



طراحی بهینه یک موتور هیبرید آهنربای دائم-هیستریزیس سرعت بالا

عباس نوایی

گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
navaeeabbas@gmail.com

دکتر حامد گرگین پور

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
ha.gorgin@gmail.com

دکتر مجتبی نجفی

گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
mojtabanajafi2000@yahoo.com

چکیده

عیب اساسی موتورهای هیستریزیس که برای کاربردهای خاص دور بالا استفاده می‌شوند جریان مغناطیس‌کنندگی بالا، ضریب توان پائین و بازده کم می‌باشد. از طرفی موتورهای PM که امروز بطور وسیعی استفاده می‌شود و دارای مزایای بازده بالا، ضریب توان بالا و پایداری نسبی بالاتر در سرعت سنکرون هستند از مشکل نداشتن گشتاور راه‌اندازی و نوسانات گشتاور و سرعت رنج می‌برند. لذا در این مقاله، برای غلبه بر مشکل موتورهای هیستریزیس و PM و ایجاد یک مصالحه بین مزایا و معایب این نوع موتورها، یک ساختار ترکیبی تحت عنوان موتور ترکیبی سنکرون هیستریزیس-PM برای داشتن مزایای هر دو ماشین پیشنهاد شده است. در روند طراحی این ماشین، از مدل‌های مدار معادل الکتریکی استفاده شده و یک موتور سرعت بالا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری برای داشتن مشخصه‌های عملکردی مناسب طراحی می‌شود. صحت عملکرد ماشین بهینه طراحی شده نیز به کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود 2D اثبات می‌شود.

واژگان کلیدی: موتور ترکیبی سنکرون هیستریزیس-PM، بهینه‌سازی، الگوریتم رقابت استعماری، آنالیز اجزای محدود 2D



۱- مقدمه

موتور هیستریزس بطور وسیع در کاربردهای بسیار دقیق، سرعت بالا و با توان نسبتاً پائین استفاده می‌شود. این موتورها نه تنها دارای ساختاری ساده شامل یک سیم‌پیچی استاتور سه فاز متداول و یک رینگ رتور بدون شیار است بلکه دارای گشتاور راه‌اندازی مناسب نیز می‌باشد. عدم وجود شیارهای رتور سبب عملکرد با نویز پائین شده و موتور را برای کاربردهایی با گشتاور ثابت، سرعت ثابت و عملکرد نرم مناسب می‌سازد. اما این موتور از جریان مغناطیس‌کنندگی بالا، ضریب توان پائین و بازده کم بخاطر تلفات بالا رنج می‌برد. همچنین این موتور دو مشکل برای بکارگیری در درایوهای با دقت بالا نظیر ژيروسکوپها دارد. یکی نوسانات با فرکانس ۳-۵ هرتز حول سرعت سنکرون و دیگری تصادفی بودن موقعیت رتور نسبت به میدان چرخان در سرعت سنکرون.

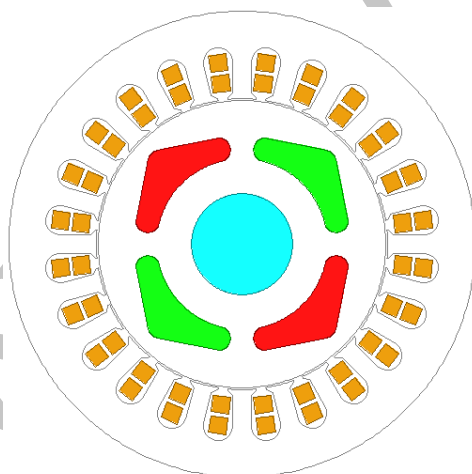
در سال‌های اخیر، مقالات زیاد و مفیدی در زمینه مطالعه بر روی روش‌های تحلیلی و عددی موتورهای هیستریزس مانند روش مدل هایپربولیک لوپ هیستریزس، روش مدارهای معادل الکتریکی و مغناطیسی، روش تحلیلی مبتنی بر نظریه نفوذپذیری مغناطیسی مرکب و مجازی، روش عددی اجزای محدود (FEM) و ... منتشر شده است. همچنین مبنای برخی مطالعات، استفاده از روش‌های تحلیلی هیدوگدون و پریساج و تقریب‌های مختلف اعم از مستطیل، متوازی الاضلاع، بیضی و ... برای مدل‌سازی لوپ هیستریزس رینگ هیستریزس این نوع موتورها بوده است. بررسی ساختارهای شعاعی و محوری موتورهای سنکرون هیستریزس نیز در برخی مراجع دیده شده است. بر اساس این مطالعات، ساختارهای محوری در مقایسه با شعاعی مزایایی نظیر نسبت گشتاور به حجم بالا، بازده بسیار عالی، ساختمان تخت و فشرده، استفاده بیشتر مواد فعال و تهویه و خنک سازی بهتری دارند اما با این حال، بر اساس نوع کاربری خاص این موتور از جمله کاربرد آنها در ژيروسکوپها، استفاده از ساختارهای شار شعاعی اجتناب ناپذیر می‌باشد. یکی از ایده‌های که به منظور رفع معایب موتور سنکرون هیستریزس متداول مطرح است، تغییرات در ساختار رتور این نوع از موتورها می‌باشد. همانطور که می‌دانیم، موتورهای PM دارای مزایای بازده بالا، ضریب توان بالا و پایداری نسبی بالاتر در سرعت سنکرون هستند. اما این موتورها، هنگام کارکرد در فرکانس خط، دارای گشتاور راه‌اندازی نیستند و سنکرون شدن دوباره آنها در اثر تغییرات بار مشکل است. همچنین نوسان گشتاور این موتورها ناشی از گشتاور دندانه‌ای از مهمترین مشکلات این موتور است. اگر چه استفاده از یک قفس القایی می‌تواند مشکل گشتاور راه‌اندازی را حل کند، اما ساختار را پیچیده کرده و باعث افزایش نویز و لغزش نیز می‌گردد. لذا بنظر می‌رسد با ارائه ساختارهای ترکیبی کاربردی و در عین حال ساده برای رتور موتورهای PM و هیستریزس بتوان مصالح‌های قابل قبول بین مزایا و معایب این دو موتور دست یافت. ایده‌ی موتور ترکیبی هیستریزس آهنربای دائم، اولین بار توسط پرفسور رحمان مطرح گردید و بیشترین پژوهش‌های در این حوزه مربوط به ایشان است (Rahman, 1993). با گذشت بیش از دو دهه از مطرح شدن این ایده، ساختارهای محدود دیگری نظیر ساختار نوع اول و نوع دوم نیز دیده می‌شود (Jagiela et al, 2014). اما با این حال هنوز هم ارائه ساختارهای ترکیبی از جمله ترکیب PM و هیستریزس، برای دستیابی به یک مزیت رقابتی و کاربردی در مقایسه با ساختارهای ترکیبی متداول مورد توجه محققان قرار دارد.

