



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Analytical Design and Power Density Assessment of Slotted Double-Sided AFPM Disc Motors**

Anvari-Moghaddam, Amjad; Lesani, Hamid

*Published in:*  
Proceedings of the 5th Conference on Rotating Equipment in Oil & Power Industries

*Publication date:*  
2014

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Anvari-Moghaddam, A., & Lesani, H. (2014). Analytical Design and Power Density Assessment of Slotted Double-Sided AFPM Disc Motors. In *Proceedings of the 5th Conference on Rotating Equipment in Oil & Power Industries* (pp. 1-10)

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

## **Analytical Design and Power Density Assessment of Slotted Double-Sided AFPM Disc Motors**

### **Abstract**

Since wise selection of Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) motors with high power and torque densities is an important factor, this paper presents a comparative study on power densities of two slotted double-sided AFPM motors. In this regard, two different topologies including one-stator-two-rotors (TORUS) and one-rotor-two-stators (AFIR) are introduced as case studies. To evaluate the power densities of the mentioned structures, the general purpose sizing equations along with the analytical design equations of corresponding motors are presented. Field analysis of both Topologies of slotted motors is investigated using Finite Element method (FEM) software. Considering the optimum designs of related topologies, performances of the AFPM motors are evaluated via different working situations and the operating results are shown subsequently.

**Keywords:** PM motors, axial flux machine, power density, Finite Element method.

## طراحی تحلیلی و ارزیابی چگالی توان موتورهای مغناطیس دائم شار محور دیسکی شکل با ساختار دو وجهی شیاردار

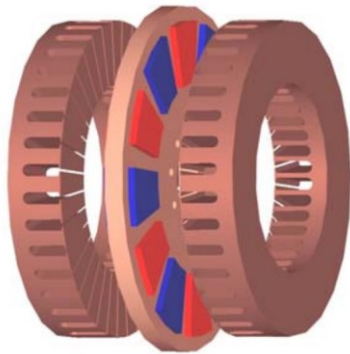
### چکیده

از آنجاییکه انتخاب یک موتور مغناطیس دائم شار محور با چگالی توان و گشتاور بالا در در صنایع مختلف اعم از نظامی، حمل و نقل، نفت و نیرو حائز اهمیت است، لذا انجام یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای در خصوص توان استحصالی از ساختارهای مختلف این نوع از موتورها مورد نیاز است. در این مقاله، چگالی توان دو گونه از موتورهای مغناطیس دائم شار محور با ساختار دووجهی شیاردار یکی از نوع استاتور میانی (TORUS-S) و دیگری از نوع روتور میانی (AFIR-S) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا ابتدا به ارائه معادلات تحلیلی و روابط مربوط به تعیین ابعاد موتورهای مربوطه پرداخته می‌شود و سپس با توجه به طرح بهینه از ساختارهای موجود، عملکرد آنها بر مبنای شرایط کاری مختلف مقایسه می‌گردد. در خاتمه، با قیاس نتایج تحلیلی بدست آمده با نتایج حاصل از آنالیز المان محدود دو بعدی ساختارهای مزبور، ضمن صحت‌سنجی محاسبات، یک موتور مغناطیس دائم شار محور دو وجهی شیاردار با چگالی توان بالا معرفی می‌گردد.

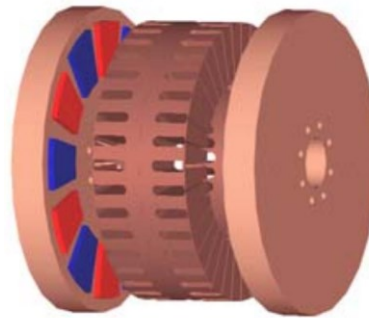
واژه‌های کلیدی: چگالی توان، ساختار شیاردار دو وجهی، موتور مغناطیس دائم شار محوری، آنالیز المان محدود.

## مقدمه

موتورهای مغناطیس دائم شار محور با ساختار دووجهی جزء پرکاربردترین موتورهای AFPM<sup>1</sup> در صنایع مختلف نظیر حمل و نقل، نفت و نیرو می‌باشند. این موتورها که معمولاً از نوع سنکرون می‌باشند به لحاظ ساختاری مشتمل بر دو نوع بدون شیار و شیاردار هستند، که نوع شیاردار آنها خود می‌تواند از دو توپولوژی به صورت تک استاتور و دو روتور (TORUS-S) و یا دو استاتور و تک روتور (AFIR-S) مطابق شکل ۱ تشکیل شده باشد [۱-۳].



