

# طراحی بهینه یک موتور هیبرید آهنربای دائم-هیسترزیس 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

## دكتر مجتبى نجفى

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

## چکیدہ

عیب اساسی موتورهای هیسترزیس که برای کاربردهای خاص دور بالا استفاده می شوند جریان مغناطیس کنندگی بالا، ضریب توان پائین و بازده کم می باشد. از طرفی موتورهای PM که امروز بطور وسیعی استفاده می شود و دارای مزایای بازده بالا، ضریب توان بالا و پایداری نسبی بالاتر در سرعت سنکرون هستند از مشکل نداشتن گشتاور راه اندازی و نوسانات گشتاور و سرعت رنج می برند. لذا در این مقاله، برای غلبه بر مشکل موتورهای هیسترزیس و PM و ایجاد یک مصالحه بین مزایا و معایب این نوع موتورها، یک ساختار ترکیبی تحت عنوان موتور ترکیبی سنکرون هیسترزیس-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 بهینه سازی رقابت استعماری برای داشتن مشخصههای عملکردی مناسب طراحی می شود. صحت عملکرد ماشین بهینه طراحی شده نیز به کمک

**واژگان کلیدی:** موتور ترکیبی سنکرون هیسترزیس-PM، بهینهسازی، آلگوریتم رقابت استعماری، آنالیز اجزای محدود 2D

www.SID.ir

### ۱– مقدمه

موتور هیسترزیس بطور وسیع در کاربردهای بسیاردقیق، سرعت بالا و با توان نسبتاً پائین استفاده می شود. این موتورها نه تنها دارای ساختاری ساده شامل یک سیم پیچی استاتور سه فاز متداول و یک رینگ رتور بدون شیار است بلکه دارای گشتاور راهاندازی مناسب نیز می باشد. عدم وجود شیارهای روتور سبب عملکرد با نویز پائین شده و موتور را برای کاربردهایی با گشتاور ثابت، سرعت ثابت و عملکرد نرم مناسب می سازد. اما این موتور از جریان مغناطیس کنندگی بالا، ضریب توان پائین و بازده کم بخاطر تلفات بالا رنج می برد. همچنین این موتور دو مشکل برای بکارگیری در درایوهای با دقت بالا نظیر ژیروسکوپها 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 هیسترزیس مانند روش مدل هایپربولیک لوپ هیسترزیس، 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 روش های تحلیلی هدوگدون و پریساچ و تقریبهای مختلف اعم از مستطیل، متوازی الاضلاع، بیضی و ... برای مدلسازی لوپ هیسترزیس رینگ هیسترزیس این نوع موتورها بوده است. بررسی ساختارهای شعاعی و محوری موتورهای سنکرون هیسترزیس 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 ژیروسکوپها، استفاده از ساختارهای شار شعاعی اجتناب نایذیر می باشد. یکی از ایدههای که به منظور رفع معایب موتور سنکرون هیسترزیس 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 می گردد. لذا بنظر میرسد با ارائهی ساختارهای ترکیبی کاربردی و در عین حال ساده برای رتور موتورهای PM و هیسترزیس بتوان به مصالحهای قابل قبول بین مزایا و معایب این دو موتور دست یافت. ایدهی موتور ترکیبی هیسترزیس 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 می شود(Jagiela et al, 2014). اما با این حال هنوز هم ارائه ساختارهای ترکیبی از جمله ترکیب PM و هیسترزیس، 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 هیسترزیس-PM ، طراحی بهینه موتور برای داشتن مزایای کاربردی هر دو ماشینPM و هیسترزیس انجام میشود. در روند طراحی این ماشین، از مدلهای مدار معادل الکتریکی استفاده شده و یک موتور سرعت بالا با استفاده از الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری برای داشتن مشخصههای عملکردی مناسب طراحی می شود. صحت عملکرد ماشین بهینه طراحی شده به کمک شبیه سازی اجزاء محدود <sup>(2</sup>D) اثبات می شود.