بر همین اساس در این مقاله، ضمن معرفی یک ساختار موتور ترکیبی سنکرون هیستریزس-PM، طراحی بهینه موتور برای داشتن مزایای کاربردی هر دو ماشین PM و هیستریزس انجام می‌شود. در روند طراحی این ماشین، از مدل‌های مدار معادل الکتریکی استفاده شده و یک موتور سرعت بالا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری برای داشتن مشخصه‌های عملکردی مناسب طراحی می‌شود. صحت عملکرد ماشین بهینه طراحی شده به کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود $2D^1$ اثبات می‌شود.

۲- معرفی ساختار جدید موتور

ترکیب مواد PM و هیستریزیس در رتور مزایای بسیاری نسبت به موتورهای PM یا هیستریزیس دارد. در عملکرد القایی تا پیش از رسیدن به سرعت سنکرون، گشتاور موتور شامل گشتاور هیستریزیس، فوکو و گشتاور نوسانی PM است. در سرعت سنکرون، گشتاورهای PM و هیستریزیس، گشتاور موتور را ایجاد می‌کنند. اثر منفی گشتاور ترمزی PM توسط گشتاور جریان فوکو بویژه در ابتدای راه‌اندازی جبران سازی می‌شود. در طرح‌های معمول موتور ترکیبی، PM ها درون شیارهایی در فضای بین رینگ هیستریزیس و محور موتور جا زده می‌شوند. در این طرح با توجه به قطر کمتر محل قرارگیری PM ها نسبت به قطر خارجی روتور، گشتاور تولیدی آنها کاهش می‌یابد ضمن اینکه امکان افزایش تعداد قطب‌ها نیز کمتر شده و گشتاور دندانه‌ای تولیدی PM ها سبب برهم خوردن ویژگی عملکرد نرم موتور هیستریزیس می‌شود. افزایش قطر ماشین سبب افزایش اینرسی و کند شدن عملکرد دینامیکی موتور می‌شود زیرا اینرسی با توان ۴ قطر و توان ۱ طول رابطه مستقیم دارد.

طرح پیشنهادی شامل یک موتور هیبرید تک طبقه مطابق شکل یک است که در آن از قطعات آهنربای دائم درون یک رتور با رینگ هیستریزیس استفاده شده است. شکل قطعات PM به گونه‌ای انتخاب شده تا بدین ترتیب گشتاور دندانه‌ای یکدیگر را تا حدی خنثی کنند و عملکرد کلی موتور را از لحاظ نویز و لرزش بهبود دهند. لازم به ذکر است که استاتور ماشین پیشنهادی، یک سیم پیچی سه فاز توزیع شده متداول دارد.



شکل(۱): طرح پیشنهادی شامل یک موتور هیبرید تک طبقه

موتور PMSM دارای گشتاور راه‌اندازی نمی‌باشد یعنی اگر یک PMSM به ولتاژ سه فاز ac وصل شود، گشتاور متوسط تولیدی برابر صفر است. اما گشتاور دندانه‌ای ایجاد شده سبب برهم خوردن مزیت راه‌اندازی موتور هیستریزیس شده و حتی می‌تواند سبب قفل شدن موتور در لحظه راه‌اندازی شود. بخشی از نوسان گشتاور نیز بدلیل هارمونیک‌های فضایی ناشی از ساختار شیاربندی شده استاتور است. از طرف دیگر، بدلیل سینوسی بودن جریان، نوسانات گشتاور بدلیل شکل موج دوزنقه‌ای جریان و کموتاسیون وجود ندارد. نوسانات جریان ناشی از کلید زنی در اینورتر نیز سبب ایجاد نوسانات گشتاور می‌شود که در اینجا از این مولفه صرف‌نظر می‌شود. برای حل این مشکل شکل قطعات آهنربایی به گونه‌ای انتخاب شده تا حداقل گشتاور رلوکتانسی و دندانه‌ای را داشته باشد. بدین ترتیب علاوه بر بهبود نوسانات در لحظه راه‌اندازی، عملکرد کلی موتور در حالت ماندگار نیز نرم تر و با نوسانات کمتری همراه است. لازم به ذکر است که وجود لایه نازکی از جنس هادی بر روی رینگ هیستریزیس سبب می‌شود تا بتوانیم گشتاور ناشی از اثر فوکو در راه‌اندازی و تا پیش از رسیدن به حالت ماندگار و سرعت سنکرون استفاده کنیم. همچنین، با توجه به ساختار جدید ماشین و پیچیدگی ذاتی در مدلسازی موتورهای هیستریزیس، دستیابی به یک طرح بهینه با اعمال روش‌های بهینه‌سازی متداول، مشکل است.

۱-۲: ملاحظات طراحی ماشین برای کاربردهای سرعت بالا

با توجه به اینکه هدف طراحی یک موتور برای عملکرد در سرعت های بالا است، ظرفیت و ثابت بهره برداری الکترومغناطیسی به صورت زیر تعریف می شوند:

$$S = CnD_{si}^2 \ell_{fe} \quad \text{Electromagnetic utilization} \quad (1)$$

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_w AB_{ag}$$

در اینجا n ، K_w ، A ، D_{si} ، D_{si} ، ℓ_{fe} به ترتیب سرعت، ضریب سیم پیچی، بارگذاری الکتریکی، بارگذاری مغناطیسی، شار مغناطیسی، می باشد.

برای افزایش توان خروجی یک موتور، هم می توان سرعت را افزایش داد و هم چگالی شار و بارگذاری الکتریکی. بخاطر اشباع هسته، دامنه چگالی شار فاصله هوایی B_{ag} نمی تواند بیشتر از یک تسلا شود. بارگذاری الکتریکی را می توان با افزایش جریان استاتور یا تعداد هادی ها افزایش داد اما این به معنای افزایش تلفات در استاتور است. همچنین، بارگذاری الکتریکی بالا، تنها برای یک سیستم خنک کننده قوی امکان پذیر است.

بطور مثال با افزایش 70% در C یک ماشین سرعت بالا، توان خروجی آن ۷ برابر یک ماشین سرعت پائین می شود:

جدول (۱): مقایسه مقادیر موتورهای سرعت پایین و بالا تحت تاثیر افزایش C

Parameter	Low-Speed	High-Speed
	Motor Quantity	Motor Quantity
Torque	40.5 Nm	12 Nm
Speed	1000rpm	24000 rpm
A	145 A/Cm	225 A/Cm
$B\delta$	0.65 T	0.7 T
D_{si}	154 mm	90 mm
ℓ_{Fe}	175 mm	90 mm
K_w	0.933	0.933
C	1 KVA min/m ³	1.7 KVA min/m ³
Pout	4.24 kw	30 kw
Cooling	Water jacket	Self cooling without fan

