

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Type of Article (e.g. Research Article)

3D Analytical Modeling of Slotless Axial Flux Machines under No-Load Condition and Different Magnet Shapes

Farhad Rezaee-Alam ^{a*}, and Mojtaba Hosseini

^a Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran ^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13 Revised: 2022-05-12 Accepted: 2022-10-19

Keywords:

Type your keywords here in separate lines Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) machine; Flux-linkage; Fourier-Bessel series; PM shaping; Skew.

ABSTRACT

This paper presents a new 3D analytical model based on Fourier-Bessel series for electromagnetic modeling the performance of slotless Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) machines under no-load condition. The machine geometry is divided into different domains including Permanent Magnet (PM) domain, airgap domain and so on. The Laplace equation in terms of scalar magnetic potential is solved in each domain, and their solutions is expressed based on Fourier-Bessel series to accurately consider the radial variation of air-gap magnetic field. A 2D geometry function based on Fourier-Bessel series is introduced to accurately consider the different PM shaping in magnet domain. The boundary condition is then used to determine the unknown constants in general solutions. This 3D analytical model is prepared to calculate the no-load flux-linkage of stator phases while considering different PM shapes and skewing effect. Two indexes including the amplitude of fundamental component and the total harmonic distortion (THD) of no-load phase fluxlinkage are considered to investigate the effect of skewed PMs and other PM shapes. The capability of proposed 3D analytical model is also presented to calculate the air-gap magnetic field due to stator phases for determining the inductance matrix. In final, the accuracy of proposed 3D analytical model is verified by comparing with the corresponding results obtained through finite element method (FEM) and experiment set-up.

DOI: https://doi.org/

© 2024 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

* Corresponding author.

E-mail address: rezaee.fa@lu.ac.ir

نوع مقاله (به عنوان مثال مقاله پژوهشی)

مدلسازی تحلیلی ۳ بعدی ماشین های شار محوری تحت شرایط بی باری و با در نظر داشتن شکل های مختلف برای آهنریا

فرهاد رضائی علم^۱*، و مجتبی حسینی ^۲

| چکیدہ | اطلاعات مقاله |
|---|----------------------------|
| | دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰ |
| در این مقاله، یک مدل تحلیلی ۳ بعدی بر پایه سری فوریه – بسل برای مدلسازی عملکرد | بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰ |
| الکترومغناطیسی ماشین های شار محوری بدون شیار با آهنربای دائم (AFPM) ارائه می شود. | پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵ |
| · · · هندسه ماشین به نواحی مختلف شامل ناحیه آهنربای دائم (PM)، فاصله هوایی و غیره تقسیم | ماثگان کارده : |
| می شود. در هر ناحیه معادله لاپلاس بر حسب پتانسیل مغناطیسی اسکالر حل می شود و به | ورود على خليدى. |
| منظور دقیق در نظر گرفتن تغییرات شعاعی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی، جواب های معادله | ماسین سار محوری با اهنربای |
| لاپلاس بر حسب سری فوریه – بسل بیان می شوند. یک تابع هندسی ۲ بعدی بر حسب سری | دانم (۲۱۱۲ ۸۱)، |
| فوریه – بسل برای در نظر گرفتن شکل های مختلف برای قطب های آهنربایی معرفی می شود. | شار پيوندى، |
| از شرایط مرزی برای تعییل ثابت های مجهول در جواب های عمومی معادله لاپلاس استفاده می | سری فوریه – بسل، |
| شود. از این مدل تحلیلی ۳ بعدی به منظور محاسبه شار پیوندی با فازهای استاتور در حالت بی | شكل اهنربا، |
| باری استفادہ می شود مادامی که شکل های مختلف برای قطب های آهنربایی و اثر مورب سازی | مورب سازى. |
| در نظر گرفته خواهد شد. از دامنه مولفه اصلی شار پیوندی و اعوجاج هارمونیکی کل (THD) به | |
| عنوان شاخص های ارزیابی شار پیوندی با فار استاتور استفاده می شود. قابلیت و توانایی این مدل | |
| تحلیلی ۳ بعدی برای محاسبه میدان مغناطیسی فاصله هوایی ناشی از تحریک فازهای استاتور به | |
| منظور محاسبه ماتریس اندوکتانس ارائه می شود. در نهایت، دقت مدل تحلیلی ۳ بعدی پیشنهادی | |
| از طريق مقايسه نتايج حاصل از آن با نتايج متناظر حاصل از روش اجزاء محدود (FEM) و نتايج | |

عملی تایید می شود.