International Conference on Engineering &

UAE - DUBAI

**Applied Sciences** 

10 March 2016

<sup>1</sup> Finite Elements Model



## ۲- معرفی ساختار جدید موتور

ترکیب مواد PM و هیسترزیس در رتور مزایای بسیاری نسبت به موتورهای PM یا هیسترزیس دارد. در عملکرد القایی تا پیش از رسیدن به سرعت سنکرون، گشتاور موتور شامل گشتاور هیسترزیس، فوکو و گشتاور نوسانی PM است. در سرعت سنکرون، گشتاورهای PM و هیسترزیس، گشتاور موتور را ایجاد میکنند. اثر منفی گشتاور ترمزی PM توسط گشتاور جریان فوکو بویژه گشتاورهای PM و هیسترزیس، گشتاور موتور را ایجاد میکنند. اثر منفی گشتاور ترمزی PM ما توسط گشتاور جریان فوکو بویژه در ابتدای راهاندازی جبرانسازی می موتور ما یما کشتاور می کشتاور ترمزی PM ما ست. در سرعت سنکرون، گشتاور موتور را ایجاد میکنند. اثر منفی گشتاور ترمزی PM ما درون شیارهایی در فضای بین رینگ در ابتدای راهاندازی جبرانسازی میشود. در طرحهای معمول موتور ترکیبی، PM ها درون شیارهایی در فضای بین رینگ هیسترزیس 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 می یابد ضمن اینکه امکان افزایش تعداد قطبها نیز کمتر شده و گشتاور دندانه ای تولیدی PM ها سبب بر هم خوردن ویژگی عملکرد نرم موتور هیسترزیس میشود. افزایش تعداد قطبها نیز کمتر شده و گشتاور دندانه ای تولیدی PM ها سبب بر هم خوردن ویژگی عملکرد نرم موتور هیسترزیس میشود. افزایش تعداد مول مامل کشتاور دندانه ای تولیدی و کند شده و گشتاور دندانه ای تولیدی می 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 هیسترزیس استفاده شده است. شکل قطعاتPM 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 بر هم خوردن مزیت راه اندازی موتور هیسترزیس شده و حتی می تواند سبب قفل شدن موتور در لحظه راه اندازی 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 ذوزنقهای می ساختار شیاربندی شده استان گشتاور نیز بدلیل هارمونیکهای فضایی ناشی از اساختار شیاربندی شده استاتور است. از طرف دیگر، بدلیل سینوسی بودن جریان، نوسانات گشتاور بدلیل شکل موج ذوزنقهای مریان 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 می شود. برای حل این مشکل شکل قطعات آهنربایی به گونه ای انتخاب شده تا حداقل گشتاور روکتانسی و دندانهای را داشته باشد. بدین ترتیب علاوه بر بهبود نوسانات در لحظه راه اندازی، عملکرد کلی موتور در حالت ماندگار نیز نرم تر و با نوسانات گشتاور می شود در حال این مشکل شکل قطعات آهنربایی به گونه ای انتخاب شده تا حداقل گشتاور ماندگار نیز نرم تر و با نوسانات کمتری همراه است. لازم به ذکر است که وجود لایه نازی، 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 ماندگار نیز نرم تر و با نوسانات کمتری همراه است. لازم به ذکر است که وجود لایه نازکی از جنس هادی بر روی رینگ ماندگار نیز نرم تر و با نوسانات کمتری همراه است. لازم به ذکر است که وجود لایه نازکی از جنس هادی بر روی رینگ ماندگار نیز نرم تر و با نوسانات کمتری همراه است. لازم به ذکر است که وجود لایه نازکی از جنس هادی بر روی رینگ ماندگار نیز نرم تر و بازی از روی و تا پیش از رسیدن به حالت ماندگار و سرعت ماندگار نیز نرم تر و بازی موتورهای هیسترزیس، هریزیس، موسود کنیم. همچنین، با توجه به ساختار جدید ماشین و پیچیدگی ذاتی در مدلسازی موتورهای هیسترزیس،

(٣)

كنغرانس بين المللى مهندسی و علوم کاربردی

**1-۲: 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:

 $S = C n D_{si}^2 \ell_{fe}$ Electromagnetic utilization

International Conference on Engineering &

**Applied Sciences** UAE - DUBAI

10 March 2016

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_w AB_{ag} \tag{1}$$

، در اینجا n ،  $K_w$  ، ارگذاری الکتریکی، بارگذاری مغناطیسی،  $\ell_{fe}$  ،  $D_{si}$  ،  $D_{si}$  ، A ،  $K_w$  ، n اینجا شار مغناطیسی، میباشد.

