A_e و چگالی جریان J_e بستگی دارد:

$$A_{slot} = \frac{2\pi(r_g + h_m)A_e}{J_e S_{fg}} \quad (19)$$

slot fill factor = S_{fg} و معمولاً مقادیر نزدیک به ۱ معرفی می‌شود.

همچنین برای مساحت شیار استاتور روابط (۲۰) برقرار است که با حل معادله درجه دوم، عمق شیار h_s به دست می‌آید.

$$A_{slot} = \pi(r_g + h_m + h_1 + h_s)^2 - \pi(r_g + h_m + h_1)^2 - Z_s w_t h_s \quad (20)$$

عبارت A_{slot} در معادله (۲۰) مساحت شیار استاتور را معرفی می‌کند. h_1 ضخامت آهن در دندان استاتور است.

با به دست آمدن ابعاد دندان استاتور شعاع خارجی ماشین از رابطه (۲۱) به دست می‌آید:

$$r_o = r_g + h_m + h_1 + h_s + h_y \quad (21)$$

همچنین برای ابعاد یوغ روتور و دندان روتور دارید:

$$\phi_{sy} = \phi_{ry} = \phi_m / 2 \quad (22)$$

$$h_{sy} = \frac{\phi_m}{B_{ry} k_{stk} l_{stk}} \quad (23)$$

$$w_{rt} = \frac{2 \times 4 \times P \times \phi_m}{k_{stk} Z_r B_{rt} l_{stk}} \quad (24)$$

برای قطر شفت رابطه (۲۵) را دارید:

$$T_r = \frac{\tau \times \pi \times D_{sh}^3}{16} \quad D_{sh} = \sqrt[3]{\frac{T_r \times 16}{\tau \times \pi}} \quad (25)$$

که در آن، τ تنش مماسی شفت است.

بنابراین ارتفاع دندان روتور به صورت رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$h_{rs} = r_g - \delta - h_{ry} - D_{sh} / 2 \quad (26)$$

شکل (۴) نمایی از استاتور و روتور و ابعاد معرفی شده برای طراحی ماشین را نمایش می‌دهد. بدین ترتیب برای نمونه مقادیر

$$\tau_p = \frac{\pi * D}{2 * p} \quad (7)$$

$$\delta \geq \gamma \tau_p \frac{A_e}{\beta_m} \quad (8)$$

ضریب ثابت γ از جدول (۳) برای ماشین‌های سنکرون دارای برجستگی در روتور [۱۶]، به دست می‌آید.

برای حداکثر شدن میزان گشتاور و همچنین کاهش خطر مغناطیسی زدایی آهنربا، ضخامت آهنربا بیشتر از ۶ برابر فاصله هوایی انتخاب نمی‌شود،

بنابراین ضخامت آهنربا از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$h_m = 4\delta \sim 6\delta \quad (9)$$

اندازه دهانه شیار استاتور از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$w_o = \frac{\pi(r_g + h_m)}{2 * Z_s} \quad (10)$$

رادیان زاویه دندان استاتور و طول آهنربای مصرفی از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آید:

$$PM_w = \frac{2\pi r_g - Z_s w_o}{Z_s} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{PM_w \times 360}{2 \times \pi \times r_g} \quad (12)$$

شار در استاتور در موقعیت بدون بار به صورت رابطه (۱۳) است (این رابطه از طراحی ماشین‌های آهنربای دائم [۱۵] برگرفته شده است):

$$\phi_m = \frac{B_m 2\alpha(2r_g - 2\delta)l_{stk}}{P} \quad (13)$$

روابط (۱۴ تا ۱۷) ضخامت یوغ استاتور را به دست خواهد آورد:

$$\phi_{sy} = B_{sy} h_{sy} k_{stk} l_{stk} \quad (14)$$

$$\phi_{ry} = B_{ry} h_{ry} k_{stk} l_{stk} \quad (15)$$

$$\phi_{sy} = \phi_{ry} = \phi_m / 2 \quad (16)$$

$$h_{sy} = \frac{\phi_m}{2 \times B_{ry} k_{stk} l_{stk}} \quad (17)$$

برای به دست آوردن عرض دندان استاتور از رابطه (۱۸) استفاده می‌شود:

$$\omega_t = \frac{\phi_m}{k_{sat} l_{stk} B_t} \quad (18)$$

ایده اصلی تاگوچی بر این اصل بنا شده است که کیفیت باید در هنگام تولید طراحی شود نه اینکه در طی فرآیند ساخت بررسی شود. در طراحی به این روش، کیفیت با به کمینه رساندن انحراف از مقدار مشخص به بهترین وجه حاصل می شود و محصول باید طوری طراحی شود تا در برابر عوامل محیطی غیر قابل کنترل ایمن باشد.