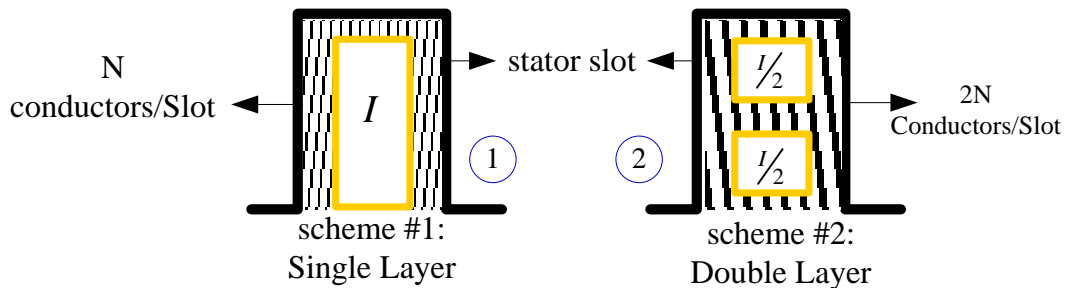
افزایش سرعت موتور باعث افزایش تلفات آهن، اصطکاک و تلفات اضافی شده و باید A و $B\delta$ و در نتیجه C کاهش یابد.

$$C \propto AB_{\delta} \propto \frac{1}{n^{1.6}} \quad (2)$$

رابطه بین حداکثر سرعت با توان موتورهای آهنربایی بر اساس اطلاعات ماشین های ساخته شده به صورت زیر است:

$$\log n = 4.27 - 0.275 \log P_p \dots n[Hz], P[w] \quad (3)$$

بنابراین گشتاور تولیدی موتور تا حدود زیادی به ابعاد و توان خروجی به سرعت وابسته است. در صورتی که وزن مس، وزن آهن، ابعاد موتور، گشتاور، چگالی جریان، تلفات اهمی، شار مغناطیسی در دو موتور یکسان باشد، ولتاژ القایی در طرح ۲، دو برابر طرح ۱ و توان و سرعت آن نصف می شود. پس در سرعت بالا برای رسیدن به توان بالاتر از طرح ۱ استفاده می کنیم اما با توجه به کم شدن دامنه هارمونیک های مکانی شار استاتور ناشی از ساختار شیاربندی شده در ساختار دولایه با گام کسری، برای هدف کاهش نوسانات گشتاور، از طرح ۲ استفاده می شود.



شکل (۲): ساختار تک لایه و دو لایه برای سیم پیچی استاتور

تلفات در سرعت بالا عبارتند از تلفات بی باری، تلفات بار.

$$\text{Iron losses: } P_{fe} \propto B^2 f^x \quad x \approx 1.8$$

$$\text{Friction losses: } P_{fr} \propto D_{ro} \ell_{fe} n^y \quad y = 2 \dots 3 \quad (4)$$

$$\text{Couper losses: } P = 3R_s I_s^2$$

تلفات اضافی ناشی از جریان های فوکو در سیم پیچی های استاتور و در آهن و PM رتور بسته به هندسه رتور و شکل جریان استاتور می باشد.

$$P_{add} = f(n, \text{current shape}) \propto I^2 n^z \quad z = 1.5 \sim 2 \quad (5)$$

در موتورهای سرعت بالا تلفات آهنی، اصطکاک و اضافی غالب بوده و باید در طراحی مورد توجه قرار گیرند. ورقه های آهن با تلفات کم 1 w/kg در 50Hz و 1T می تواند تلفات آهن را کاهش دهد. تلفات اصطکاک هوا توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P_{fr} = 1.7 \rho_{air} n^3 (2R)^4 \ell \frac{1}{R_e^{0.15}} \quad (6)$$

$$\rho_{air} = 0.826 \text{ kg/m}^3 \text{ at } 140^\circ \text{C}$$

Kinematic viscosity:

$$\nu_{air} = 26.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$n = \frac{v_{air}}{2\pi R} \text{ Hz}$$

$$R_e = \frac{2R\pi n g}{\nu_{air}}$$

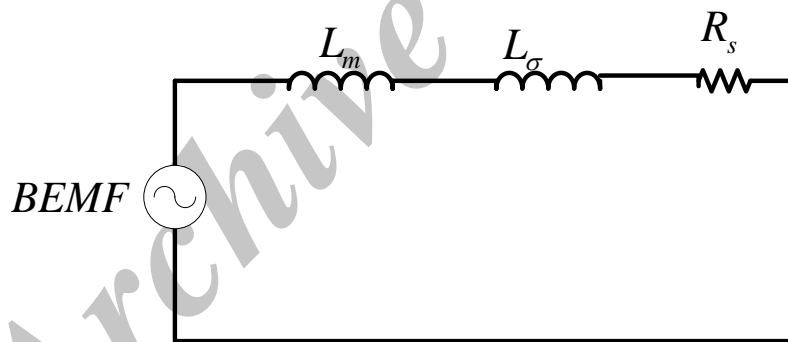
در اینجا چگالی هوا، ρ_{air} ، چگالی هوا، R_e عدد رینولتز، ℓ طول است. در صورتیکه $R_e > 1000$ باشد Turbulent Flow می باشد. با توجه به اینکه $vN \propto n N_{sw} k_w d \ell f e B$ پس برای سرعت های بالا، N_{sw} و در نتیجه اندوکتانس $L \propto \mu_0 N_{sw}^2 \ell f e \propto \frac{1}{f^2}$ نسبتاً کوچک هستند. برای داشتن هارمونیک های جریان پائین، فرکانس های کلید زنی باید بالا بوده (که معمولاً ۵ برابر فرکانس فاندمنتال است $f_{sw} \approx 5f$) و از فیلتر در خروجی اینورتر چند سطحی استفاده شود تا تلفات اضافی کاهش یابد.

اگر رینگ آهنربا رینگ ضخیم باشد، آهنربا رتور را شیلد کرده و تفاوتی بین رتور یکپارچه و ورقه ورقه در تلفات بدلیل هارمونیک های ولتاژ وجود ندارد. اما اگر آهنرباها بصورت قطعه ای باشند، این اثر شیلد کنندگی وجود نداشته و تفاوت بزرگی بین تلفات رتور یکپارچه و رتور ورقه ورقه وجود دارد. بنابراین آهنرباهای سطحی قطعه ای رتور با هسته ورقه ورقه شده بهترین انتخاب برای کاهش تلفات اضافی رتور ناشی از هارمونیک های ولتاژ است. تلفات اضافی هارمونیک های ولتاژ و جریان در سرعت های بالا در مورد عملکرد با جریان یا ولتاژ پالسی بسیار بزرگ و قابل توجه است ولی برای عملکرد با موج سینوسی بسیار کم است. پس عملکرد با منبع سینوسی سبب افزایش بازده می گردد و دمای سیم پیچ را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد.