برای افزایش توان خروجی یک موتور، هم میتوان سرعت را افزایش داد و هم چگالی شار و بارگذاری الکتریکی. بخاطر اشباع هسته، دامنه چگالی شار فاصله هوایی B<sub>ag</sub> نمی تواند بیشتر از یک تسلا شود. بارگذاری الکتریکی را میتوان با افزایش جریان استاتور یا تعداد هادیها افزایش داد اما این به معنای افزایش تلفات در استاتور است. همچنین، بارگذاری الکتریکی بالا، تنها برای یک سیستم خنک کنندگی 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:

	Low-Speed	High-Speed			
Parameter					
	Motor Quantity	Motor Quantity			
Torque	40.5 Nm	12 Nm			
Speed	1000rpm	24000 rpm			
A 145 A/Cm		225 A/Cm			
Βδ 0.65 Τ		0.7 T			
Dsi	154 mm	90 mm			
ℓFe	175 mm	90 mm			
Kw	0.933	0.933			
C	1 KVA min/m3	1.7 KVA min/m3			
Pout	4.24 kw	30 kw			
Cooling	Water jacket	Self cooling without fan			

جدول (۱): مقایسه مقادیر موتورهای سرعت یایین و بالا تحت تأثیر افزایش C

افزایش سرعت موتور باعث افزایش تلفات آهن، اصطکاک و تلفات اضافی شده و باید A و Bδ و در نتیجه C کاهش یابد. (٢)

$$C \alpha AB_{\delta} \alpha \frac{1}{n^{1.6}}$$

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

$$log n = 4.27 - 0.275 log P$$
,..... $n[Hz], P[w]$ 

بنابراین گشتاور تولیدی موتور تا حدود زیادی به ابعاد و توان خروجی به سرعت وابسته است. در صورتي كه وزن مس، وزن آهن، ابعاد موتور، گشتاور، چگالي جريان، تلفات اهمي، شار مغناطيسي در دو موتور يكسان باشد، ولتاژ القایی در طرح ۲، دو برابر طرح ۱ و توان و سرعت آن نصف می شود. پس در سرعت بالابرای رسیدن به توان بالاتر از طرح ۱ استفاده میکنیم اما با توجه به کم شدن دامنه هارمونیکهای 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.



www.SID.ir

امارات - دبی ۲۰ اسفند ۹۴

International Conference on Engineering & Applied Sciences UAE - DUBAI 10 March 2016

> 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 روتور یکپارچه و روتور ورقه ورقه وجود دارد. بنابراین آهنرباهای سطحی قطعه این روتور 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 ماشینهای آهنربایی، روتور با PM سطحی، Lh کمتری نسبت به IPM دارد، پس برای بهبود .P.Fد ساختار پیشنهادی MSPMHM، بایستی از طرحهای IPM استفاده نمود. از سوی دیگر، در سرعتهای بالا از یک بانداژ کربن یا فایبرگلاس برای نگه داشتن آهنرباهای سطحی استفاده می شود. بدلیل نیروهای سانتریفیوژ متفاوت در محل آهنربا و فاصله هوایی بین آنها، لبههای PM در بانداژ فیبر کربن نفوذ می کنند که در صورت IPM بودن روتور 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،  $L_{\sigma}$  شامل اندوکتانس نشتی شیار، اندوکتانس نشتی و end winding و اندوکتانس نشتی هارمونیک است.

$$L_{m} = \mu_{0} (N_{sw} k_{w1})^{2} \frac{2m}{\pi^{2} P} \frac{\tau_{p} \ell_{fe}}{g_{re}}$$

$$g_{re} = g + h_{band} + h_{PM}; \tau_{p} = \frac{x D_{si}}{2P}$$

$$\omega_{s} N_{sw} k_{w1} \frac{2}{\pi} \tau_{p} \ell_{fe} B_{g,h=1} = BEMF$$
(Y)

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

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



جدول (۲): نحوه محاسبه اندوکتانسهای نشتی

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:

$$K_{M} = \frac{2P}{\pi} (1 - \frac{D_{ri}}{D_{ro}}): flux concentration factor$$

$$B_{ag} = \frac{B_{res}}{\frac{1}{K_{M}} + \frac{2g\mu_{M}}{\mu_{0}h_{M}}}; \mu_{M} \simeq \mu_{0}, h_{M}: thickness of PM$$
(9)

یکی از معایب اصلی ماشینهای PM، نوسانات گشتاور است که به طراحی آنها بر میگردد. 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 ما و برخوردار است. یکی از قسمت های اصلی این نوسانات گشتاور، گشتاور دندانهای است که در اثر عکس العمل بین PM ها و شیارهای استاتور بوجود می آید.





فرکانس گشتاور دندانهای برابر nNss بوده و دامنه آن از رابطه زیر محاسبه می شود:

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

# ۳-۲: مدار معادل ماشین سنکرون هیسترزیس

درحالت دائم، موتور هیسترزیس دارای مدار معادلی به شکل(۵)می باشد.