DOI: https://doi.org/

نویزشان، کاربرد های فراوانی در صنعت پیدا کرده اند [۱-

۲]. به همین خاطر، مدلسازی ۳ بعدی دقیق ماشین های

AFPM بدون شیار برای محاسبه میدان مغناطیسی فاصله

© 2024 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱-مقدمه

ماشین های شار محوری با آهنربای دائم (AFPM) و بدون شیار به خاطر نداشتن گشتاور دندانه ای و پایین بودن سطح

۲

^{*} پست الكترونيك نويسنده مسئول: rezaee.fa@lu.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه لرستان

۲. استاد، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه لرستان

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

هوایی ضروری است. روش اجزاء محدود (FEM) مشهورترین تکنیک برای آنالیز عملکرد ماشین های AFPM است [۴-۳]. در مرجع [۵] روش بازسازی میدان که بر پایه توابع پایه بدست آمده از FEM عمل می کند برای مدلسازی و آنالیز عملکرد یک ماشین AFPM استفاده شده است. امکان مدلسازی تمامی اثرات غیر ایده آل شامل شباع معناطیسی و اثر شیارها با استفاده از FEM وجود دارد. در هر حال آماده کردن مدل ۳ بعدی ماشین های الکتریکی شامل ماشین های AFPM در نرم افزارهای FEM و تحلیل ۳ بعدی آنها فوق العاده زمانبر است و در بعضی موارد مانند ماشین های الکتریکی بزرگ و آنالیز ۳ بعدی در حین چرخش رتور، امکان رسیدن به جواب وجود ندارد. به همین خاطر معرفی روشهای تحلیلی ۳ بعدی می تواند فوق العاده ارزشمند باشد، و بهتر است که تنها در مرحله پایانی و به منظور تایید و راستی آزم<mark>ا</mark>یی نتایج بدس*ت* آمده از مدل های تحلیلی، از FEM استفاده شود [۶]. روش های تحلیلی که تاکنون برای مدلسازی و آنالیز عملکرد ماشین های AFPM استفاده شده اند عبارتنند از مدل های شبه ۳ بعدی^۲، مدل مدار معادل مغناطیسی^۳ (MEC)، و مدل ناحیه بندی^۴ (S-D).

مدل های شبه ۳ بعدی بیشتر از سایر مدل های تحلیلی برای مدلسازی ماشین های AFPM استفاده شده اند. در مدل های شبه ۳ بعدی، به منظور در نظر گرفتن تغییرات هندسی موتور در جهت شعاعی و ناشی از اثر انحناء^م، هندسه ماشین در جهت شعاعی به چندین اسلایس⁹ حلقوی تقسیم می شود. مدل تحلیلی ۲ بعدی در هر اسلایس برای آنالیز الکترومغناطیسی استفاده می شود و های ۲ بعدی، نتایج مربوط به آنالیز مدل شبه ۳ بعدی بدست می آید. در مرجع [۷]، مدل شبه ۳ بعدی بر پایه مدل های FEM ۲ بعدی استفاده شده است. مدل شبه ۳ بعدی با کمک مدلسازی مغناطیسی هارمونیکی در مختصات کارتزین در مرجع [۸] پیشنهاد داده شد. مدل شبه ۳ بعدی در شعاع

متوسط هندسی، با کمک مدل S-D در خصوص ترمزهای فوکو شار محوری [۱۰-۹]، و با کمک روش تصاویر برای محاسبه اندوکتانس های یک ماشین AFPM بدون شیار [۱۱] ارائه شده است. مدل شبه ۳ بعدی همچنین برپایه چند مدل S-D بعدی در شعاع های مختلف هندسی به منظور بهینه سازی طرح و مدلسازی ماشین های AFPM استفاده شده است [۱۳-۱۲].

| AFPM آنالیز شدہ | ماشين | - پارامترهای | جدول ۱ |
|-----------------|-------|--------------|--------|
|-----------------|-------|--------------|--------|

شعاع بیرونی هسته استاتور (r_{so})

 (r_{si}) شعاع داخلی هسته استاتور

ضخامت محوري هسته استاتور

تعداد كلاف هاى استاتور

ضخامت هر کلاف

عرض هر کلاف

تعداد دور هر کلاف

طول فاصله هوايي

شعاع بيروني آهنربا (r_{mo})

شعاع داخلي آهنربا (r_{mi})

تعداد آهنربا

ضخامت آهنربا

نسبت قوس قطب به گام قطب

۱۵۰ میلیمتر

۱۰۰ میلیمتر

۱۰ میلیمتر

۲۴

۴ میلیمتر

۷ میلیمتر

۵١

۲ میلیمتر

۱۵۵ میلیمتر

۹۵ میلیمتر

۱۶

۲/۵ میلیمتر

۰/٨

| ۱۶۰ میلیمتر | شعاع بیرونی هسته رتور (r _{ro}) |
|------------------------------------|--|
| ۹۰ میلیمتر | (r_{ri}) شعاع داخلی هسته رتور |
| ۱۰ میلیمتر | ضخامت هسته رتور |
| ۱/۲ تسلا | چگالی شار پسماند آهنربا (B _R) |
| ١/١ | نفوذپذیری نسبی آهنربا |
| م ۲ MEC بعدی در | مدل شبه ۳ بعدی با کمک مدل های |
| بناطیسی ماشین های | مراجع [16-16] براي أناليز الكتروم |
| بعدی بر پایه ترکیب | شار محوری استفاده شد. مدل شبه ۳ |
| فاصله هوایی و مدل | جواب های معادلات ماکسول در ف |
| ع [۱۶] ارائه شد. در | MEC در بخش های آهنی در مرج |
| ی تعداد اسلایس های | حالت کلی می توان ادعا کرد با افزایش |
| افزايش خواهد يافت. | ۲ بعدی، دقت مدل شبه ۳ بعدی نیز |
| ی توانند اثرات لبه ای ^۷ | همچنین، مدل های شبه ۳ بعدی نم _ح |
| های رتور و استاتور را | ناشی از اختلاف طول شعاعی هسته ، |
| جع [1۸-۱۷]، ضرائب | در نظر بگیرد. به همین خاطر در مرا- |