۳- مدار معادل الکتریکی ماشین

۳-۱: مدار معادل ماشین آهنربای دائم با آهنربای سطحی (surface mounted PMSM)

از آنجائیکه، در ماشین های آهنربایی، رتور با PM سطحی، L_m کمتری نسبت به IPM دارد، پس برای بهبود P.F. در ساختار پیشنهادی MSPM، بایستی از طرح های IPM استفاده نمود. از سوی دیگر، در سرعت های بالا از یک بانداژ کرین یا فایبرگلاس برای نگه داشتن آهنرباهای سطحی استفاده می شود. بدلیل نیروهای سانتریفیوژ متفاوت در محل آهنربا و فاصله هوایی بین آنها، لبه های PM در بانداژ فیبر کرین نفوذ می کنند که در صورت IPM بودن رتور این بانداژ نیز لازم نیست. مدار معادل حالت ماندگار IPMSM در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): مدار معادل حالت ماندگار PMSM

در این شکل، L_m اندوکتانس مغناطیس کنندگی، L_σ شامل اندوکتانس نشتی شیار، اندوکتانس نشتی end winding و اندوکتانس نشتی هارمونیک است.

$$L_m = \mu_0 (N_{sw} k_{wl})^2 \frac{2m \tau_p \ell_{fe}}{\pi^2 P g_{re}}$$

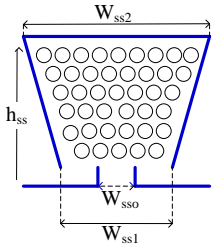
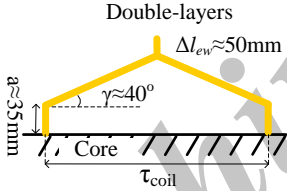
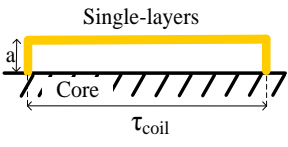
$$g_{re} = g + h_{bund} + h_{PM}; \tau_p = \frac{x D_{si}}{2P} \quad (7)$$

$$\omega_s N_{sw} k_{wl} \frac{2}{\pi} \tau_p \ell_{fe} B_{g,h=1} = BEMF$$

$$Carter Factor : Kcs = \frac{\tau_{ss}}{\tau_{ss} - \gamma(\frac{w_{sso}}{2g}) g_{re}} ; \gamma(x) = \frac{4}{\pi} [x \sin^{-1}(x) - \ln \sqrt{1+x^2}] \quad (8)$$

نحوه محاسبه اندوکتانس های نشتی در جدول (۲) توضیح داده شده است.

جدول (۲): نحوه محاسبه اندوکتانس های ناشی

$L_{leak.,ss}^{sw} = \mu_0 N_{sw}^2 \frac{2}{P \cdot q_{sw}} l_{fe} \lambda_{leak.,ss}^{sw}$ $N_{sw} = \frac{N_{ss}}{6} N_l^{sw} N_c^{sw}, \quad q_{sw} = \frac{N_{ss}}{6P}$	
	$\lambda_{leak.,ss}^{sw} = \frac{2h_{ss}}{3(w_{ss2} + w_{ss3})} + \frac{h_{ss1}}{w_{sso}} + \frac{2h_{cw}}{w_{ss1} + w_{ss3}} + \frac{g}{\tau_{ss}}$
$L_{leak.,ew}^{sw} = 0.3 \mu_0 N_{sw}^2 \frac{2}{P} l_{ew}^{sw}$ $l_{ew}^{sw} = \frac{\tau_{coil}^{sw}}{\cos(\gamma)} + 2a + \frac{\pi}{4} h_{ss} + \Delta l_{ew}$	
 <p>Double-layers $\Delta l_{ew} \approx 50\text{mm}$ $\gamma \approx 40^\circ$ $a \approx 35\text{mm}$ Core τ_{coil}</p>	 <p>Single-layers Core τ_{coil}</p>

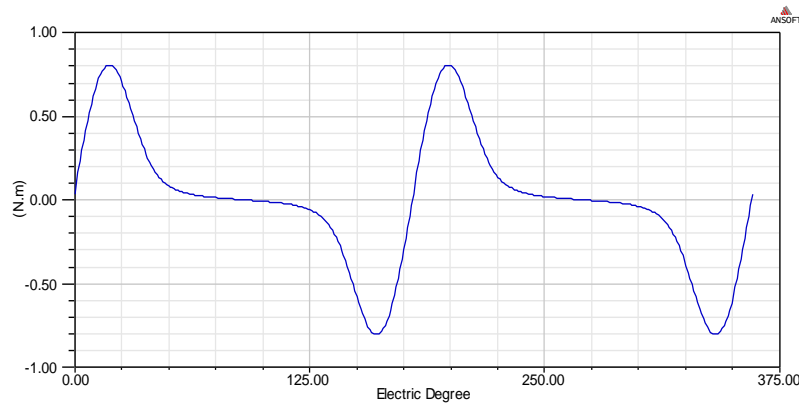
چگالی شار فاصله هوایی در طبقات با روتور آهنربایی توسط روابط زیر محاسبه می شود. با داشتن چگالی شار فاصله هوایی، چگالی شار در دندانه و یوغ استاتور نیز قابل محاسبه است:

$$K_M = \frac{2P}{\pi} \left(1 - \frac{D_{ri}}{D_{ro}}\right): \text{flux concentration factor}$$

$$B_{ag} = \frac{B_{res}}{\frac{1}{K_M} + \frac{2g\mu_M}{\mu_0 h_M}}; \mu_M \approx \mu_0, h_M: \text{thickness of PM}$$

(۹)

یکی از معایب اصلی ماشین های PM، نوسانات گشتاور است که به طراحی آنها بر می گردد. این نوسانات موجب لرزش مکانیکی، نویز صوتی و مشکلات در سیستم درایو می شود. حداقل کردن این نوسانات از اهمیت اصلی در طراحی ماشین PM برخوردار است. یکی از قسمت های اصلی این نوسانات گشتاور، گشتاور دندانه ای است که در اثر عکس العمل بین PM ها و شیارهای استاتور بوجود می آید.



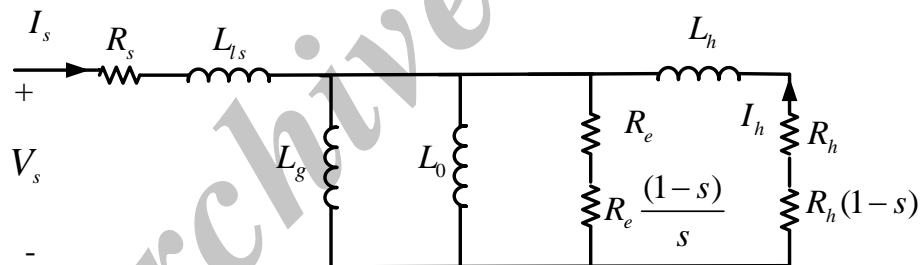
شکل (۴): گشتاور دندانه‌ای بر حسب θ_e

فرکانس گشتاور دندانه‌ای برابر nN_s بوده و دامنه آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{el} = \sum_{j=1}^{N_{ex}} i(x_j, t) B(x_j, t) \ell \frac{D_{si}}{2} ; T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (10)$$

۳-۲: مدار معادل ماشین سنکرون هیستریز

در حالت دائم، موتور هیستریز دارای مدار معادلی به شکل (۵) می‌باشد.