شکل(۵): مدار معادل پیشنهادی موتور سنکرون هیسترزیس

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

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

 $i_a(t) = \hat{I}\sin\omega t \tag{17}$ 

# نیروی محرکه مغناطیسی کل و گشتاور ناشی از جریان سه فاز در زاویه heta برابرخواهد بود با:

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

$$\tau_s = \frac{3}{4} N_{sw} I_{max} \sin(\omega t - \theta)$$
(17)

www.SID.ir

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

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

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

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

$$J = \frac{2}{\pi} \frac{k - \binom{2}{k}}{\cos \beta}$$
(15)
$$c = \frac{1}{k} \frac{k - \binom{2}{k}}{\cos \beta}$$

$$k = \frac{3\sqrt{2}N_{sv}\,\mathbf{I}_{max}}{4r_h\,H_c} \tag{1V}$$

اندوکتانسهای Lg و Lp ،Lo نیز ازروابط زیربدست میآیند؛ در اینجا روابط محاسبه پارامترهای مدار معادل برحسب متغیرهای ابعادی و سیم پیچی، مشخصات الکتریکی و مغناطیسی آورده شده است:

$$\begin{split} L_{g} &= \frac{3\pi}{8} \frac{N_{SW}^{2} \mu_{o} r_{g} l}{g_{e}} \quad [H] \\ L_{o} &= \frac{3\pi}{8} \frac{N_{SW}^{2} \mu_{o} \mu_{ro} t_{r} l}{r_{h}} \quad [H] \\ L_{p} &= \frac{3\pi}{8} \frac{N_{s}^{2} \mu_{o} \mu_{p} t_{r} l}{r_{h}} \quad [H] \end{split}$$
(1A)

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

$$R_{h} = \frac{12f(K_{wl}N_{sw})^{2}t_{r}(R_{o}-R_{i})K_{sf}B_{ag.max}}{1000R_{av}H_{g}} \quad [\Omega]$$
(19)

که اندوکتانس 
$$L_h$$
از رابطه زیر بدست میآید:

$$L_{h} = \frac{X_{h}}{\omega} = \frac{R_{h}}{\omega \tan \beta} \quad [H]$$
(Y•)

مقاومت Re که در شرایط آسنکرون جریانهای گردابی از آن عبور مینماید و سبب ایجاد گشتاور القایی میشود از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$\mathbf{R}_{e} = \frac{12\rho\ell_{h}}{10^{4}A_{h}} \quad [\Omega]$$

در مدار معادل فوق، مقاومت و راکتانس پراکندگی استاتور نیز به ترتیب از رابطه ذیل قابل محاسبهاند [۶]  

$$R_{c} = \frac{0.001L_{ph}}{\sigma q_{h}} [\Omega] (YY)$$

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

$$xls = \omega Lls = Xslot + Xbelt + Xend [\Omega / ph] (YY)$$

$$T_{c} = 3L_{\eta} (\frac{4r_{h}H_{c}}{3\sqrt{2}N_{sw}})^{2}Jk\sin\beta (YF)$$

$$T_{c} = 3L_{\eta} (f\omega)$$

$$T_{c} = 4L_{\mu} (f\omega) [I_{\mu}(f\omega)] (YF)$$

$$T_{c} = 4L_{\mu} (f\omega) [I_{\mu}(f\omega)] [$$

متغیرهای بهینهسازی موتور با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر در جدول (۳) لیست شدهاند. سایر متغیرهای ابعادی توابعی از متغیرهای طراحی هستند:

•		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	
	#	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	αpm	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	Р	Number of pole pairs

# **جدول** (۳): متغیرهای بهینهسازی موتور







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 می گردد. 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 می شود. 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:

$$OF(x) = \frac{\eta^{n_1} (P.F.)^{n_2}}{(J)^{k_3} (vol)^{k_4} (\Delta \omega)^{k_5}}$$
(\vec{r})

در این رابطه x بردار متغیرهای بهینهسازی بوده و ki (i=1...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.

•4

 $(\mathbf{n}^{1})$ 

$$J = \gamma \ell \frac{(D^* - d^*)\pi}{32}; \quad \gamma: weight \, density \tag{(71)}$$

Torsion resonance frequency: 
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C \frac{J_M + J_L}{J_M J_L}}$$
 (77)

بایستی توجه داشت که فرکانس نوسانات گشتاور نباید f0 را تحریک کند. همچنین، نوسان گشتاور محور بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

(٣٣)

(٣۴)

$$T_{sh}(t) = \frac{\tau_{\max}}{J_{u}} \frac{C}{\omega^2 - \omega^2} \sin(\omega t)$$

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 
$$\alpha \frac{\tau_{\max}}{(2\pi)^2 k p n^2 J_M} (1 - \frac{C/J_M}{\omega_0^2 - \omega^2})$$

در اینجا، k هارمونیک kام گشتاور فاصله هوایی میباشد.