شکل ۱- (ب) ساختار روتور داخلی - استاتور بیرونی



شکل ۱- (الف) ساختار استاتور داخلی - روتور بیرونی

شکل ۱- انواع ساختارهای موتورهای مغناطیس دائم شار محوری شیاردار

در اینجا باید اشاره کرد که انتخاب طرح مناسبی از موتور AFPM دو وجهی، به خصوص در مواردی که هدف کاربر راندمان مناسب، چگالی توان و گشتاور بالا و در عین حال طول محوری کم می‌باشد، پارامتر بسیار مهمی است. بنابراین به نظر می‌رسد قیاس چگالی توان در انواع مدل‌های ساختاری این موتورها ضروری می‌باشد [۴]. همچنین باید توجه داشت در محاسبه چگالی توان پارامتر طول فاصله هوایی بسیار مؤثر می‌باشد چراکه با تغییر این طول، چگالی توان به صورت غیر یکنواخت در ساختارهای مختلف تغییر می‌کند و در انتخاب طرح برتر نقش تعیین کننده‌ای را ایفا می‌نماید [۵].

## معادلات طراحی موتور AFPM

بطور کلی چنانچه از اندوکتانس و مقاومت نشت صرف نظر گردد، توان خروجی برای هر موتور الکتریکی به صورت زیر می‌باشد [۶]:

$$P_{out} = \eta(m/T) \int_0^T e(t) i(t) dt = \eta m K_p E_{pk} I_{pk} \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $e(t)$  و  $E_{pk}$  به ترتیب به  $emf$  تک‌فاز فاصله هوایی و مقدار بیشینه آن اشاره دارند. مشابهاً  $i(t)$  و  $I_{pk}$  مقادیر جریان هر فاز و ماکزیمم آن‌را نشان می‌دهند،  $T$  دوره تناوب شکل موج  $emf$  تعداد فازهای ماشین و  $\eta$  راندمان آنرا را بیان می‌کند. یکی از عوامل مؤثر در شکل موج  $emf$  نحوه سیم بندی می‌باشد که با ضریب سیم پیچی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بطور مشابه فاکتور  $K_p$  در معادله توانی ماشین عبارت است از:

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T (e(t) i(t)) / (E_{pk} I_{pk}) dt = (1/T) \int_0^T f_e(t) f_i(t) dt \quad (2)$$

<sup>1</sup> Axial Flux Permanent Magnet

که  $f_i(t) = i(t) / I_{pk}$  و  $f_e(t) = e(t) / E_{pk}$  به ترتیب عبارت‌هایی برای شکل موج‌های ولتاژ و جریان نرمالیزه شده می‌باشند. برای نشان دادن اثر شکل موج جریان، فاکتور شکل موج جریان ( $K_i$ ) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$K_i = (I_{pk} / I_{rms}) = \left( (1/T) \int_0^T (i(t) / I_{pk})^2 dt \right)^{-1/2} \quad (3)$$

که  $I_{rms}$  بیانگر میزان مؤثر جریان فاز است و به نحوه بارگذاری الکتریکی استاتور مربوط می‌گردد. مقدار بیشینه emf فاصله هوایی در رابطه (۱) عبارتست از:

$$E_{pk} = K_e N_{ph} B_g (f/p) (1 - \lambda^2) D_o^2 \quad (4)$$

که  $K_e$  فاکتور emf،  $N_{ph}$  تعداد دورهای سیم‌پیچی در هر فاز،  $B_g$  چگالی شار فاصله هوایی،  $f$  فرکانس مبدل،  $p$  تعداد جفت قطب‌های موتور،  $\lambda$  نسبت قطر داخلی ( $D_i$ ) به قطر خارجی موتور ( $D_o$ ) می‌باشد. جریان حداکثر فاز در رابطه (۱) نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_{pk} = K_i A \pi ((1 + \lambda) / 2) (D_o / (2m_1 N_{ph})) \quad (5)$$

که  $m_1$  تعداد فازهای هر استاتور و  $A$  بار گذاری الکتریکی موتور می‌باشد. با تلفیق معادلات (۱) تا (۵) شکل کلی معادله توانی برای موتور AFPM به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$P_{out} = (m / m_1) (\pi / 2) K_e K_i K_p \eta B_g A (f/p) (1 - \lambda^2) ((1 + \lambda) / 2) D_o^3 \quad (6)$$

همچنین چگالی توان موتور برای کل حجم آن مطابق رابطه ذیل بدست می‌آید [۷]:

$$P_{den} = P_{out} / ((\pi / 4) D_{tot}^2 L_{tot}) \quad (7)$$

که  $D_{tot}$  قطر کلی خارجی ماشین است و شامل قطر خارجی پشته ماشین و برجستگی‌های انتهایی سیم‌پیچ‌ها در جهت شعاعی می‌باشد. بطور مشابه  $L_{tot}$  نشانگر طول محوری موتور است.