شکل (۵): مدار معادل پیشنهادی موتور سنکرون هیستریز

برای بدست آوردن عناصر این مدار معادل، فرض نمائید که توزیع هادی‌های سیم پیچی استاتور و جریان فاز a به صورت زیر باشند:

$$n_a(\theta) = \frac{N_s}{2} |\cos \theta| \quad (11)$$

$$i_a(t) = \hat{I} \sin \omega t \quad (12)$$

نیروی محرکه مغناطیسی کل و گشتاور ناشی از جریان سه فاز در زاویه θ برابر خواهد بود با:

$$F(\omega t, \theta) = \frac{3N_s \hat{I}}{4} (\sin \omega t) \quad (13)$$

$$\tau_s = \frac{3}{4} N_{sw} I_{max} \sin(\omega t - \theta)$$



با استفاده از روش تحلیل تقریبی (Rahman and Slemon, 1964) مقدار مولفه اصلی چگالی شارفاصله هوایی در موقعیت زاویه ای θ برابرست با:

$$B_{ag} = \frac{\mu_0 r_h H_c}{g} J \sin(\omega t - \theta - \beta) \quad (14)$$

تاثیر ماده هیستریزیس روتور ایجاد یک زاویه تاخیری بین MMF استاتور و میدان برآیند فاصله هوایی است. که در رابطه فوق، زاویه پسفازی β (زاویه بین mmf های روتور و استاتور) و ضریب J برای ضریب پسماندزداي نرمالیزه شده بزرگتر از مقدار بحرانی k آن یعنی $kc=1.862$ عبارتند از:

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \cdot \sqrt{(2/\pi)^2 - 1/k^2}}{k - 2/k} \right\} \text{ (rad)} \quad (15)$$

$$J = \frac{2}{\pi} \frac{k - 2/k}{\cos \beta} \quad (16)$$

در عبارات فوق، ضریب k برابرست با:

$$k = \frac{3\sqrt{2} N_{sw} I_{max}}{4 r_h H_c} \quad (17)$$

اندوکتانس های L_p , L_o و L_g نیز از روابط زیر بدست می آیند؛ در اینجا روابط محاسبه پارامترهای مدار معادل برحسب متغیرهای ابعادی و سیم پیچی، مشخصات الکتریکی و مغناطیسی آورده شده است:

$$\begin{aligned} L_g &= \frac{3\pi}{8} \frac{N_{sw}^2 \mu_o r_g l}{g_e} \text{ [H]} \\ L_b &= \frac{3\pi}{8} \frac{N_{sw}^2 \mu_o \mu_r t_r l}{r_h} \text{ [H]} \\ L_p &= \frac{3\pi}{8} \frac{N_s^2 \mu_o \mu_p t_r l}{r_h} \text{ [H]} \end{aligned} \quad (18)$$

قبلا بیان شد که گشتاور هیستریزیس ناشی از توان هیستریزیس و به عبارتی سطح منحنی B-H است که در بخش روتور مصرف می شود. توان هیستریزیس را میتوان با مقاومت معادل آن یعنی R_h نشان داد که مقدار آن بر حسب پارامترهای طراحی موتور بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$R_h = \frac{12f (K_{wl} N_{sw})^2 t_r (R_o - R_i) K_{sf} B_{ag, max}}{1000 R_{av} H_g} \text{ [\Omega]} \quad (19)$$

که اندوکتانس L_h از رابطه زیر بدست می آید:

$$L_h = \frac{X_h}{\omega} = \frac{R_h}{\omega \tan \beta} \text{ [H]} \quad (20)$$

مقاومت R_e که در شرایط آنسکرون جریان های گردابی از آن عبور می نماید و سبب ایجاد گشتاور القایی می شود از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$R_e = \frac{12 \rho \ell_h}{10^4 A_h} \text{ [\Omega]} \quad (21)$$



در مدار معادل فوق، مقاومت و راکتانس پراکنده استاتور نیز به ترتیب از رابطه ذیل قابل محاسبه اند [۶]

$$R_s = \frac{0.001L_{ph}}{\sigma q_l} [\Omega] \quad (22)$$

$$Xls = \omega Lls = Xslot + Xbelt + Xend [\Omega / ph] \quad (23)$$

مولفه گشتاور هیستریزیس در یک موتور هیستریزیس از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_e = 3L_q \left(\frac{4r_h H_c}{3\sqrt{2}N_{sw}} \right)^2 J k \sin \beta \quad (24)$$

که در آن اندوکتانس L_q برابرست با:

$$\text{Where, } L_q \text{ is equal to: } L_q = L_p + (L_r \parallel L_g) \quad (25)$$

ضریب توان ورودی موتور از روی امپدانس ورودی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}\{Z_{in}(j\omega)\}}{|Z_{in}(j\omega)|} \quad (26)$$

که در آن امپدانس ورودی برابرست با:

$$Z_{in}(j\omega) = R_s + j\omega L_{ls} + [j\omega(L_g \parallel L_0)] \parallel [j\omega L_p + j\omega L_r + R_r] \quad (27)$$

جریان استاتور و بازده نیز از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$I_s = \frac{\sqrt{3}V_{s,\varphi}}{|Z_{in}|} \quad (28)$$

$$\eta = \frac{T_e \times \omega_s}{T_e \omega_s + P_{core} + 3R_s I_s^2} \quad (29)$$

۴- روند بهینه سازی DESIGN PROCEDURE

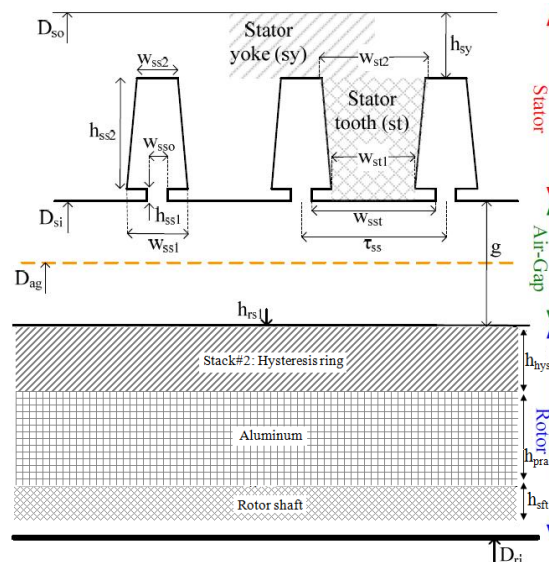
۴-۱: متغیرهای بهینه سازی

متغیرهای بهینه سازی موتور با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر در جدول (۳) لیست شده اند. سایر متغیرهای ابعادی توابعی از متغیرهای طراحی هستند:

جدول (۳): متغیرهای بهینه سازی موتور

#	Parameter	Description
x1	Dag	Air-gap average diameter
x2	lfe	Axial length
x3	wsst	Stator slot tooth width
x4	hss	Stator slot height (hss1+hss2)
x5	hsy	Stator yoke thickness
x6	Nsw	Number of stator winding turns/phase
x7	g	Physical air-gap length
x8	thys	Hysteresis ring thickness
x9	hry	Rotor yoke thickness
x11	apm	PM pitch angle
x12	Wpm	PM thickness
x13	Dri	Rotor inner diameter
x15	Nss	Number of stator slots
x16	asw	Number of stator winding parallel branches
x17	P	Number of pole pairs

شکل (۶) ابعاد و اندازه‌های پارامترهای مؤثر استاتور، رتور و فاصله هوایی را در یک برش عرضی نشان می‌دهد.