² Quasi 3D model

- ³ Magnetic Equivalent Circuit (MEC)
- ⁴ Sub-Domain (S-D) model
- ⁵ Curvature effect
- ⁶ Slice
- ⁷ Edge effect

تصحيح بدست آمده از FEM براي لحاظ كردن اثرات لبه ای در نتایج میدان مغناطیسی فاصله هوایی حاصل از مدل های شبه ۳ بعدی استفاده شده اند. مدل MEC ۳ بعدی نیز می تواند برای مدلسازی و آنالیز عملکرد ماشین های AFPM استفاده شود [۱۹]. در هر حال مدل MEC کاربرپسند نیست و برای محاسبه مولفه های چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی نمی تواند دقیق عمل کند. در مرجع [۲۰]، مدل S-D بعدی برای آنالیز الکترومغناطیسی ماشین های AFPM بدون در نظر گرفتن اثرات لبه ای استفاده شده است. در [۲۱]، یک مدل تحلیلی ۳ بعدی برای محاسبه گشتاور در ماشین های AFPM بدون شیار ارائه شده است که از اعمال یک ضریب تصحیح برای مدلسازی اثر تغییر شکل قطب های آهنربایی سینوسی شکل در راستای شعاعی استفاده کرده است. در این مقاله، یک مدل تحلیلی 🍸 بعدی برای آنالیز الكترومغناطيسي ماشين هاي AFPM بدون شيار ارائه شده است که می تواند اثرات انحناء مربوط به هندسه قطب های آهنربایی و اثرات لبه ای ناشی از اختلاف طول شعاعی هسته های رتور و استاتور را در نظر بگیرد. این مقاله شامل بخش های زیر است:

در بخش ۲ ام پارامترهای اصلی ماشین AFPM آنالیز شده معرفی می شوند. مدل تحلیلی ۳ بعدی پیشنهاد شده در بخش ۳ ام به طور کامل معرفی می شود. محاسبه شار پیوندی با استفاده از مدل تحلیلی پیشنهادی در بخش ۴ ام ارائه می شود. نتایج گرفته شده از این مقاله در بخش ۵ ام معرفی می شوند.

۲-پارامترهای ماشین AFPM آنالیز شده

در خصوص ماشین AFPM آنالیز شده که ۳ فاز، بدون شیار، تک وجهی و دارای قطب های آهنربایی مغناطیس شده در جهت محوری است، پارامترهای اصلی در جدول ۱ معرفی می شوند. در شکل ۱، دیسک های رتور و استاتور که به ترتیب شامل قطب های آهنربایی و کلاف های سیم بندی سه فاز هستند، در محیط نرم افزار ماکسول بندی سه فاز هستند، در محیط نرم افزار ماکسول مشاهده می شود، به منظور وضوح بیشتر، قطب های رتور و کلاف های استاتور با رنگ های متفاوت دیده می شوند.

۳-مدل تحلیلی ۳ بعدی پیشنهادی

در مدل ۳ بعدی پیشنهادی، هندسه ماشین به نواحی مختلف تقسیم می شود. یک نمای ۲ بعدی از ماشین AFPM بدون شیار در صفحه r-z در دستگاه مختصات استوانه ای در شکل ۲ نشان داده می شود.



$$\begin{split} \Omega_{i}(r,\varphi,z) &= \sum_{k} \sum_{l} \left[\left(L_{i,(k,l)} e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} + M_{i,(k,l)} e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} \right) J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}r \right) \cos\left(l(\varphi-\theta_{r})\right) \\ &+ \left(N_{i,(k,l)} e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} + O_{i,(k,l)} e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} \right) J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}r \right) \sin\left(l(\varphi-\theta_{r})\right) \right] \\ H_{r,i}(r,\varphi,z) &= \end{split}$$

$$-\sum_{k}\sum_{l}\left(\frac{j_{(k,l)}}{2r_{a}}\right)\left[\left(L_{i,(k,l)}e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z}+M_{i,(k,l)}e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z}\right)F\left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}r\right)\cos\left(l(\varphi-\theta_{r})\right)\right.$$

$$\left.+\left(N_{i,(k,l)}e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z}+O_{i,(k,l)}e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z}\right)F\left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}r\right)\sin\left(l(\varphi-\theta_{r})\right)\right]$$

$$(A)$$

$$H_{t,i}(r,\varphi,z) = \sum_{k} \sum_{l} \left(\frac{l}{r} \right) \left[\left(L_{i,(k,l)} e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} z} + M_{i,(k,l)} e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} z} \right) J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} r \right) \sin(l(\varphi - \theta_{r})) - \left(N_{i,(k,l)} e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} z} + O_{i,(k,l)} e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} z} \right) J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} r \right) \cos(l(\varphi - \theta_{r})) \right]$$
(9)