مراحل انجام بهینه سازی به روش تاگوچی بدین صورت است [۱۷]:

- ۱- مشخص کردن پارامترهای مهم ورودی و اندازه آن ها و چگونگی پاسخ خروجی و مشخصه آن؛
 - ۲- مشخص کردن پارامترهای جدول ارائه های متعادل و تخصص دادن هر پارامتر به ستون های جدول
 - ۳- بررسی تأثیرات فاکتورها و پیدا کردن بهینه ترین ترکیب پارامترهای ورودی و محاسبه بهترین مقدار مشخصه خروجی؛
 - ۴- رنج مقادیر آزمایش شده بررسی شده و آزمایش ها با خروجی مشابه مشخص می شوند؛
 - ۵- بررسی آنالیز واریانس برای پیدا کردن فاکتورهای خاص و ترکیب مناسب با آن؛
 - ۶- بررسی های لازم بر اساس روابط (۲۷ تا ۲۹) به دست می آید که هر کدام برای به دست آوردن شرایط خاص از خروجی، مورد استفاده قرار می گیرد.
- الف - برای حالتی که در آن هر چه سطح کمتر باشد بهتر است:

$$SB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \quad (27)$$

ب- هر چه سطح بیشتر باشد بهتر است:

$$LB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i}\right)^2 \quad (28)$$

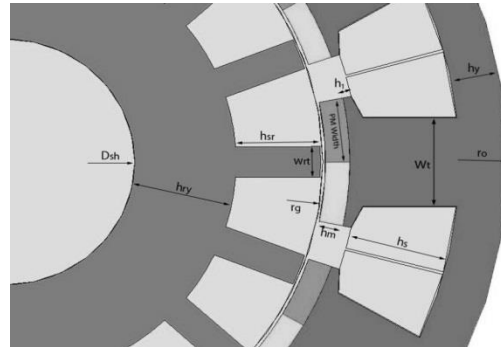
ج - هر چه به اندازه اسمی نزدیک تر باشد بهتر است:

$$SB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 \quad (29)$$

و پس از محاسبه مقادیر تابع زیان برای هر خروجی از رابطه (۳۰) مقدار سیگنال به نویز محاسبه می شود.

$$S/N = -10 \log(L_i) \quad (30)$$

به دست آمده برای ماشین طراحی شده با استفاده از روابط (۱ تا ۲۶) به طور مختصر در جدول (۴) بیان شده است.



شکل (۴): نمایشی از استاتور و روتور ماشین شار معکوس

جدول (۴): پارامترهای نمونه ای از ماشین شار معکوس

پارامترهای ماشین	مقادیر
شعاع فاصله هوایی (r_g)	۳۹/۵ mm
طول ماشین (l_{stk})	۱۲۰ mm
گشتاور	۸/۳ mm
ضخامت یوغ استاتور (h_y)	۶/۲ mm
عرض دندانه استاتور (w_r)	۱۱/۴ mm
اندازه فاصله هوایی (δ)	۰/۶ mm
ضخامت آهنربا (h_m)	۳ mm
دهانه شیار استاتور (w_o)	۵/۵ mm
عرض آهنربا (PM width)	۷/۸ mm
عمق شیار (h_s)	۱۳/۶ mm
ضخامت آهن دندانه استاتور (h_l)	۱ mm
شعاع خارجی استاتور (r_o)	۶۳/۵ mm
ضخامت یوغ روتور (h_{ry})	۱۲/۵۵ mm
دندانه روتور (w_{rt})	۴/۹ mm
قطر شفت (D_{sh})	۳۲ mm
ارتفاع دندانه روتور (h_{sr})	۱۰/۴ mm
تعداد دور سیم پیچی (N_s)	۳۰۰

۳- روش تاگوچی^۱

فرآیند بهینه سازی به روش هایی برای یافتن شرایطی است که در آن خروجی مورد نظر بیشینه و یا کمینه می شود. در بهینه سازی فاکتورهای مختلفی مورد بررسی قرار می گیرد و فاکتورهای قابل کنترل که بر روی پاسخ خروجی بیشترین تأثیر را دارند شناسایی می شوند و فاکتورهای غیر قابل کنترل در مراحل بهینه سازی به حداقل خود می رسند. در انتها بهترین ترکیب ممکن فاکتورها، برای به دست آوردن بهترین خروجی ممکن شناسایی می شود.

^۱ Taguchi Method

۴- بهینه‌سازی ماشین شار معکوس ۱۷/۱۲

بدین ترتیب مراحل بهینه‌سازی به روش تاگوچی برای فاکتورهای ارائه شده در جدول (۵) برای ماشین مورد نظر به‌کار گرفته خواهد شد.