#### معادلات طراحی تحلیلی موتور TORUS-S

بر اساس معادله کلی طراحی موتورهای AFPM که در بخش قبل بدست آمد، برای ساختار TORUS نوع شیاردار می‌توان قطر خارجی را بصورت زیر نوشت [۸]:

$$D_o = \left( P_{out} / \left( (m / m_1) (\pi / 2) K_e K_i K_p \eta B_g A (f/p) (1 - \lambda^2) ((1 + \lambda) / 2) \right) \right)^{1/3} \quad (8)$$

قطر کلی خارجی ماشین عبارتست از:

$$D_{tot} = D_o + 2W_{cu} \quad (9)$$

که  $W_{cu}$  میزان برجستگی انتهایی سیم‌پیچ‌ها در جهت شعاعی را نشان می‌دهد و عبارتست از:

$$W_{cu} = \left( D_i - \sqrt{D_i^2 - (2AD_g / K_{cu} J_s)} \right) / 2 \quad (10)$$

که  $D_g$  قطر متوسط موتور،  $J_s$  چگالی جریان و  $K_{cu}$  ضریب اشغال شیار نام دارد. طول محوری ماشین عبارتست از:

$$L_e = L_s + 2L_r + 2g \quad (11)$$

که  $L_s$  طول محوری استاتور،  $L_r$  طول محوری روتور و  $g$  طول فاصله هوایی می‌باشد. طول محوری استاتور به نوبه خود از دو مؤلفه به شرح زیر تشکیل شده است:

$$L_s = L_{cs} + 2L_{ss} \quad (12)$$

که  $L_{cs}$  طول محوری هسته استاتور و  $L_{ss}$  عمق شیارهای استاتور می‌باشد و مطابق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$L_{cs} = (B_g \alpha_p \pi D_o (1 + \lambda)) / (B_{cs} 4p) \quad (13)$$

$$L_{ss} = (D_i - \sqrt{D_i^2 - (2AD_g / K_{cu} J_s)}) / 2 \quad (14)$$

در رابطه فوق  $B_{cs}$  چگالی شار هسته استاتور و  $\alpha_p$  نسبت چگالی شار میانگین فاصله هوایی به چگالی شار ماکزیمم آن است. طول محوری روتور ماشین نیز از دو مؤلفه‌ی طول محوری هسته روتور ( $L_{cr}$ ) و طول آهنربای دائم ( $L_{PM}$ ) مطابق شکل ۲ تشکیل شده است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

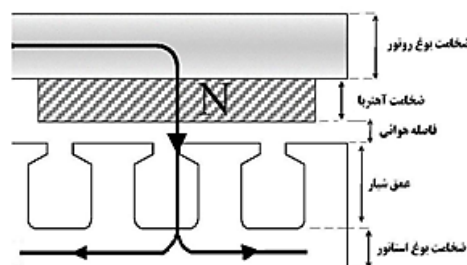
$$L_r = L_{cr} + L_{PM} \quad (15)$$

که:

$$L_{cr} = (B_u \pi D_o (1 + \lambda)) / (B_{cr} 8p) \quad (16)$$

$$L_{PM} = (\mu_r B_g K_c g) / (B_r - B_g K_f / K_d) \quad (17)$$

که  $B_u$  چگالی شار قابل حصول در سطح آهنرباها،  $B_r$  چگالی شار پسماند آهنربا،  $\mu_r$  نفوذپذیری نسبی آهنربا،  $K_d$  ضریب نشت شار،  $K_c$  ضریب کارتر برای شیارهای استاتور و  $K_f$  ضریب تصحیح ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی در جهت شعاعی دیسک روتور هستند. این ضرایب به‌طور معمول از آنالیز المان محدود موتور بدست می‌آیند.