 $H_{z,i}(r,\varphi,z) =$

$$-\sum_{k}\sum_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}\right) \left[\left(L_{i,(k,l)} e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} - M_{i,(k,l)} e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} \right) J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}r\right) \cos(l(\varphi - \theta_{r})) + \left(N_{i,(k,l)} e^{\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} - O_{i,(k,l)} e^{-\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}z} \right) J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}}r\right) \sin(l(\varphi - \theta_{r})) \right]$$

$$M_{k} (r, \omega)$$

$$M_{z}(r,\varphi) = -0.5 \sum_{k} A_{(k,0)} J_{l} \left(\frac{j_{(k,0)}}{r_{a}} r \right) + \sum_{k} \sum_{l} \left[A_{(k,l)} J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} r \right) \cos(l(\varphi - \theta_{r})) + B_{(k,l)} J_{l} \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_{a}} r \right) \sin(l(\varphi - \theta_{r})) \right]$$

$$(17)$$

$$A_{(k,l)} = \frac{2}{\pi r_a^2 [J_{l+1}(j_{(k,l)})]^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} r M_z J_l \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_a}r\right) \cos(l\varphi) \, drd\varphi$$
$$B_{(k,l)} = \frac{2}{\pi r_a^2 [J_{l+1}(j_{(k,l)})]^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} r M_z J_l \left(\frac{j_{(k,l)}}{r_a}r\right) \sin(l\varphi) \, drd\varphi$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}_2 \rightarrow \begin{cases} \mathbf{H}_{t,2} = \mathbf{H}_{t,3} \\ \mathbf{B}_{z,2} = \mathbf{B}_{z,3} \end{cases}$$
(f)

$$z = z_1 \rightarrow H_{t,2} = 0 \tag{(a)}$$

معادله لاپلاس (۱) با استفاده از روش جداسازی متغیرها حل می شود با این فرض که هسته های رتور و استاتور دارای نفوذپذیری مغناطیسی بی نهایت هستند. طول شعاعی متفاوت نواحی در شکل ۲ قابل مشاهده است که منجر به اثرات انتهایی یا لبه ای می شود. جواب عمومی معادله لاپلاس (۱) ناشی از فقط PM های رتور به صورت

در (۱)،
$$\Omega_i$$
 پتانسیل مغناطیسی اسکالر را در ناحیه i ام
نشان می دهد. با استفاده از اصل پیوستگی مولفه نرمال
بردار چگالی شار مغناطیسی (\vec{B}) و مولفه مماسی بردار
شدت میدان مغناطیسی (\vec{H}) در سرتاسر مرزهای افقی
نشان داده شده در شکل ۲، شرایط مرزی لازم را برای حل
معادله لاپلاس (۱) می توان به شرح زیر تعریف کرد:

$$z = z_4 \rightarrow H_{t,4} = 0 \tag{(7)}$$

$$z = z_3 \to \begin{cases} H_{t,3} = H_{t,4} \\ B_{z,3} = B_{z,4} \end{cases}$$
(7)



شکل ۴- مولفه های چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در بی باری

(۶) قابل نمایش است. همانطور که مشاهده می شود از سری فوریه – بسل در جواب عمومی معادله لاپلاس برای دقیق لحاظ کردن تغییرات هندسی در جهت های شعاعی ناشی از اثر انحنا، تغییرات مماسی ناشی از توزیع متناوب قطب های آهنربایی، و تغییرات در راستای محوری با شرایط مرزی مناسب، استفاده شده است. در (۶)، $(f_{(k,l)})$ عبار تست از ریشه k ام از تابع بسل نوع اول (r) بعد از حل معادله لاپلاس (۱)، شدت میدان مغناطیسی در ناحیه i ام را با استفاده از رابطه زیر می توان محاسبه کرد:

 $\overrightarrow{H_{i}} = -\overrightarrow{\nabla}\Omega_{i}$ (Y) i تایج حاصل از (Y) برای مولفه های شعاعی، مماسی، و محوری $\overrightarrow{H_{i}}$ در موقعیت های مختلف رتور (θ_{r}) در فرمول های (۸–۱۰) نشان داده می شوند. $F\left(rac{j_{(k,l)}}{r_{a}}r\right)$ در (۸) به صورت (۱۱) تعریف می شود.

$$F\left(\frac{j_{(k,l)}}{r_a}r\right) = J_{l-1}\left(\frac{j_{(k,l)}}{r_a}r\right)$$

$$-J_{l+1}\left(\frac{j_{(k,l)}}{r_a}r\right)$$

$$(11)$$

همانطور که در شکل (۲) نشان داده می شود و مطابق رابطه (۲)، بردار مغناطیس شوندگی آهنربا $\left(\overrightarrow{M}
ight)$ در ناحیه 4 ام، برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی باید در نظر گرفته شود.

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right)$$
$$\vec{M} = M_z \vec{a_z} = \frac{B_R}{\mu_0} \vec{a_z}$$
(17)

در (۱۲)، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلاء است. با کمک (۱۳)، از سری فوریه – بسل برای نمایش توزیع مغناطیس شوندگی آهنرباها در جهت محوری استفاده می شود. برای ماشین AFPM بدون شیار آنالیز شده با PM های ذوزنقه ای شکل، توزیع واقعی و تقریبی M_z در شکل ۳ نشان داده می شوند.