از آنجا که مهم‌ترین فاکتور در کنترل گشتاور، کنترل مسیر شار است، فاکتورهایی در نظر گرفته می‌شود که بیشترین تأثیر را در کنترل مسیر شار دارند. به‌عنوان مثال یکی از منابع اصلی تولید شار، وجود آهنربا در دندانه استاتور است. در نتیجه طول و

عرض آهنربا به‌عنوان فاکتور انتخاب شده‌اند و همچنین دندانه روتور و استاتور به علت قرار گرفتن در مسیر مستقیم عبور شار به‌عنوان فاکتورهای دیگر انتخاب شده‌اند.

هدف بررسی فاکتورهای معرفی شده بر روی حداکثر گشتاور خروجی و حداقل ریپل گشتاوری است. جدول ارائه‌های متعامد بر اساس استاندارد تاگوچی در جدول (۶) ارائه شده است [۱۷]. برای تعداد ۵ فاکتور با ۴ سطح مختلف می‌توان از استانداردهای $L12 - L16 - L32 - L50$ استفاده کرد.

جدول (۵): فاکتورها و پارامترهای آزمایش‌ها

سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱
۱۲ میلی‌متر	۱۱/۵ میلی‌متر	۱۱ میلی‌متر	۱۰/۵ میلی‌متر
۶δ	۵δ	۴δ	۳δ
۵ میلی‌متر	۴/۵ میلی‌متر	۴ میلی‌متر	۳/۵ میلی‌متر
۱۰/۵ میلی‌متر	۱۰/۴ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	۹/۶ میلی‌متر
۸/۶ میلی‌متر	۸/۲ میلی‌متر	۷/۸ میلی‌متر	۷/۴ میلی‌متر

جدول (۶): جدول ارائه‌های متعامد

تعداد پارامتر						سطوح
۷	۶	۵	۴	۳	۲	
<i>L12</i>	<i>L12</i>	<i>L12</i>	<i>L8</i>	<i>L4</i>	<i>L4</i>	۲
<i>L18</i>	<i>L18</i>	<i>L18</i>	<i>L9</i>	<i>L9</i>	<i>L9</i>	۳
<i>L32</i>	<i>L32</i>	<i>L16</i>	<i>L16</i>	<i>L16</i>	<i>L16</i>	۴
<i>L50</i>	<i>L25</i>	<i>L25</i>	<i>L25</i>	<i>L25</i>	<i>L25</i>	۵

در اینجا جدول *L16* انتخاب شده است و ترتیب آزمایش‌ها به‌صورت جدول استاندارد (۷) معرفی می‌شوند.

جدول (۷): جدول استاندارد آزمایش‌ها و نتایج به‌دست آمده بر اساس شبیه‌سازی‌های مختلف ماشین ۱۷/۱۲

شماره آزمایش	فاکتور ۱ (<i>Wt</i>)	فاکتور ۲ (<i>hm</i>)	فاکتور ۳ (<i>Wrt</i>)	فاکتور ۴ (<i>hrs</i>)	فاکتور ۵ (<i>Pm width</i>)	بیک گشتاور	ریپل گشتاوری
۱	۱۰/۵	۳	۳/۵	۹/۶	۷/۴	۱/۳۱۴۷۲۸	۰/۷۴۸۰۹۴
۲	۱۰/۵	۴	۴	۱۰	۷/۸	۰/۶۴۴۸۳۱	۰/۵۱۶۲۷۱
۳	۱۰/۵	۵	۴/۵	۱۰/۴	۸/۲	۱/۳۳۹۷	۰/۷۶۶۸۸۲
۴	۱۰/۵	۶	۵	۱۰/۵	۸/۶	۱/۳۹۴۲۰۵	۰/۸۳۴۵۷
۵	۱۱	۳	۴	۱۰/۴	۸/۶	۲/۶۹۷۸۲	۱/۶۶۹۸۴۸
۶	۱۱	۴	۳/۵	۱۰/۵	۸/۲	۱/۸۰۹۸۰۳	۰/۶۳۴۲۳۸
۷	۱۱	۵	۵	۹/۶	۷/۸	۱/۳۱۵۵۶۹	۱/۰۳۶۴۵
۸	۱۱	۶	۴/۵	۱۰	۷/۴	۱/۶۱۳۷۲	۱/۲۶۶۴۱۹
۹	۱۱/۵	۳	۴/۵	۱۰/۵	۷/۸	۱/۱۶۲۷۶۶	۰/۷۷۲۲۱۸
۱۰	۱۱/۵	۴	۵	۱۰/۴	۷/۴	۰/۹۴۶۹۹۸	۰/۶۸۱۱۹۱
۱۱	۱۱/۵	۵	۳/۵	۱۰	۸/۶	۳/۳۹۸۷۳۴	۱/۰۶۴۱۶۱
۱۲	۱۱/۵	۶	۴	۹/۶	۸/۲	۱/۸۸۹۴۸۴	۰/۴۷۷۰۲۹
۱۳	۱۲	۳	۵	۱۰	۸/۲	۱/۰۱۵۸۵۵	۰/۹۹۳۲۳۶
۱۴	۱۲	۴	۴/۵	۹/۶	۸/۶	۲/۱۱۹۱۴۹	۱/۴۲۰۷۸۹
۱۵	۱۲	۵	۴	۱۰/۵	۷/۴	۱/۱۱۲۳۵۷	۰/۶۶۳۴۱۹
۱۶	۱۲	۶	۳/۵	۱۰/۴	۷/۸	۱/۸۹۴۴۴۳	۰/۷۹۰۹۹۶