شکل ۲- ابعاد ساختاری برای TORUS-S

### معادلات طراحی تحلیلی موتور AFIR-S

ساختار موتور مغناطیس دائم شار محور دوجبه‌ی شیاردار از نوع روتور میانی (AFIR-S) در مرجع [۹] به تفصیل بیان شده است. مشابه روند محاسباتی ارائه شده در بخش پیشین برای یک ماشین AFIR می‌توان گفت:

$$D_{tot} = D_o + 2W_{cu} \quad (18)$$

که میزان برجستگی انتهایی سیم‌پیچ‌ها در جهت شعاعی ( $W_{cu}$ ) عبارتست از:

$$W_{cu} = \left( D_i - \sqrt{D_i^2 - (AD_g / K_{cu} J_s)} \right) / 2 \quad (19)$$

طول محوری ماشین از ترکیب سه مؤلفه به صورت زیر تشکیل شده است:

$$L_e = 2L_s + L_r + 2g \quad (20)$$

که در آن طول محوری استاتور عبارتست از:

$$L_s = L_{cs} + L_{ss} \quad (21)$$

مؤلفه‌های سازنده طول محوری استاتور عبارتند از:

$$L_{cs} = (B_g \alpha_p \pi D_o (1 + \lambda)) / (B_{cs} 4p) \quad (22)$$

$$L_{ss} = \left( D_i - \sqrt{D_i^2 - (2AD_g / K_{cu} J_s)} \right) / 2 \quad (23)$$

که تعریف تمامی پارامترهای موجود در روابط فوق مشابه قبل می‌باشد. از آنجاییکه در ماشین‌های نوع روتور درونی هیچ‌گونه هسته‌ای برای روتور موجود نمی‌باشد لذا داریم:

$$L_r = L_{PM} \quad (24)$$

که:

$$L_{PM} = (2\mu_r B_g K_c g) / (B_r - B_g K_f / K_d) \quad (25)$$

#### ارزیابی چگالی توان موتورهای TORUS-S و AFIR-S

در این بخش مقایسه‌ای میان دو ساختار عنوان شده بر مبنای چگالی توان آنها صورت می‌گیرد. برای هر دو ساختار توان خروجی ۵ کیلووات، تعداد جفت قطب‌های استاتور برابر با ۴ و فرکانس مبدل ۶۰ هرتز در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها نیز به شرح جدول ۱ می‌باشند.

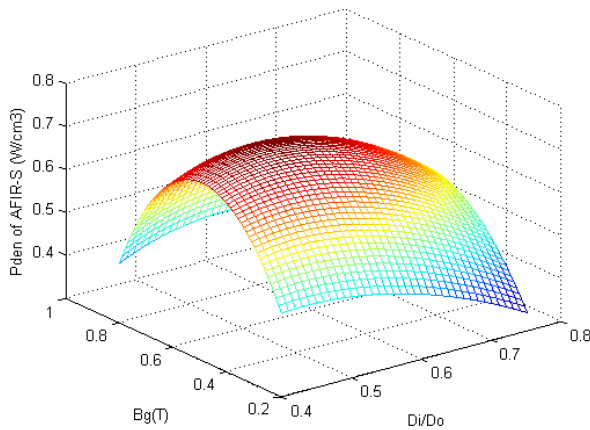
جدول ۱- سایر پارامترهای ساختاری موتورها

۳	تعداد فازها	$m$
۰/۸	ضریب اشغال شیار	$K_{cu}$
۰/۸	نسبت قوس قطب	$\tau_p$
۱	نسبت شیار بر قطب بر فاز	$n_{spp}$
۱/۵ تسلا	چگالی شار در هسته استاتور	$B_{cs}$
۱/۵ تسلا	چگالی شار در هسته روتور	$B_{cr}$
۱/۱ تسلا	چگالی شار پسماند آهنربا	$B_r$
۹۰ درصد	بازده	$\eta$

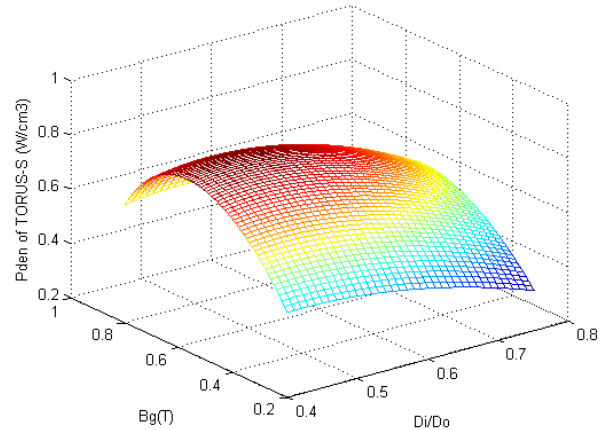
از آنجاییکه در موتورهای AFPM، چگالی شار فاصله هوایی ( $B_g$ ) و نسبت اقطار موتور ( $\lambda$ ) دو پارامتر مهم طراحی می‌باشند که تأثیر بسزایی بر رفتار موتور دارند، از اینرو جهت بهینه کردن عملکرد موتور این پارامترها باید به درستی انتخاب شوند. شکل ۳