برای محاسبه توزیع میدان مغناطیسی فاصله هوایی ناشی از فقط آهنرباها، ثابت های مجهول در (۸–۱۰) از طریق اعمال شرایط مرزی در $z_1 = z_3$ ، $z = z_4$ و $z = z_4$ اعمال شرایط مرزی در $z_1 = z_3$ ، $z = z_5$ و z = zشکل ۲ در نظر گرفته نمی شود. ثابت های مجهول مربوط شکل ۲ در نظر گرفته نمی شود. ثابت های مجهول مربوط به نواحی فاصله هوایی و PM ها از طریق حل دستگاه معادلات (۱۴) تعیین می شوند. برای یک نقطه کار بی باری معادلات (۱۴) تعیین می شوند. برای یک نقطه کار بی باری و در شعاع های مختلف، مولفه های چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی برای ماشین AFPM بدون شیار تحت بررسی با PM های ذوزنقه ای شکل در شکل ۴ نشان داده می شوند. لازم به ذکر است که مولفه شعاعی B_r در شعاع متوسط mm 215 m قابل چشم پوشی است و به همین خاطر در شعاع است داده شده است.

از طریق جایگزینی سیم پیچ ها با آهنرباهای مجازی معادل که دارای جهت مغناطیس شوندگی محوری هستند، مدل تحلیلی ۳ بعدی پیشنهادی می تواند برای محاسبه میدان مغناطیسی فاصله هوایی ناشی از جریان های استاتور استفاده شود. در این فرآیند معادلسازی، شکل و نیرو محرکه



در خصوص ماشین AFPM تحت بررسی، تابع دور دو بعدی یک کلاف استاتور، و توزیع واقعی و تقریبی M_z با فرض $(A) I_c = 1$ در شکل ۵ نشان داده می شوند. مشابه حالت بی باری و با حذف ناحیه PM در شکل ۲، دستگاه معادلات (۱۶) از طریق اعمال شرایط مرزی در $z = z_1$ معادلات $z = z_4$ و $z = z_5$ تشکیل می شود. مغناطیسی کلاف های استاتور به طور کامل حفظ می شود. چگالی شار پسماند آهنربای مجازی معادل (B_R) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$B_R = \frac{\mu_0 \times n_c \times I_c}{h_m} \tag{10}$$

در رابطه (۱۵)، n_c تعداد دورهای یک کلاف، I_c اندازه جریان کلاف، و m_b مخامت قطب های PM مجازی است.





تحت شرایط تحریک فاز A با جریان ۱ آمیری (I_A=1(A), I_B=0(A), I_C=0(A)) مولفه های چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در شکل ۶ نشان داده شده و همچنین از طریق مقایسه با نتایج نظیر FEM راستی آزمایی می شوند.

۴- محاسبه شار پیوندی شار پیوندی با یک کلاف استاتور می تواند به صورت (۱۷) محاسبه شود.

مجله مدل سازی در مهندسی

1

| θ _{sk} = 25: | PPM | مورب نشده | PM -الف | | | |
|---|------------|-----------------|-----------|--|--|--|
| شکل ۸- PM با اثر مورب سازی و بدون آن جدول ۲- نتایج آنالیز شار پیوندی | | | | | | |
| THD | مولفه اصلى | زاویه مورب سازی | شکل PM | | | |
| ۵/۲۴٪. | ۱۵۵۵/۰ وبر | ۰ درجه | Y | | | |
| ۵/۱۱ ٪. | ۱۵۴۸ وبر | ۵ درجه | | | | |
| ۴/۵۹ ٪. | ۱۵۴۱/ وبر | ۱۰ درجه | | | | |
| ٣/٨٩ ٪. | ۱۵۲۸ وبر | ۱۵ درجه | ذوزنقه ای | | | |
| ٣/١٣ ٪. | ۱۵۱۲ وبر | ۲۰ درجه | | | | |
| ۲/۴۸ ٪. | ۱۴۸۸ وبر | ۲۵ درجه | | | | |
| ۲/۰۵٪ | ۱۲۶۲/۰ وبر | ۳۰ درجه | | | | |
| ۴/۲۵ ٪. | ۱۵۴۵/۰ وبر | ۰ درجه | | | | |
| ٣/٨٨ ٪. | ۱۵۳۶ وبر | ۵ درجه | | | | |
| ۳/۵۴ ٪. | ۱۵۲۱ وبر | ۱۰ درجه | مستطيلے | | | |
| ٣/٣٧ ٪. | ۱۴۹۷/۰ وبر | ۱۵ درجه | | | | |
| ٣/۴۲ ٪ | ۰/۱۴۶۱ وبر | ۲۰ درجه | | | | |
| ۳/۵۱ ٪. | ۰/۱۴۱۶ وبر | ۲۵ درجه | | | | |
| ۵/۵ ٪. | ۰/۱۶۹۱ وبر | _ | دایره ای | | | |
| r/9 / | ۱۵۴۸ وبر | - | سينوسى | | | |

کلاف i ام در شکل ۵ – الف نشان داده شده است. شار پیوندی با سایر کلاف ها از طریق ایجاد شیفت مکانی مناسب در نتایج بدست آمده در (۱۷) حاصل می شود. در نهایت، شار پیوندی با یک فاز استاتور از طریق اعمال اصل جمع آثار روی نتایج نظیر بدست امده برای کلاف های استاتور (فرمول (۱۸)) حاصل می شود.