بنابر آنچه از پارامترها معرفی شد می‌توان درصد تأثیر پارامترهای مختلف را به‌عنوان درصد مشارکت معرفی کرد که با P_m نمایش داد و بر اساس رابطه (۳۲) معرفی شده در مرجع [۱۷] به‌دست آورد:

$$P_m = \frac{S_m}{S_T} \times 100 \quad (31)$$

که در آن، S_m مربع انحرافات عامل مؤثر m از میانگین و S_T مجموع مربع انحرافات هستند. روابط S_T و S_m در روابط (۳۲) و (۳۳) آمده است:

$$S_m = (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (32)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (33)$$

در جدول (۸) مشارکت پارامترهای مختلف ارائه شده است:

جدول (۸): مشارکت داده‌ها با استفاده از تحلیل استاندارد ماشین ۱۷/۱۲

Level	WTS	NHM	WRT	HSR	PM Width
1	۰/۹۸۱۶	۱/۵۴۷۰	۲/۱۰۴۴	۱/۶۳۴۷	۱/۲۴۷۰
2	۱/۸۳۳۵	۱/۳۸۰۲	۱/۵۸۵۴	۱/۶۶۸۳	۱/۲۲۹۴
3	۱/۸۴۹۵	۱/۵۷۴۹	۱/۳۶۷۱	۱/۵۲۷۳	۱/۳۲۲۰
4	۱/۵۳۵۵	۱/۶۹۸۰	۱/۱۴۳۲	۱/۳۶۹۸	۲/۴۰۱۷
مشارکت	۰/۸۶۷۹	۰/۳۱۷۸	۰/۹۶۱۳	۰/۲۹۸۵	۱/۱۷۲۳
Rank	۳	۴	۲	۵	۱

تغییرات اندازه عرض آهنربا بیشترین مشارکت را دارد زیرا آهنربای استفاده شده تأثیر مستقیم بر روی شار دندانه استاتور دارد و عمق دندانه روتور کمترین مشارکت را در تغییرات اندازه گشتاور حداکثر از خود نشان می‌دهد.

با بررسی اطلاعات به‌دست آمده از نمودار (۱) بهینه‌ترین مقادیر برای این پارامترها به‌صورت زیر خواهد بود:

عرض دندانه استاتور: ۱۱/۵ میلی‌متر

عرض دندانه روتور: ۳/۵ میلی‌متر

ضخامت آهنربا: ۳/۶ میلی‌متر

عمق روتور: ۱۰ میلی‌متر

عرض آهنربای دندانه استاتور: ۸/۶ میلی‌متر

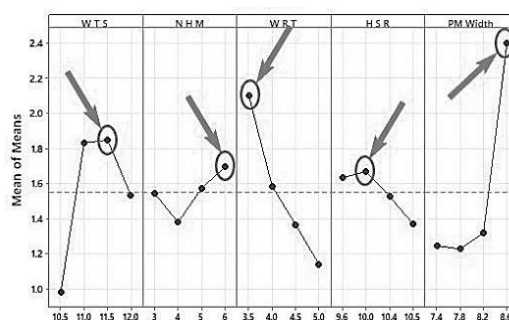
یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار Minitab پیش‌بینی خروجی بر اساس مقادیر بهینه شده است. بدین ترتیب نرم‌افزار خروجی جدول (۹) را برای حداکثر گشتاور بهینه شده معرفی کرده است.

جدول (۹): پیش‌بینی مقدار بهینه ماشین ۱۷/۱۲

S/N Ratio	Mean
۱۳/۰۵۴۵	۳/۵۲۱۸۳

برای بررسی نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. Minitab یک از نرم‌افزارهای جامع آماری است که از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به طراحی آزمایش‌های سیستماتیک (DOE) اشاره کرد [۱۸]. روش تاگوچی در این بخش قابل دسترسی است.

نمودار (۱) واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل استاندارد بر اساس آزمایش‌های انجام شده به‌دست آمده است و تأثیرات هر پارامتر بر روی گشتاور بیشینه خروجی و ریبیل گشتاور را نشان می‌دهد.