شکل(۶): ابعاد و اندازه‌های پارامترهای مؤثر استاتور، رتور و فاصله هوایی

۴-۲: تابع هدف

در این مقاله، هدف اصلی افزایش نسبت توان به حجم ماشین انتخاب شده است. اما بدلیل عدم وجود استاندارد مشخص و یا تجارب صنعتی و عملی در زمینه پارامترهای عملکردی ماشین مورد بررسی، نمی‌توان حدود بالا یا پایین را برای پارامترهای بازده و ضریب توان با توجه به مشخصات ماشین تعیین نموده و آنها را به عنوان محدودیت تعریف کرد. همچنین حداقل بودن اینرسی در کاربردهای سرعت بالا سبب بهبود پاسخ دینامیکی ماشین می‌گردد. ساختار ماشین پیشنهادی به گونه‌ای است که رسیدن به گشتاور و توان خروجی مورد نظر با نسبت طول/قطر بیشتری نسبت به ساختار معمول تک طبقه محقق می‌شود. بدین ترتیب اینرسی آن کمتر خواهد بود. از این رو تابع هدف به صورت حداکثر کردن بازده و ضریب و همزمان حداقل کردن حجم، اینرسی و نوسانات سرعت تعریف شده است:

$$OF(x) = \frac{\eta^{k_1} (P.F.)^{k_2}}{(J)^{k_3} (vol)^{k_4} (\Delta\omega)^{k_5}} \quad (30)$$

در این رابطه x بردار متغیرهای بهینه‌سازی بوده و k_i ($i=1 \dots 5$) می‌توانند برابر ۰ یا ۱ قرار داده شده و بدین وسیله تعریف تابع هدف را تغییر داد. تعاریف و نحوه محاسبه هر یک از اجزای تابع هدف در ادامه آمده است. تعاریف و نحوه محاسبه بازده و ضریب توان در بخش‌های پیشین آمده و در ادامه نحوه محاسبه اینرسی و نوسانات ولتاژ آمده است.

$$J = \gamma \ell \frac{(D^4 - d^4)\pi}{32}; \quad \gamma: \text{weight density} \quad (31)$$

$$\text{Torsion resonance frequency: } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C \frac{J_M + J_L}{J_M \cdot J_L}} \quad (32)$$

بایستی توجه داشت که فرکانس نوسانات گشتاور نباید f_0 را تحریک کند. همچنین، نوسان گشتاور محور بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{sh}(t) = \frac{\tau_{max}}{J_M} \frac{C}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin(\omega t) \quad (33)$$

نوسان سرعت نیز بر اساس عبارت زیر، باگشتاور ماکزیمم موتور رابطه مستقیم و با سرعت، اینرسی، تعداد قطب و گشتاور فاصله هوایی رابطه عکس دارد؛

$$speed\ oscillation \propto \frac{\tau_{max}}{(2\pi)^2 k p n^2 J_M} \left(1 - \frac{C/J_M}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \quad (34)$$

در اینجا، k هارمونیک k ام گشتاور فاصله هوایی می باشد.

لازم به ذکر است که طراحی موتورهای هیستریزس اغلب برای حالت no-load است بطوریکه موتور تنها جرم خود را شتاب داده و بر اصطکاک های داخلی خود غلبه کند.

۳-۴: محدودیت های بهینه سازی

محدودیت های در نظر گرفته شده شامل محدودیت های ساخت، مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی و جنبه های عملکردی است که عبارتند از: چگالی جریان در استاتور J^A چگالی شار در دندانه های استاتور J^S ضریب پرشدگی شیار استاتور J^T حداقل عرض دندانه استاتور J^D حداقل دهانه شیار استاتور J^W نسبت ارتفاع-عرض شیار استاتور J^R حداکثر سرعت خطی رتور در صورت EPM بودن رتورهای PM^V حداقل قطر محور J^M محدودیت های قطر و طول و وزن J^W حداقل ابعاد طول و عرض و ضخامت آهنربا J^B حداکثر سرعت خطی J^V

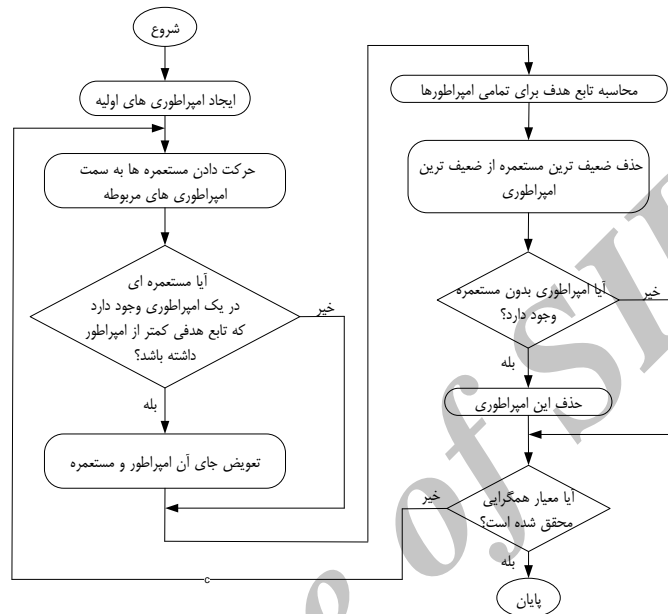
۴-۴: الگوریتم بهینه سازی

الگوریتم رقابت استعماری بر مبنای تکامل سیاسی و اجتماعی انسان پایه گذاری شده است. این الگوریتم همانند سایر روش های بهینه سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع می شود. در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت، یک "کشور" نامیده می شود. کشورها به دو دسته "مستعمره" و "استعمارگر" تقسیم می شوند. هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود در آورده و آنها را کنترل می کند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته این الگوریتم را تشکیل می دهد. مطابق سیاست جذب که به صورت تاریخی توسط کشورهای استعمارگری همچون فرانسه و انگلیس در مستعمراتشان اعمال می شد، کشورهای استعمارگر با استفاده از روش هایی همچون احداث مدرسه به زبان خود، سعی در از خود بی خود کردن کشور مستعمره با از میان بردن زبان و فرهنگ و رسوم آن داشتند. در این الگوریتم، این سیاست با حرکت دادن مستعمرات یک امپراطوری، مطابق یک رابطه خاص صورت می پذیرد. اگر در حین حرکت نسبت به استعمارگر به موقعیت بهتری برسد، جای آندو با هم عوض می شوند. در ضمن، قدرت کل یک امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت میانگین مستعمرات آن تعریف می شود. یعنی:

$$T.C.n = Cost(imperialist_n) + \xi \times mean\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (35)$$