منحنی‌های سه بعدی تغییرات چگالی توان بر حسب چگالی شار فاصله هوایی و نسبت اقطار برای هر دو ساختار TORUS-S و AFIR-S را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود، حداکثر چگالی توان برای ساختار TORUS-S به ازای چگالی شار فاصله هوایی ۰/۵۸ تسلا و نسبت اقطار ۰/۴۶ اتفاق می‌افتد که مقداری برابر با ۰/۸۶ وات بر سانتی متر مکعب دارد، حال آنکه برای ساختار AFIR-S حداکثر چگالی توان برابر ۰/۸۴ وات بر سانتی متر مکعب است که به ازای چگالی شار فاصله هوایی ۰/۵۲ تسلا و نسبت اقطار ۰/۵ بدست می‌آید.



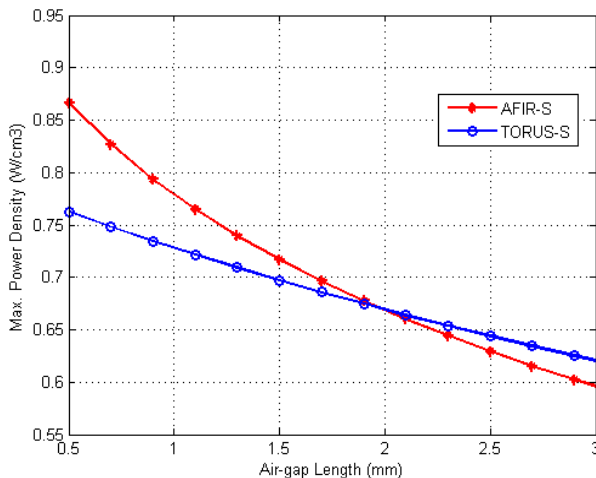
ب) ساختار AFIR-S



الف) ساختار TORUS-S

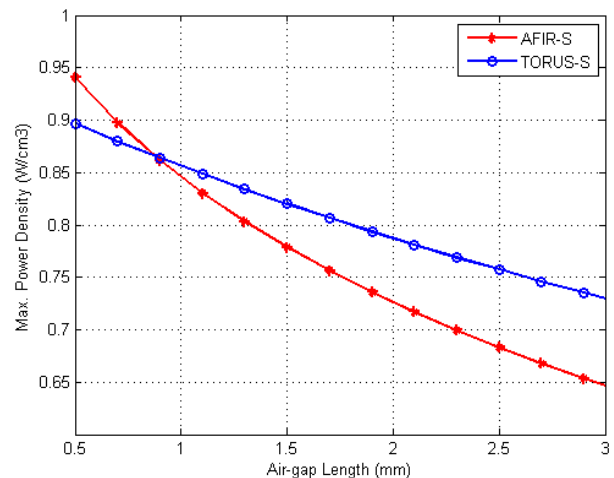
شکل ۳- منحنی چگالی توان بر حسب چگالی شار فاصله هوایی و نسبت اقطار برای  $J_s=6.6 \text{ (MA/m}^2)$  ،  $g=1 \text{ (mm)}$  ،  $A=30000 \text{ (A/m)}$

در بخش مقدمه عنوان شد که در محاسبه چگالی توان پارامتر طول فاصله هوایی بسیار مؤثر می‌باشد که خود متأثر از انتخاب نقطه کاری است. به منظور بررسی اثر فاصله هوایی بر تابع چگالی توان در دو ساختار مذکور، از رسم منحنی تغییرات حداکثر چگالی توان بر حسب فواصل هوایی مختلف مطابق شکل ۴ کمک گرفته می‌شود.



شکل ۵- مقایسه منحنی تغییرات حداکثر چگالی توان بر حسب طول

فاصله هوایی برای دو ساختار AFIR-S و TORUS-S  
 $J_s=6.0 \text{ (MA/m}^2)$  ،  $A=30000 \text{ (A/m)}$



شکل ۴- مقایسه منحنی تغییرات حداکثر چگالی توان بر حسب طول

فاصله هوایی برای دو ساختار AFIR-S و TORUS-S  
 $J_s=6.6 \text{ (MA/m}^2)$  ،  $A=30000 \text{ (A/m)}$

همانطوریکه مشاهده می‌شود برای یک فاصله هوایی معین- و حفظ شرایط یکسان برای دیگر پارامترها- مقدار بیشینه چگالی توان برای دو ساختار AFIR-S و TORUS-S می‌تواند برابر شود و با تغییر این فاصله مشخص، چه در جهت افزایشی و چه در جهت



کاهش می‌تواند شرایط نابرابر به نفع هر یک از ساختارها رقم بخورد. این فاصله هوایی معین، خود تابعی از شرایط کاری به ازای مقادیر مشخصی از بارپذیری الکتریکی موتور ( $A$ ) و چگالی جریان ( $J_s$ ) آن می‌باشد، یعنی با تغییر این دو پارامتر، میزان فاصله هوایی که به ازای آن چگالی توان برابر از دو ساختار استحصال می‌گردد، تغییر می‌یابد. این روند در شکل ۵ بعنوان نمونه بیان شده است.