$$\lambda_{i}(\theta_{r}) = \int_{0}^{2\pi} \int_{r_{si}}^{r_{so}} [n_{i}(r,\varphi) \times B_{z}(r,\varphi,\theta_{r}) \qquad (1 \forall)$$
$$\times ds(r,\varphi)]$$

در رابطه (۱۷)، θ_r موقعیت رتور، $n_i(r, \varphi)$ تابع دور کلاف *i* ام، $B_z(r, \varphi, \theta_r)$ مولفه اصلی (محوری) توزیع چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی در موقعیت θ_r از رتور، و $ds(r, \varphi)$ مساحت المان دیفرانسیلی مربوطه است. با در نظر داشتن توزیع هادیها در هر نصف کلاف، توزیع ۲ بعدی تابع دور

90

90



با حذف PM های رتور، از محاسبه شار پیوندی با فازهای استاتور می توان برای تعیین عناصر ماتریس اندوکتانس

$$\begin{cases} L_{A-A} = \frac{\lambda_A}{I_A} \Big|_{I_A} \neq 0, I_{B,C} = 0 = 1.9 \ (mH) \\ L_{A-B} = \frac{\lambda_A}{I_B} \Big|_{I_B} \neq 0, I_{A,C} = 0 = -1.2 \ (mH) \\ \lambda_A = \int_0^{2\pi} \int_{r_{si}}^{r_{so}} n_A(r,\varphi) \times B_z(r,\varphi) \times ds(r,\varphi) \end{cases}$$
(14)

در (۱۹)، $n_A(r, heta)$ توزیع ۲ بعدی تابع دور فاز A، و توزیع ۲ بعدی مولفه محوری چگالی شار $B_z(r, arphi)$ مغناطیسی فاصله هوایی ناشی از تحریک مناسب فازهای



همان طور که در رابطه (۱۹) مشاهده می شود، به علت بدون شیار بودن هندسه رتور و استاتور و نادیده گرفتن اثر اشباع مغناطیسی در هسته های استاتور و رتور از ماشین AFPM تحت بررسی، مقادیر ثابتی برای اندوکتانس های خودی و متقابل بدست آمده است. لازم به ذکر است که تحت شرایط در نظر گرفتن مشخصه مغناطیس شوندگی واقعی برای هسته های استاتور و رتور، مقدار اندوکتانس های خودی و متقابل تابعی از فرکانس نیز خواهند بود [۲۲]. در ادامه در خصوص ماشین AFPM تحت بررسی، با در نظر گرفتن شکل های مختلف برای قطب های PM بدون تغییر در مساحت هر PM (در صفحه heta - heta در دستگاه



مختصات استوانه ای) و همچنین با ثابت نگهداشتن ضخامت PM ها در راستای محور z، شار پیوندی با فاز استاتور محاسبه میشود

شکل ۱۳- راستی آزمایی با نتیجه عملی در ۳۰۰۰ دور بر دقیقه

توزیع تقریبی مغناطیس شوندگی برای قطب های PM با در نظر داشتن شکل های مختلف و اثر مورب سازی، بدست آمده از (۱۳)، در شکل ۷ نشان داده می شوند. نمایی ۲ بعدی از یک PM ذوزنقه ای مورب شده و بدون اثر مورب سازی در شکل ۸ نشان داده می شود.

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، ناشی از اثر مورب سازی، مساحت PM ها در صفحه $\theta - r$ تغییر نمی کند. با ثابت نگه داشتن مساحت سطح و ضخامت PM ها، شار پیوندی با فاز استاتور از ماشین AFPM بدون شیار ها، شار پیوندی با فاز استاتور از ماشین MPM ها در شکل با در نظر داشتن شکل های مختلف برای PM ها در شکل ۹ نشان داده می شوند. همانطور که در شکل ۹–پ مشاهده می شود، برای ماشین AFPM با PM های سینوسی

شکل، شار پیوندی با فاز استاتور بدست آمده از مدل تحلیلی ۳ بعدی به خوبی از طریق مقایسه با نتیجه نظیر بدست آمده از FEM ۳ بعدی تایید و راستی آزمایی می شود. تحت این شرایط، مقایسه دقیق نتایج شار پیوندی با فاز استاتور بر حسب آنالیز فوریه و شاخص THD، در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار ماکزیمم مجاز زاویه مورب سازی برای PM های ذوزنقه ای و مستطیلی شکل به ترتیب ۳۰ و ۲۵ درجه می باشد. نتایج بدست آمده از جدول ۲ به شرح زیر ارائه می شوند:

 ۱) مولفه اصلی شار پیوندی با فاز استاتور در اثر مورب سازی قطب های PM کاهش می یابد.

۲) در خصوص ماشین AFPM بدون شیار با PM های دایره ای شکل، شار پیوندی با فاز استاتور دارای بالاترین مقادیر برای مولفه اصلی و بیشترین مقدار THD است.

۳) برای حالتی که از PM های ذوزنقه ای شکل با زاویه مورب سازی ۳۰ درجه استفاده شده است، شار پیوندی با فاز استاتور دارای کمترین مقدار THD است.