نمودار (۱): واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل استاندارد ماشین ۱۷/۱۲

با افزایش عرض دندانه استاتور ابتدا گشتاور افزایش می‌یابد اما سپس سیر نزولی به خود می‌گیرد. بدین دلیل که با افزایش بیش از اندازه عرض دندانه استاتور تمرکز شار تولید شده توسط سیم‌پیچی بر روی دندانه استاتور کاهش و چگالی شار کاهش می‌یابد و از این رو گشتاور خروجی کمتری تولید می‌شود.

گشتاور بیشینه حساسیت کمی به تغییر ضخامت آهنربای دندانه استاتور از خود نشان می‌دهد. زیرا به نسبت تغییر ضخامت آهنربا، فاصله هوایی نیز تغییر می‌کند و بدین ترتیب تغییرات شار پیوندی جهت تولید گشتاور خروجی، تغییرات کمی احساس می‌کند.

عرض دندانه روتور تأثیرات زیادی بر روی گشتاور خروجی دارد. در این حالت با افزایش عرض دندانه روتور ضریب saliency که نشان دهنده میزان برجستگی روتور است، کاهش می‌یابد و از آنجا که اصل تولید گشتاور در ماشین شار معکوس همانند ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس با saliency رابطه مستقیم دارد، گشتاور تغییرات زیادی از خود نشان می‌دهد.

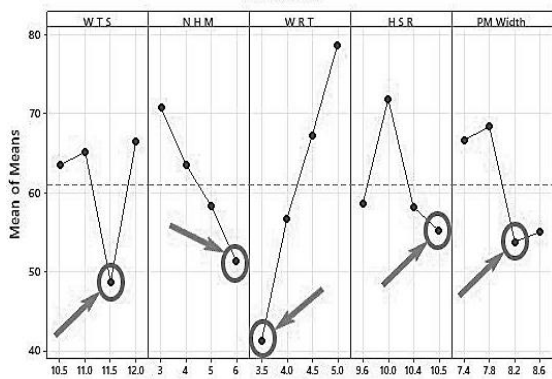
کمترین حساسیت را عمق دندانه روتور دارد. مشاهده می‌شود که گشتاور خروجی با تغییرات عمق دندانه روتور تغییرات زیادی نمی‌کند. از طرف دیگر با افزایش طول آهنربا و پوشش دادن بیشتر زاویه محیط روتور مشاهده می‌شود که گشتاور در اندازه‌های بالا برای این متغیر، بیشترین تغییرات را از خود نشان می‌دهد.

در حالت بهینه اندازه گشتاور بیشینه افزایش قابل توجه داشته است. در ضمن ریپل گشتاور در حال بهینه بسیار کاهش داشته است و ریپل گشتاوری ۲۵/۶٪ در برابر ریپل گشتاوری حالت بهینه نشده ۷۳/۶ درصد است. بنابراین نمونه بهینه شده عملکردی به مراتب بهتری از خود نشان می‌دهد. اما بررسی خواهد شد تا مشخص شود شرایط بهتری وجود دارد که بتوان میزان ریپل گشتاور بهتری نسبت به این مقدار به دست آورد یا خیر.

بنابراین بهینه‌سازی بر اساس حداقل ریپل گشتاوری نیز در ادامه انجام خواهد شد.

این نکته قابل اشاره است که نرم‌افزار Minitab با خطای قابل قبول ۵ درصد خروجی گشتاور حداکثری را پیش‌بینی کرده بود.

برای حالت بهینه‌سازی با هدف کاهش ریپل گشتاوری در جدول مشارکت (۱۱) عرض دندانه روتور بیشترین تأثیر را بر روی تغییرات ریپل گشتاور دارد و از طرف دیگر ریپل گشتاور کمترین حساسیت را به تغییرات عرض آهنربای استفاده شده از خود نشان می‌دهد.



نمودار (۴): واریانس داده‌ها برای حداقل ریپل گشتاوری با استفاده از تحلیل استاندارد

جدول (۱۰): مقایسه نمونه اولیه بدون بهینه‌سازی و نمونه بهینه شده بر اساس حداکثر گشتاور خروجی و حداقل ریپل گشتاوری