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

## ۴-۳: محدودیتهای بهینه سازی

محدودیتهای در نظر گرفته شده شامل محدودیتهای ساخت، مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی و جنبههای عملکردی است که عبارتند از: چگالی جریان در استاتور<sup>(</sup>/ چگالی شار در دندانههای استاتور<sup>۲</sup>/ ضریب پرشدگی شیار استاتور<sup>۲</sup>/ حداقل عرض دندانه استاتور<sup>۴</sup>/ حداقل دهانه شیار استاتور<sup>۵</sup>/ نسبت ارتفاع-عرض شیار استاتور<sup>\*</sup>/ حداکثر سرعت خطی رتور در صورت EPM بودن رتورهای <sup>۷</sup>PM/ حداقل قطر محور<sup>۸</sup> محدودیتهای قطر و طول و وزن<sup>۹</sup>/ حداقل ابعاد طول و عرض و ضخامت آهنربا<sup>۱۰</sup>/ حداکثر سرعت خطی<sup>۱۱</sup>

## ۴-۴: الگوریتم بهینه سازی

آلگوریتم رقابت استعماری برمبنای تکامل سیاسی و اجتماعی انسان پایه گذاری شده است. این آلگوریتم همانند سایر روشهای بهینه سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع می شود. در این آلگوریتم، هر عنصر جمعیت، یک "کشور" نامیده می شود. کشورها به دو دسته "مستعمره" و "استعمار گر" تقسیم می شوند. هر استعمار گر، 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 آلگوریتم را تشکیل می دهد. مطابق سیاست جذب که به صورت تاریخی توسط کشورهای استعمار گری همچون فرانسه و انگلیس در مستعمراتشان اعمال می شد، کشورهای استعمار گر با استفاده از روشهایی 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 آلگوریتم، این سیاست با حرکت دادن مستعمرات یک امپراطوری، مطابق یک رابطه خاص صورت می پذیرد. اگر در حین حرکت نسبت به استعمار گر به موقعیت بهتری برسد، جای آندو با هم عوض می شوند. در ضمن، قدرت کل یک امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمار گر به اضافه درصدی از قدرت میانگین مستعمرات آن تعریف می شود. یعنی:

 $T.C.n = \text{Cost}(imperialist_n) + \xi \times mean\{\text{Cost}(coloniesofempire_n)\}$ 

 $(\[mathbb{T}\]\]$ 

<sup>1</sup> Current density in the stator

<sup>2</sup> Flux density in the stator cogging

<sup>3</sup> Filling factor of stator slot

<sup>4</sup> The minimum width of the stator tooth

<sup>5</sup> At least stator slot openings

<sup>6</sup> Height/width ratio of stator slot

<sup>7</sup> The maximum linear speed of the rotor (in case of PM rotor to be EPM).

<sup>8</sup> The minimum diameter of the shaft.

<sup>9</sup> The diameter, length and weight constraints.

<sup>10</sup> The minimum dimensions of length, width and thickness of the magnet.

<sup>11</sup> The maximum linear speed (  $\upsilon_{lin} {=} 2\pi rn (m/s)$  )



در طی رقابت استعماری که بخش مهم دیگری از آلگوریتم 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 آلگوریتم رقابت استعماری با رسیدن به نقطه بهینه تابع هدف، متوقف میشود. شکل (۲) آلگوریتم آن را نشان میدهند.



شکل(۷):آلگوریتم روش بهینهسازی رقابت استعماری

فلوچارت روند بهینه سازی 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 آلگوریتم رقابت استعماری مطابق جدول (۴) انتخاب شده اند:

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

### جدول (۴): مقادیر پارامترهای ICA

۶- تحليل اجزاي محدود ماشينFinite 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 (۱۰–۹) نشان داده شده است.



شکل(۹): توزیع دو بعدی خطوط 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.





#### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور دستیابی همزمان به مزایای هر دو ماشین هیسترزیس و PM یک ساختار ترکیبی موتور سنکرون هیسترزیس-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 هیسترزیس در ژیروسکوپ است، ضمن داشتن دامنه نوسات گشتاور بسیار پائین، افزایش قابل توجهی در مقایسه با ساختارهای معمول موتور هیسترزیس 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 onElectrical 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," IEEETrans. 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 PreisachModel," 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. 1156-1 163, 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. Mngn., vol. MAG-20, pt. 2, pp. 1765-1767, Sept. 1984.