با مقایسه نتایج بدست آمده، مشاهده می‌گردد در نقطه کار اولیه به ازای فاصله هوایی ۰/۹ میلی‌متر چگالی توان برای دو ساختار TORUS-S و AFIR-S برابر می‌گردد، حال آنکه در فواصل هوایی کمتر AFIR-S ساختار غالب بوده و برای فواصل هوایی بیشتر TORUS-S غالب می‌باشد. به همین منوال، با تغییر شرایط کاری به نقطه  $A=30000(A/m)$  و  $J_s=6 (MA/m^2)$  مشاهده می‌گردد چگالی توان برابر به سمت فواصل هوایی بالاتر سوق می‌یابد، ضمن آنکه ساختار AFIR-S در بازه گسترده‌تری نسبت به TORUS-S رفتار غالب خود را به نمایش می‌گذارد.

### آنالیز المان محدود دوبعدی

در این بخش به منظور صحت سنجی نتایج تحلیلی بدست آمده در خصوص ساختارهای معرفی شده و بررسی و تحلیل مدارهای مغناطیسی آن‌ها، از آنالیز المان محدود (FEM) دوبعدی استفاده می‌شود. با بهره‌گیری از FEM می‌توان سطوح اشباع در بخش‌های مختلف ماشین را شناسایی و چگالی‌های شار حاصله را با نتایج تحلیلی مقایسه نمود.

### شبیه‌سازی موتور TORUS-S

پارامترهای اساسی و ابعاد بهینه طرح استفاده شده برای مدل‌سازی موتور TORUS-S در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در اشکال ۶ و ۷ به ترتیب توزیع شار در بخش‌های مختلف ماشین و چگالی شار فاصله هوایی در قطر میانگین ( $D_g$ ) برای یک جفت قطب از ساختار مزبور با استفاده از آنالیز المان محدود نشان داده شده است. مقایسه‌ای از چگالی شار بدست آمده در بخش‌های مختلف موتور TORUS-S در حالت بی‌باری توسط دو روش تحلیلی و المان محدود نیز در جدول ۳ نمایش داده شده است. همانطوریکه از اشکال و جداول مربوط به چگالی شار بی‌باری پیداست، نتایج حاصل از حل معادلات تحلیلی حاکم بر ساختار مذکور تا حد مطلوبی با نتایج حاصل از آنالیز المان محدود همخوانی دارد.

جدول ۲- پارامترهای اساسی و ابعاد بهینه موتور TORUS-S

طول فاصله هوایی	۱ mm
عمق شیار	۹ mm
تعداد شیارهای استاتور	۲۴
نسبت قوس قطب	۰/۸
ضخامت آهنربای دائم	۳ mm
طول محوری هسته استاتور	۲۳ mm
طول محوری هسته روتور	۱۸ mm
قطر خارجی ماشین	۳۱۰ mm
قطر داخلی ماشین	۱۴۰ mm

جدول ۳- مقایسه چگالی شار در قسمت‌های مختلف موتور TORUS-S

فاصله هوایی		استاتور	روتور	بخش
$(B_{avg})$	$(B_{max})$	$(B_{cs})$	$(B_{cr})$	
۰/۶۷	۰/۹۱	۱/۴۵	۱/۵۲	آنالیز المان محدود (FEM)
۰/۶۱	۰/۸۶	۱/۵	۱/۵	روش تحلیلی (معادلات سایزینگ)

### شبیه‌سازی موتور AFIR-S

پارامترهای اساسی و ابعاد بهینه طرح استفاده شده برای مدل‌سازی موتور AFIR-S در جدول ۴ ارائه شده است. بطور مشابه، توزیع شار در بخش‌های مختلف موتور AFIR-S و چگالی شار فاصله هوایی در قطر میانگین ( $D_g$ ) برای یک جفت قطب از ساختار مزبور

با استفاده از آنالیز المان محدود به ترتیب در اشکال ۸ و ۹ نشان داده شده است. مقایسه‌ای از چگالی شار بدست آمده در بخش‌های مختلف موتور AFIR-S در حالت بی‌باری توسط دو روش تحلیلی و المان محدود نیز در جدول ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای اساسی و ابعاد بهینه موتور AFIR-S