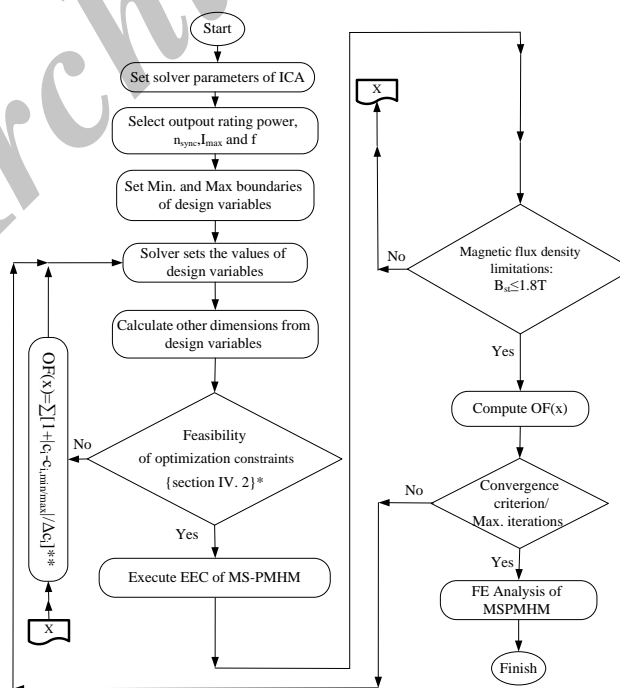
- 1 Current density in the stator
- 2 Flux density in the stator cogging
- 3 Filling factor of stator slot
- 4 The minimum width of the stator tooth
- 5 At least stator slot openings
- 6 Height/width ratio of stator slot
- 7 The maximum linear speed of the rotor (in case of PM rotor to be EPM).
- 8 The minimum diameter of the shaft.
- 9 The diameter, length and weight constraints.
- 10 The minimum dimensions of length, width and thickness of the magnet.
- 11 The maximum linear speed ($v_{lin} = 2\pi n$ (m/s))

در طی رقابت استعماری که بخش مهم دیگری از الگوریتم را تشکیل می‌دهد، امپراطوری‌های ضعیف به تدریج قدرت خود را از دست داده و به مرور زمان با تضعیف شدن از بین می‌روند. رقابت استعماری باعث می‌شود که به مرور زمان به حالتی برسیم که تنها یک امپراطوری در دنیا وجود داشته و آن را اداره می‌کند. این حالت زمانی است که الگوریتم رقابت استعماری با رسیدن به نقطه بهینه تابع هدف، متوقف می‌شود. شکل (۷) الگوریتم آن را نشان می‌دهند.



شکل (۷): الگوریتم روش بهینه‌سازی رقابت استعماری

فلوچارت روند بهینه‌سازی در شکل (۸) رسم شده است. توان، سرعت سنکرون، حداکثر جریان و فرکانس به عنوان ورودی‌های مسئله انتخاب شده اند:



شکل (۸): فلوچارت روش طراحی MS-PMHM

۵- نتایج طراحی بهینه Optimization Results

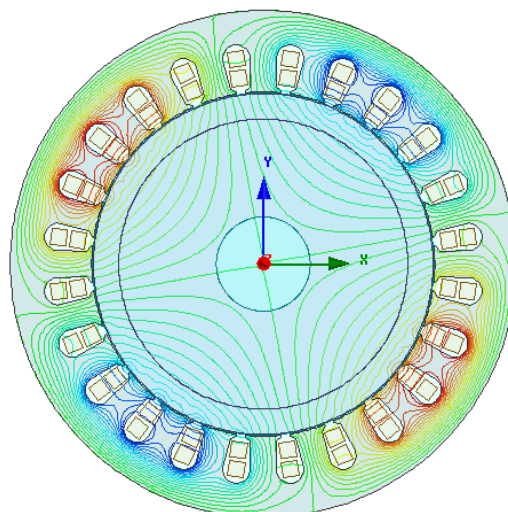
مقادیر پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری مطابق جدول (۴) انتخاب شده اند:

جدول (۴): مقادیر پارامترهای ICA

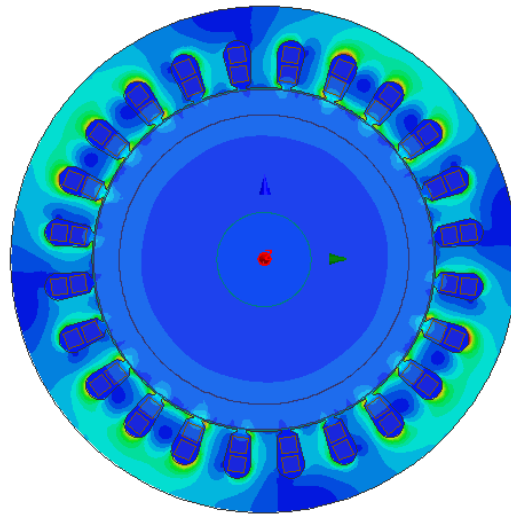
Parameter	Value	Description
Number of Countries	200	
Number of Initial Imperialists	8	
Number of all Colonies	192	Number of Countries- Number of Initial Imperialists
Revolution Rate	0.3	Rate of change of the socio-political characteristics of a country in a revolution
β	2	Assimilation Coefficient
γ	0.5	Assimilation Angle Coefficient
ξ	0.02	Total Cost of Empire = Cost of Imperialist + Zeta * mean(Cost of All Colonies)
Uniting Threshold	0.02	The percent of Search Space Size, which enables the uniting process of two Empires

۶- تحلیل اجزای محدود ماشین Finite Elements Analysis and Experimental Study

شبیه سازی اجزای محدود ماشین طراحی بهینه با استفاده از نرم افزار Maxwell انجام شده و توزیع دوبعدی خطوط شار و چگالی شار مغناطیسی در اشکال (۹-۱۰) نشان داده شده است.