۴) ماشین AFPM با PM های ذوزنقه ای مورب شده نسب به حالتی که از PM های مستطیلی مورب شده استفاده می کند دارای نتایج بهینه تری برای شار پیوندی با فاز استاتور خواهد بود.

۵) در مجموع بهینه ترین نتایج برای شار پیوندی با فاز استاتور در حالتی حاصل می شود که ماشین AFPM بدون شیار از PM های سینوسی شکل استفاده کند.

در خصوص ماشین AFPM بدون شیار آنالیز شده، مدل FEM ۳ بعدی با PM های سینوسی شکل در نرم افزار Maxwell 14.0 در شکل ۱۰نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این مدل ۲EM ۳ بعدی از شرط مرزی insulating استفاده شده است، تعداد کل المان های مش برابر ۲۵۹۴۳۲، و در تکرار شماره ۴ نتایج مدل همگرا می شوند. برای این مدل از ماشین AFPM بدون شیار، قابلیت شوند. برای این مدل از ماشین AFPM بدون شیار، قابلیت اثرات لبه ای در شکل ۱۱ نشان داده شده و با نتایج TEM اثرات لبه ای در شکل ۱۱ نشان داده شده و با نتایج FEM ماشین AFPM بدون هسته استاتور، از یک مدل شبه ۳ بعدی بر پایه روش هیگ برای محاسبه مولفه اصلی چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی استفاده شده است.



(الف) دیسک استاتور با کلاف های مسی قالب گیری شده در اپوکسی



(پ) ساختار کلی

دقت بالای مدل تحلیلی ۳ بعدی پیشنهاد شده در این مقاله



(ب) دیسک رتور با قطب های آهنربایی



(ت) آزمایش بی باری



در این روش، هندسه ماشین به چندین ناحیه تقسیم شد و معادله لاپلاس در ناحیه فاصله هوایی به منظور محاسبه در مقایسه با مدل شبه ۳ بعدی ارائه شده در [۲۳]، در شکل ۱۲ نشان داده می شود. به منظور راستی آزمایی با نتایج عملی، مدل تحلیلی ۳ بعدی ارائه شده در این مقاله روی ماشین AFPM بدون شیار ساخته شده در [۲۴] اجرا می شود. مقایسه نتیجه تحلیلی ولتاژ القاء شده در فاز استاتور (شکل ۱۳– ب) با نتیجه عملی نظیر در شکل ۱۳– الف (با در نظر گرفتن ناحیه انتهای سیم بندی)، دقت بالای مدل تحلیلی ۳ بعدی ارائه شده در این مقاله را نشان می دهد. نمایی از بخش های مختلف ماشین AFPM بدون شیار ساخته شده در [۲۴] و اتصالات آزمایش بی باری، در شکل ۱۴ نشان داده می شود. در پایان، فلوچارت کلی مربوط به روش تحلیلی ۳ بعدی ارائه شده به منظور محاسبه شار پیوندی با فازهای استاتور در شکل ۱۵ نشان داده می شود.

۵-نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل تحلیلی ۳ بعدی سریع و جدید بر پایه پتانسیل مغناطیسی اسکالر برای آنالیز الکترومغناطیسی ماشین های AFPM بدون شیار ارائه شد. ماشین های AFPM همزمان با سینوسی تر کردن شار پیوندی با فازهای استاتور تا حدودی نیز منجر به کاهش دامنه مولفه اصلی آن نیز می شود. در حالت کلی این نتیجه را می توان گرفت که در حالتی که ماشین AFPM بدون شیار از PM های سینوسی شکل استفاده می کند، بهینه ترین نتیجه برای شار پیوندی با فاز های استاتور حاصل می شود به این صورت که همزمان دارای دامنه مولفه اصلی بالا و مقدار کم برای THD است. در کارهای انجام شده در آینده، امکان توسعه این مدل تحلیلی ۳ بعدی به منظور در نظر گرفتن اثر شیار وجود دارد.

مولفه های میدان مغناطیسی فاصله هوایی حل شد. به منظور لحاظ کردن اثرات ناشی از شکل PM ها و مورب سازی، توزیع ۳ بعدی مغناطیس شوندگی PM ها بر حسب سری فوریه – بسل بیان شد. به همین خاطر، جواب عمومی معادله لايلاس نيز بر حسب سرى فوريه – بسل بيان شد. مدل تحلیلی ارائه شده برای محاسبه شار پیوندی با فازهای استاتور با در نظر داشتن شکل های مختلف برای PM ها و همچنین با لحاظ کردن اثر مورب سازی استفاده شد. همچنین نشان داده شد که اثر مورب سازی PM ها در