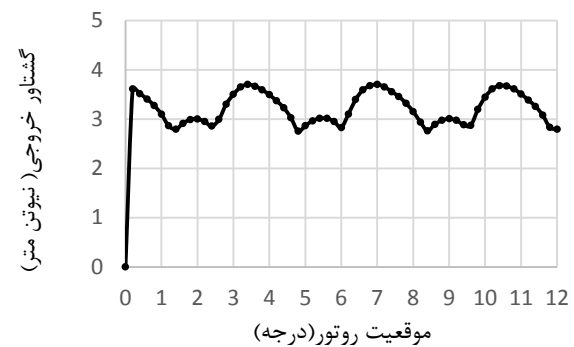
	عرض دندانه استاتور (wt)	ضخامت آهنربا (hm)	عرض دندانه روتور (wrt)	ارتفاع دندانه روتور (hrs)	طول آهنربا (PM width)	پیک گشتاور	ریپل گشتاوری	درصد ریپل گشتاور (%)
نمونه اولیه	۱۱/۵	۳	۴	۱۰/۴	۷/۸	۱/۱۶ Nm	۰/۸۶ Nm	۷۳/۶
حداقل ریپل	۱۱/۵	۳/۶	۳/۵	۱۰/۵	۸/۲	۲/۴۶ Nm	۰/۴۴ Nm	۱۷/۹۳
حداکثر گشتاور	۱۱/۵	۳/۶	۳/۵	۱۰	۳/۵	۳/۷ Nm	۰/۹۵ Nm	۲۵/۶

عرض دندانه روتور: ۳/۵ میلی‌متر
 عمق دندانه روتور: ۱۰/۵ میلی‌متر
 عرض آهنربای دندانه استاتور: ۸/۲ میلی‌متر

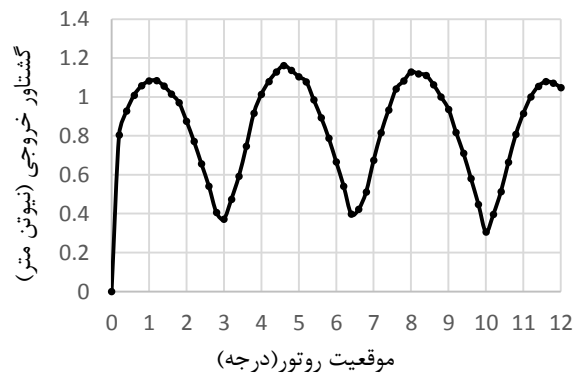
بنابراین انتظار می‌رود در شبیه‌سازی نرم‌افزار Altair Flux که برای حل مسائل الکترومغناطیسی به روش اجزاء محدود استفاده می‌شود، مقدار ۳/۵۲ نیوتن متر، برای گشتاور حداکثر به دست آید.

خروجی بهینه شده ماشین و بهینه نشده با استفاده از شبیه‌سازی در نمودار (۲ و ۳) ارائه شده است.

جدول (۱۱) مقایسه‌ای بین نمونه اولیه بهینه نشده و نمونه بهینه شده ارائه داده است که گشتاور حداکثر بیشتری برای جریان اعمالی نشان می‌دهد.



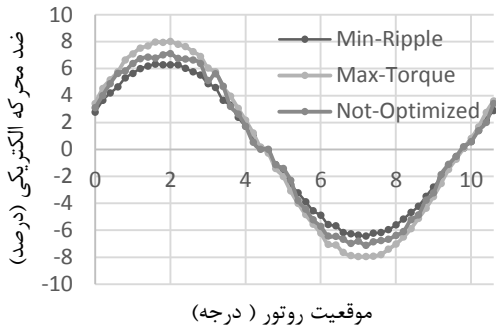
نمودار (۲): خروجی بهینه شده با استفاده از شبیه‌سازی ماشین ۱۷/۱۲



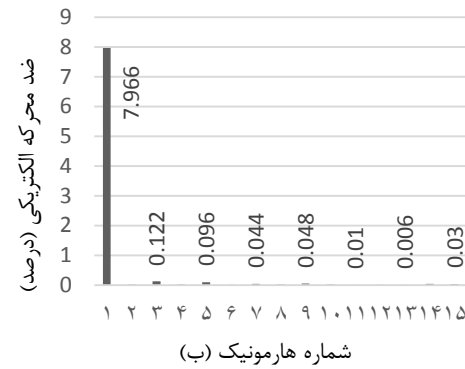
نمودار (۳): خروجی بهینه نشده ماشین ۱۷/۱۲

بر اساس نمودار (۴) مقادیر بهینه برای حداقل ریپل گشتاوری به صورت مقادیر زیر خواهد بود:
 عرض دندانه استاتور: ۱۱/۵ میلی‌متر
 ضخامت آهنربا: ۳/۶ میلی‌متر

نمودارهای (۷ و ۸) هارمونیک‌های مراتب بالای فرد در نمونه‌های بهینه شده مقادیر بهتری دارند.