طول فاصله هوایی	۱ mm
عمق شیار	۸ mm
تعداد شیارهای استاتور	۲۴
نسبت قوس قطب	۰/۸
ضخامت آهنربای دائم	۳ mm
طول محوری هسته استاتور	۱۵ mm
طول محوری هسته روتور	۳۰ mm
قطر خارجی ماشین	۳۵۰ mm
قطر داخلی ماشین	۱۷۵ mm

جدول ۵- مقایسه چگالی شار در قسمت‌های مختلف موتور AFIR-S

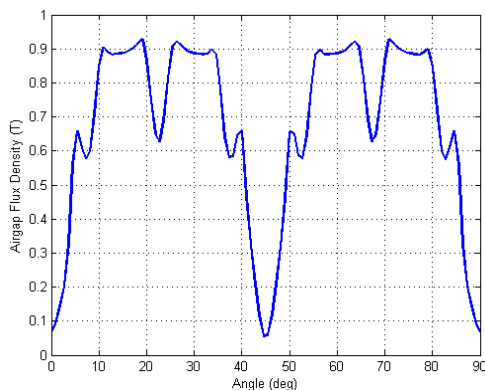
فاصله هوایی		استاتور ( $B_{cs}$ )	روتور ( $B_{cr}$ )	بخش روش
( $B_{avg}$ )	( $B_{max}$ )			
۰/۵۶	۰/۸۸	۱/۴۶	۱/۵۱	آنالیز المان محدود (FEM)
۰/۵۳	۰/۸۶	۱/۵	۱/۵	روش تحلیلی (معادلات سائزینگ)

مجدداً مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از آنالیز المان محدود به میزان قابل قبولی با نتایج روش تحلیلی همخوانی دارد. همانطوریکه از جدول ۵ پیداست میزان خطای روش تحلیلی نسبت به FEM در برآورد چگالی شار بی‌باری در روتور و استاتور ساختار AFIR-S به ترتیب ۰/۷٪ و ۲/۷٪ محدود می‌شود حال آنکه این مقدار خطا برای چگالی شار میانگین فاصله هوایی حدود ۵/۶۷٪ می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

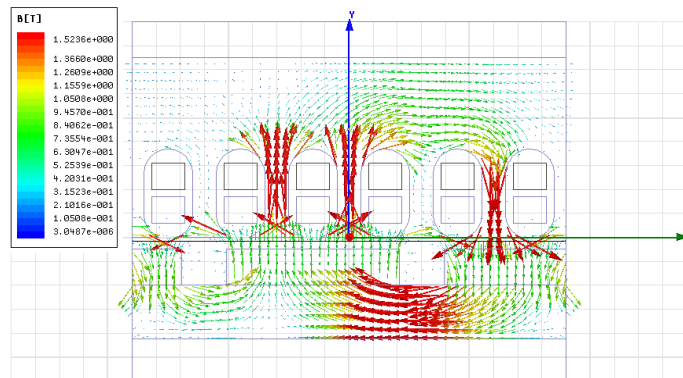
انتخاب یک موتور مغناطیس دائم شار محور مناسب که دارای چگالی توان و گشتاور بالایی باشد از جمله فاکتورهای اساسی در کاربردهای مختلف است. در مقاله حاضر، یک مطالعه مقایسه‌ای میان دو موتور AFPM با ساختار دو وجهی شیاردار یکی از نوع استاتور میانی (TORUS-S) و دیگری از نوع روتور میانی (AFIR-S) صورت گرفت. برای طراحی بهینه ساختارهای عنوان شده، معادلات تحلیلی آنها استخراج گردید و سپس بر اساس شرایط کاری مختلف، عملکرد آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج عددی نشان داد که حداکثر چگالی شار فاصله هوایی و نسبت اقطار موتور می‌باشد که برای هر ساختار، مقادیر معین خود را دارا هستند. از طرفی مشاهده شد طول فاصله هوایی که خود متأثر از دو پارامتر بارپذیری الکتریکی و چگالی جریان موتور است، اثر قابل ملاحظه‌ای بر حداکثر چگالی شار فاصله هوایی در میان ساختارهای مزبور دارد. به عبارت دیگر با تغییر نقطه کار و فاصله هوایی چه در جهت افزایشی و چه در جهت کاهش، شرایط نابرابر در حداکثر چگالی شار فاصله هوایی قابل استحصال از ساختارهای مورد بحث، بوجود می‌آید. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی دوبعدی ساختارهای مزبور به کمک آنالیز المان محدود نشان می‌دهد که مقادیر چگالی شار در بخش‌های مختلف تا حد مطلوبی با نتایج تحلیلی مطابقت دارد و این خود به معنای صحت محاسبات انجام گرفته می‌باشد.