مراجع

- [1] Y. Liu, Z. Zhang, C. Wang, W. Geng, and T. Yang. "Design and analysis of oil-immersed cooling stator with nonoverlapping concentrated winding for high-power ironless stator axial-flux permanent magnet machines". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 68, no. 4 (2021): 2876-2886.
- [2] N. Taran, V. Rallabandi, G. Heins, D. M. Ionel. "Coreless and conventional axial flux permanent magnet motors for solar cars". *IEEE Trans. Ind. Appl.* 54, no. 6 (2018): 5907-5917.
- [3] T. F. Chan, W. Wang, and L. L. Lai. "Performance of an Axial-Flux Permanent Magnet synchronous generator from 3-D Finite-Element Analysis". *IEEE Trans. Energy Convers.* 25, no. 3 (2010): 669-676.
- [4] D. Talebi , M. C. Gardner , S. V. Sankarraman , A. Daniar , and H. A. Toliyat. "Electromagnetic design characterization of a dual rotor Axial Flux Motor for electric aircraft". *IEEE Trans. Ind. Appl.* 58, no. 6 (2022): 7088-7098.
- [5] E. Ajily, K. Abbaszadeh, and M. Ardebili. "Three-dimensional field reconstruction method for modeling axial flux permanent magnet machines". *IEEE Trans. Energy Convers.* 30, no. 1 (2015): 199-207.
- [6] W. Cheng, G. Cao, Z. Deng, L. Xiao, and M. Li. "Torque comparison between slotless and slotted ultra-high speed AFPM motors using analytical method". *IEEE Trans. Magn.* 58, no. 2 (2022).
- [7] A. Parviainen, M. Niemelä, and J. Pyrhönen. "Modeling of axial flux permanent-magnet machines". *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 40, no. 5 (2004): 1333-1340.
- [8] H. Zhao, K. T. Chau, T. Yang, Z. Song, and C. Liu. "A novel quasi-3D analytical model for axial flux motors considering magnetic saturation". *IEEE Trans. Energy Convers.*, 37, no. 2 (2022): 1358-1368.
- [9] T. Lubin and A. Rezzoug. "3-D Analytical model for axial-flux eddy-current couplings and brakes under steadystate conditions". *IEEE Trans. Magn.* 51, no. 10 (2015).
- [10] S. Taghipour Boroujeni, A. Abedini Mohammadi, A. Oraee, and H. Oraee, "Approach for analytical modelling of axial-flux PM machines", *IET Electr. Power Appl.* 10, no. 6 (2016): 441-450.
- [11] J. Si, M. Huang, R. Nie, C. Gan, and Y. Han. "Inductance calculation and analysis of axial-flux slotless surfacemounted permanent magnet machine with equidirectional toroidal winding". *IEEE Trans. Energy Convers.* 39, no. 3 (2024): 1509-1519.
- [12] W. Tong, D. Cai, and S. Wu. "An improved subdomain model for optimizing electromagnetic performance of AFPM machines". *IEEE Trans. Ind. Appl.* 60, no. 6 (2024): 8745-8754.
- [13] B. Guo, Z. Djelloul-Khedda, and F. Dubas. "Nonlinear analytical solution in axial flux permanent magnet machines using scalar potential". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 71, no. 4 (2024): 3383-3393.
- [14] Y. Kano, T. Kosaka, and N. Matsui. "A simple nonlinear magnetic analysis for axial-flux permanent-magnet machines". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 57, no. 6 (2010): 2124-2133.
- [15] A. Hemeida, A. Lehikoinen, P. Rasilo, H. Vansompel, A. Belahcen, A. Arkkio, and P. Sergeant. "A simple and efficient quasi-3D magnetic equivalent circuit for surface axial flux permanent magnet synchronous machines". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 66, no. 11 (2019): 8318-8333.
- [16] O. Taqavi and N. Taghavi. "Development of a mixed solution of maxwell's equations and magnetic equivalent circuit for double-sided axial-flux permanent magnet machines". *IEEE Trans. Magn.* 57, no. 4 (2021).
- [17] S. Y. Sung, J. H. Jeong, Y. S. Park, J. Y. Choi, and S. M. Jang. "Improved analytical modeling of axial flux machine with a double-sided permanent magnet rotor and slotless stator based on an analytical method". *IEEE Trans. Magn.* 48, no. 11 (2012): 2945-2948.

- [18] W. Deng and S. Zuo. "Analytical modeling of the electromagnetic vibration and noise for an external rotor axial flux in-wheel motor". IEEE Trans. Ind. Electron. 65, no. 3 (2018): 1991-2000.
- [19] R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, and H. Oraee. "Development of a three-dimensional magnetic equivalent circuit model for axial flux machines". IEEE Trans. Ind. Electron. 67, no. 7 (2020): 5758-5767.
- [20] T. Okita, and H. Harada. "3-D analytical model of axial-flux permanent magnet machine with segmented multipole-halbach array". IEEE Access 11 (2023): 2078-2091.
- [21] C. Diao, W. Zhao, L. Li, S. Kumar, and B. Kwon. "Analytical calculation of slotless axial flux permanent magnet motor with sinusoidal magnets for torque ripple reduction". IEEE Trans. Magn. 60, no. 12 (2024).
- [22] N. Alatawneh and P. Pillay, "Rotational Core Loss and Permeability Measurements in Machine Laminations with Reference to Permeability Asymmetry". IEEE Trans. Magn. 48, no. 4 (2012): 1445-1448.
- [23] Z. Frank and J. Laksar. "Analytical design of coreless Axial-Flux Permanent Magnet machine with planar coils". IEEE Trans. Energy Convers. 36, no. 3 (2021): 2348-2357.
- [24] S. G. Min. "Analytical design and optimization of Axial Flux Permanent Magnet machines with slotless structure". IEEE Trans. Transport. Electrific. 8, no. 2 (2022): 1994-2004.