نمودار (۶). شکل موج ضد محرکه الکتریکی برای نمونه بهینه نشده و نمونه‌های بهینه شده بر اساس حداقل ریپل گشتاور و حداکثر گشتاور خروجی



نمودار (۷). نمایش هارمونیک‌های ضد محرکه الکتریکی: (الف) بهینه شده با حداقل ریپل گشتاوری و (ب) بهینه شده با حداکثر گشتاور خروجی



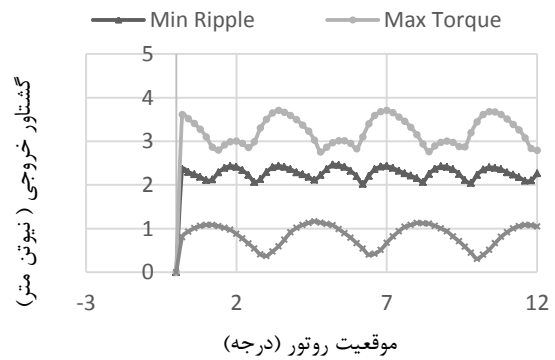
نمودار (۸). نمایش هارمونیک‌های ضد محرکه الکتریکی ماشین شار معکوس بهینه نشده

جدول (۱۱): مشارکت داده‌ها برای حداقل ریپل گشتاوری با استفاده از تحلیل استاندارد

سطح	WTS	NHM	WRT	HSR	PM Width
1	۶۳/۵۲	۷۰/۷۶	۴۱/۲۵	۵۸/۶۱	۶۶/۷۲
2	۶۵/۱۹	۶۳/۵۲	۵۶/۷۱	۷۱/۹۱	۶۸/۳۷
3	۴۸/۷۳	۵۸/۳۴	۶۷/۲۹	۵۸/۲۲	۵۳/۸۳
4	۶۶/۵۳	۵۱/۳۳	۷۸/۷۱	۵۵/۲۲	۵۵/۰۵
مشارکت	۱۷/۸۱	۱۹/۴۳	۳۷/۴۶	۱۶/۶۹	۱۴/۵۵
رتبه	۳	۲	۱	۴	۵

بنابر داده‌های ارائه شده در جدول (۱۰) در این بهینه‌سازی، ریپل گشتاوری ۱۷/۹۳٪ در برابر ریپل گشتاور نامناسب ۷۳/۶٪ به دست می‌آید. در ضمن در این حالت، گشتاور حداکثری به مراتب بهتر از مورد بهینه نشده خواهد بود، گشتاور ۲/۴۶ نیوتن متر در برابر گشتاور ۱/۱۶ مشاهده می‌شود.

همچنین جدول (۱۰) و نمودار (۵) مقایسه‌ای بین نمونه‌های بهینه شده بر اساس حداکثر گشتاور و حداقل ریپل گشتاوری در مقابل نمونه بهینه نشده نمایش می‌دهد و عملکرد بهتر نمونه‌های بهینه شده چه در زمینه ریپل گشتاوری و چه در زمینه پیک گشتاوری مشهود است.



نمودار (۵): مقایسه‌ای بین نمونه اولیه ماشین و نمونه‌های بهینه‌سازی شده بر اساس حداکثر گشتاور خروجی و حداقل ریپل گشتاوری

پارامتر دیگری که در طراحی ماشین‌های الکتریکی مهم است و در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد ضد محرکه الکتریکی است. ضد محرکه الکتریکی بدین معنی است که در صورتی که ماشین در حرکت دائمی خود قرار داشته باشد، به علت اعمال نیرو به روتور در حال حرکت ولتاژی در آن القاء می‌شود که بر خلاف ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی هاست و باعث می‌شود ولتاژ اعمالی کمتر از مقدار واقعی خود باشد. خروجی‌های ضد محرکه الکتریکی بر اساس درصد نسب به ولتاژ مرجع برای ماشین طراحی شده و نمونه‌های بهینه شده محرکه در نمودار (۶) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود هر سه مورد شکل موج سینوسی به خود دارند اما بنابر