5<sup>th</sup> Conference on Rotating Equipment in Oil & Power Industries ■ مرکز همایش‌های بین‌المللی شهید بهشتی، تهران ■ ۱-۲ بهمن ۱۳۹۲  
Jan,21-22, 2014, Beheshti Intl, Conference Center, Tehran, Iran

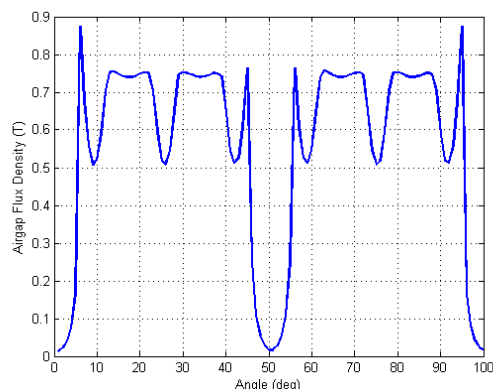


شکل ۷- توزیع چگالی شار فاصله هوایی در قطر میانگین

برای یک جفت قطب از ساختار TORUS-S

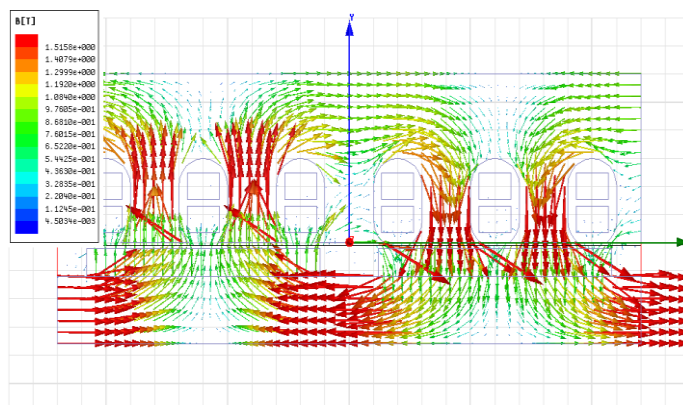


شکل ۶- توزیع شار برای یک جفت قطب از ساختار TORUS-S



شکل ۹- توزیع چگالی شار فاصله هوایی در قطر میانگین

برای یک جفت قطب از ساختار AFIR-S



شکل ۸- توزیع شار برای یک جفت قطب از ساختار AFIR-S

## مراجع

- [1]. Ani, S.O., Bang, D., Polinder, H., Lee, J.Y., Moon, S.R., Koo, D.H., "Human powered axial flux permanent magnet machines: Review and comparison", 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 4165 – 4170, 2010.
- [2]. Park, J.C., Choi, H.R., Choe, G.H., "A Study on AFPM (Axial Flux Permanent Magnet) Motor without Stator Core", 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1 – 6, 2006.
- [3]. Huang, S., J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines," IEEE Trans. On Energy Conversion, IA-34(1): 92-97, 1998.
- [4]. Huang, S., J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, "A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on the General Purpose Sizing Equation", IEEE Trans. on Energy Conversion, 14(2): 185-192, 1999.
- [5]. Zheng, P., Gan, X., Li, L. "Analysis and Design of a High Power Density Axial Flux Permanent Magnet Linear Synchronous Machine Used for Stirling System", 2010 First International Conference on Pervasive Computing Signal Processing and Applications (PCSPA), pp. 398 – 401, 2010.
- [6]. Mardaneh, M., Mirsalim, M., Aliahmadi, M., "Modeling and Design of Axial-Flux Permanent Magnet Machines: A New Approach", The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, pp. 346 – 348, 2006.
- [7]. Nguyen, T.D., Tseng, K.J., "Comparison of axial flux permanent magnet machines with fractional and integral slot per pole", 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1 – 5, 2011.
- [8]. Aydin, M., Surong Huang, T.A. Lipo, "Design and 3D electromagnetic field analysis of non-slotted and slotted TORUS type axial flux surface mounted permanent magnet disc machines", Electric Machines and Drives Conference. IEMDC 2001. IEEE International, pp: 645-651, 2001.
- [9]. Aydin, M., S. Huang, T.A. Lipo, "Optimum design and 3D finite element analysis of non-slotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc Machines", Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE 3: 1409-1416, 2001.