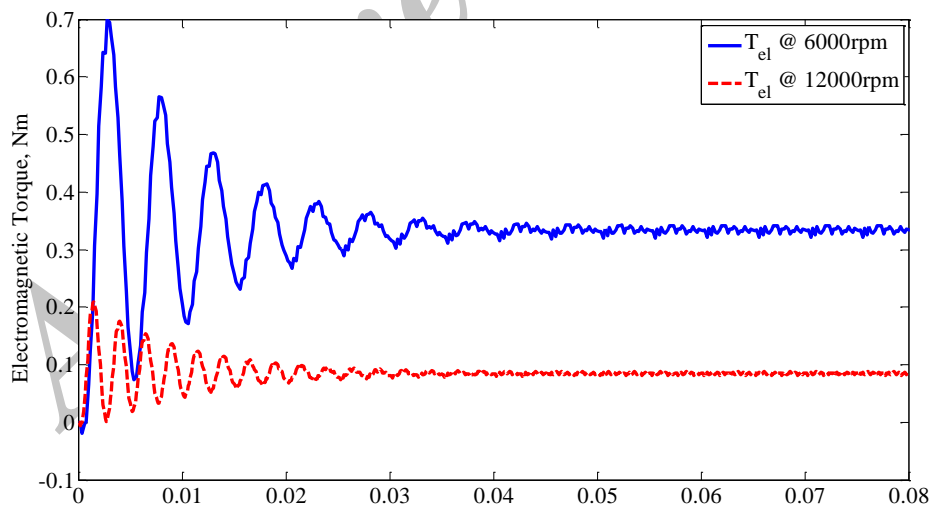


شکل (۹): توزیع دو بعدی خطوط شار مغناطیسی در موتور



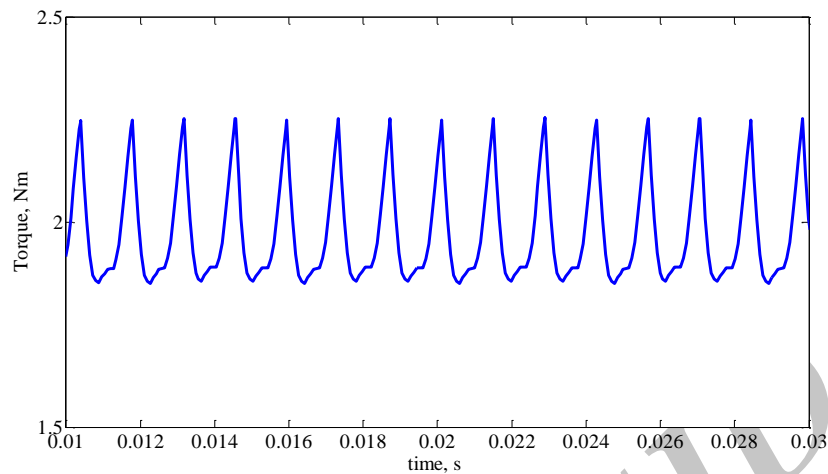
شکل (۱۰): توزیع دو بعدی چگالی شار مغناطیسی در موتور

در شکل (۱۱) شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی ماشین بهینه در سرعت‌های ۶۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده که دارای دامنه نوسان بسیار کم و تغییرات نرم است.



شکل (۱۱): گشتاور الکترومغناطیسی ماشین بهینه در سرعت‌های ۶۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه

در شکل (۱۲) شکل موج های گشتاور قطعات آهنربای دائم در سرعت ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، دامنه نوسانات گشتاور بدلیل شکل خاص و بهینه این قطعات، کاهش بسیار قابل توجهی یافته است.



شکل (۱۲): گشتاور قطعات آهنربای دائم در سرعت ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور دستیابی همزمان به مزایای هر دو ماشین هیستریزس و PM یک ساختار ترکیبی موتور سنکرون هیستریزس-PM پیشنهاد گردید. در روند طراحی بهینه این ماشین، از مدل‌های مدار معادل الکتریکی و یک موتور سرعت بالا و الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری برای داشتن مشخصه‌های عملکردی مناسب نظیر افزایش نسبت توان به حجم ماشین، بازده و ضریب توان و همزمان کاهش اینرسی، حجم و نوسانات سرعت استفاده شده است. صحت عملکرد ماشین بهینه طراحی شده نیز به کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود 2D اثبات گردیده است. ملاحظه شد، گشتاور الکترومغناطیسی موتور که کمیتی مهم برای کاربرد موتور هیستریزس در ژيروسکوپ است، ضمن داشتن دامنه نوسات گشتاور بسیار پائین، افزایش قابل توجهی در مقایسه با ساختارهای معمول موتور هیستریزس دارد.

مراجع

References

- M. A. Copeland and G. R. Slemon, "An analysis of the hysteresis motors: I—Analysis of the idealized machine," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-82, no. 65, pp. 34–42, Apr. 1963
- M. A. Copeland and G. R. Slemon, "An analysis of the hysteresis motors: II-The Circumferential-Flux Machine," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-83, no. 6, pp. 619-625, June 1964.
- S. D. T. Robertson, and S. Z. G. Zaky, "Analysis of the hysteresis machine- Part I," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, no.4, pp. 474 483, Apr. 1969.
- S. Miyari, T. Kataoka, "A basic equivalent circuit of the hysteresis motor" J. Inst. Electr. Eng. Jpn., 1965, 85, (10), pp. 1740–1748
- R. Nasiri-zarandi, M. Mirsalim, "Analysis and Torque Calculation of an Axial Flux Hysteresis Motor Based on Hyperbolic Model of Hysteresis Loop in Cartesian Coordinates," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 7, January 2015.
- R. Nasiri-zarandi, M. Mirsalim, "Finite Element Analysis of an Axial Flux Hysteresis Motor Based on Complex Permeability Concept Considering the Saturation of the Hysteresis Loop," IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), March 2015.



- J. Mariusz, T. Garbiec, and M. Kowol, "Design of High-Speed Hybrid Hysteresis Motor Rotor Using Finite Element Model and Decision Process," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 2, pp. 861-864, Feb. 2014.
- M. Repetto, and P. Uzunov, "Analysis of Hysteresis Motor Starting Torque Using Finite Element Method and Scalar Static Hysteresis Model," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 5, pp. 2405-2408, May 2013.
- J. J. Lee, Y. K. Kim, S. H. Rhyu, I. S. Jung, S. H. Chai, and J. P. Hong, "Hysteresis Torque Analysis of Permanent Magnet Motors Using Preisach Model," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 2, pp. 935-938, Feb. 2012.
- S. K. Hong, H. K. Kim, H. S. Kim, and H. K. Jung, "Torque calculation of hysteresis motor using vector hysteresis model," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 4, pp. 1932-1935, July 2000.
- H. Y. Lee, S. Y. Hahn, G. S. Park, and K. S. Lee, "Torque computation of hysteresis motor using finite element analysis with asymmetric two dimensional magnetic permeability tensor," IEEE Trans. Magn., vol. 34, no. 5, pp. 3032-3035, Sept. 1998.
- K. R. Rajagopal, "Design of a compact hysteresis motor used in a gyroscope," IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 5, pp. 3013-3015, 2003.
- G. Wakui, "Optimum conditions in design of hysteresis motor," Elect. Eng. Jpn, vol. 86, pp. 95-105, 1966.
- M. A. Rahman, "Combination Hysteresis Reluctance Permanent Magnet Motor," U.S. Patent 5 187 401, Feb. 16, 1993.
- J. Qian and M. A. Rahman, "Analysis of field oriented control for permanent magnet hysteresis synchronous motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, pp. 1156-1163, Nov./Dec. 1993.
- M. A. Rahman, A. M. Osheiba, T. A. Little, and G. R. Slemon, "Effects of samarium cobalt permanent magnet on the performance of polyphase hysteresis-reluctance motors," IEEE Trans. Magn., vol. MAG-20, pt. 2, pp. 1765-1767, Sept. 1984.