۵- نتیجه گیری

در این مقاله بررسی اجمالی بر روی ماشین‌های شار معکوس و نحوه طراحی این ماشین انجام شده است و با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی، ماشین شار معکوس طراحی شده از نظر ریپل گشتاوری و حداکثر گشتاور خروجی بهینه‌سازی شد. با بررسی نمودارهای خروجی بهینه شده مشاهده شد در صورت بهینه‌سازی بر اساس حداکثر گشتاور خروجی، گشتاور خروجی ۳ برابر شده است و ریپل گشتاوری نیز ۴۸٪ کاهش یافته است. همچنین در صورت بهینه‌سازی بر اساس حداقل ریپل گشتاوری، گشتاور خروجی بیش از ۲ برابر شده است و ریپل گشتاوری نیز به میزان ۵۵/۷٪ کاهش یافته است. در ضمن، از مهم‌ترین دستاورد مراحل بهینه‌سازی می‌توان به برنامه‌ریزی دقیق روش تاگوچی برای تعیین ترکیب بهینه پارامترهای مورد نظر و همچنین انطباق قابل قبول نتایج پیش‌بینی شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی اشاره کرد که توانمندی این روش را نشان می‌دهد. همچنین یکی دیگر از مزیت‌های روش تاگوچی این است که علاوه بر معرفی بهینه‌ترین ترکیب پارامترهای معرفی شده می‌تواند تأثیر کلی هر متغیر بر روی خروجی مورد نظر و حساسیت خروجی را به این تغییرات نیز نشان داد. حتی با این وجود با کاهش تعداد آزمایش‌های انجام شده زمان آزمایش‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Li, H. Y. and Zhu, Z. Q. "Analysis of Flux-reversal Permanent Magnet Machines with Different Consequent-pole PM Topologies," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, pp. 1-5, November 2018.
- [2] Z. Yuansheng, K. Baoquan, and Z. Xiaokun, "A Study of Torque Characteristics of a Novel Flux Reversal Machine," 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1-5, 2019.
- [3] K. Xie, D. Li, R. Qu, Y. Gao, and Y. Pan, "A Novel Flux Reversal PM Machine with Halbach Array Magnets in Stator Slot Opening," 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1-6, 2017.
- [4] M. Amirian and M. Ardebili, "Impact of Stator and Rotor Teeth Parameters on Operation and Characteristics of Flux Reversal Machine," 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), pp. 56-60, 2019.
- [5] T. H. Kim, "A Study on the Design of an Inset-permanent-Magnet-type Flux-reversal Machine," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, pp. 2859-2862, June 2009.
- [6] Ch. Sikder, I. Husain, and W. Ouyang, "Cogging Torque Reduction in Flux-Switching Permanent Magnet Machines by Rotor Pole Shaping," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, pp. 3609-3619, September-October 2015.
- [7] L. Hao, M. Lin, D. Xu, N. Li, and W. Zhang, "Cogging Torque Reduction of Axial-Field Flux-Switching Permanent Magnet Machine by Rotor Tooth Notching," In IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, pp. 1-4, Nov. 2015.
- [8] D.S. More and B.G. Fernandes, "Power Density Improvement of Three Phase Flux Reversal Machine with Distributed Winding," IET Electric Power Applications, vol. 4, pp. 109-120, February 2010.
- [9] Y. Gao, D. Li, R. Qu, and J. Li, "Design Procedure of Flux Reversal Permanent Magnet Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, pp. 1584-1590, September-October 2017.
- [10] M. Ghasemian, F. Tahami, and G. Rezaadeh, "A Comparative Analysis of Permanent Magnet Flux Reversal Generators with Distributed and Concentrated Winding," IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1657-1661, 2017.
- [11] D. Martínez, "Design of a Permanent-magnet Synchronous Machine with Non-overlapping Concentrated Windings for the Shell Eco Marathon Urban Prototype," MSc. Thesis, KTH, Electrical Energy Conversion, Stockholm, Sweden, 2012.
- [12] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovca, "Design of Rotating Electrical Machines," John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, February 2008.
- [1] R. Deodhar, S. Andersson, I. Boldea, and T. Miller, "The Flux-Reversal Machine: A New Brushless Doubly-salient Permanent-Magnet Machine," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, pp. 925-934, July/August 1997.
- [2] T. H. Kim, S. H. Won, K. Bong, and J. Lee, "Reduction of Cogging Torque in Flux-reversal Machine by Rotor Teeth Pairing," IEEE International Magnetics Conference, vol. 41, pp. 3964-3966, October 2005.
- [3] X. Zhu and W. Hua, "An Improved Configuration for Cogging Torque Reduction in Flux-reversal Permanent Magnet Machines," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, pp. 1-4, June 2017.
- [4] Y. Gao, R. Qu, D. Li, J. Li, and G. Zhou, "Consequent-Pole Flux Reversal Permanent-Magnet Machine for Electric Vehicle Propulsion," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, pp. 1-5, June 2016.

- [20] S. Taghipour borojeni and M. H. Hajjare, "Optimization of Cogging Torque in Surface Mounted PM Machines using PM Segmentation," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 2, pp. 31-38, 2014 (In Persian).
- [21] I. Boldea, J. Zhang, and S. A. Nasar, "Theoretical Characterization of Flux Reversal Machine in Low Speed Servo Drives: The Pole PM Configuration," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 1549–1557, November/December 2002.
- [17] Roos P. J., "Taguchi Techniques for Quality Engineering," McGraw-Hill, New York, 1998.
- [18] B. C. Gupta, "Sampling Methods," in *Statistical Quality Control: Using MINITAB, R, JMP and Python*, Wiley, pp.89-121, 2021.
- [19] D. S. More and B. G. Fernandes, "Power Density Improvement of Three Phase Flux Reversal Machine with Distributed Winding," *Proceedings IET Electric Power Applications*, vol. 4, pp. 109-120, Feb. 2010.