

## طراحی ژنراتور الکتریکی سه فاز مغناطیس دائم سنکرون به روش اجزای محدود و بررسی اثر فاصله هوایی برای دستیابی به مشخصات مطلوب ژنراتور

زهرا حیدران داروقه امنیه<sup>۱</sup>، محمد رضایی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دولت آباد، گروه برق، اصفهان، ایران z.heidaran@iauda.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دولت آباد، گروه برق، اصفهان، ایران m.rezaie405@gmail.com

**چکیده:** هدف این مقاله طراحی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم سه فاز و بررسی اثر فاصله هوایی برای دستیابی به مشخصات مطلوب ژنراتور می‌باشد. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری PMxprt ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با فاصله هوایی متفاوت طراحی شده و نتایج هر کدام از طراحی‌ها در حالت بار کامل ارائه شده است، سپس برای مقایسه روش عددی و روش تحلیلی در شبیه‌سازی، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در شرایط متفاوت با استفاده از نرم‌افزار Maxwell 3D طراحی و به روش اجزای محدود مورد تحلیل الکترومغناطیسی در حالت گذرا قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر اندازه فاصله هوایی نمای توزیع چگالی شار و عملکرد ژنراتور تغییر قابل توجهی یافته است. بنابراین با انتخاب صحیح اندازه فاصله هوایی می‌توان به مشخصات مطلوب ژنراتور دست یافت.

واژگان کلیدی: اجزای محدود- فاصله هوایی- ژنراتور مغناطیس دائم

ولتاژ و فرکانس باید ۱۵۰۰ دور بچرخند. از مزایای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم نسبت به ژنراتورهای معمولی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- ✓ دور بسیار پایین برای ایجاد توان نسبت به دیگر ژنراتورها
- ✓ راندمان بالا بیش از ۹۰٪ که بقیه ژنراتورها راندمانی در حدود ۶۵ الی ۷۰ درصد را دارا می‌باشند.
- ✓ ایجاد توان راکتیو نسبت به ژنراتورهای آسنکرون
- ✓ تعمیر و نگهداری خیلی کمتر نسبت به دیگر ژنراتورها
- ✓ نسبت ابعاد کمتر نسبت به موارد مشابه

کاربرد این ژنراتور در توربین های بادی می‌باشد به طوری که ژنراتورهای مورد استفاده در نسل قبلی توربین‌های بادی از نوع آسنکرون می‌باشد که برای ایجاد ولتاژ و فرکانس مورد نظر از گیربکس استفاده می‌شد. با استفاده از این ژنراتور دیگر احتیاج به گیربکس نیست و پره بطور مستقیم به ژنراتور متصل می‌شود.

### ۱- مقدمه

ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSG<sup>۱</sup>) از دو قسمت اصلی زیر تشکیل شده‌اند. الف) قسمت ساکن به نام استاتور ب) قسمت گردان بنام آرمیچر یا القاء شونده (اندوئی) که عمل تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی در ژنراتورها را انجام می‌دهد. بین قسمت ساکن و گردان فاصله هوایی وجود دارد. از جمله مزیت‌های این ژنراتورها: برتری چگالی وزن در واحد توان خروجی آن است [۱ و ۲].

یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی بادی است از آنجایی که استفاده از انرژی باد بوسیله توربین‌های بادی موجود از طرفی به خاطر وجود گیربکس هزینه بر و از سوی دیگر هزینه تعمیر و نگهداری آن بخاطر وجود گیربکس خاص آن، بالا می‌باشد. با وجود این ژنراتور علاوه بر کاهش هزینه ساخت تعمیر و نگهداری آن به میزان ۸۰٪ کاهش می‌یابد.

موضوع مورد مطالعه در این مقاله طراحی یک ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم می‌باشد که قادر است با دوران ۵۰۰ دور بر دقیقه ولتاژ سه فاز ۳۸۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز تولید نماید. این در صورتی است که ژنراتورهای دیگر برای تولید این

همچنین رابطه بین  $H$  و  $B$  به صورت زیر بیان می شود:

$$H = r.B \quad (5)$$

که  $r$  ضریب مقاوت مغناطیس و مقدار آن  $r = \frac{1}{\mu}$  می باشد.

با جایگذاری معادلات (۴) و (۵) در معادله (۳)، معادله اساسی بردار پتانسیل برای میدان مغناطیسی به صورت زیر حاصل می شود.

$$\nabla \times (r \cdot \nabla \times A) = J \quad (6)$$

به دلیل اینکه نرم افزار Maxwell 3D توانایی حل معادلات الکترومغناطیسی و معادلات دینامیکی، مکانیکی را دارد، از این نرم افزار برای طراحی و تحلیل مدار مورد نظر استفاده شده است. برای تحلیل مدل در ابتدا سیستم یک مش اولیه از مسئله ایجاد می کند و سپس پارامترهای مورد نیاز و تغییرات انرژی نسبت به مرحله قبل را محاسبه می کند. در مرحله بعد تغییرات انرژی را با درصد خطای انرژی مقایسه می کند. اگر تغییرات انرژی کمتر از مقدار درصد خطای تعیین شده باشد فرایند حل میدان پایان می یابد در غیر این صورت سیستم به مرحله بعد می رود و عناصر با بیشترین خطای انرژی پالایش می شود (به عناصر کوچک تر تقسیم شده) و مسئله دوباره حل می شود. سیستم این فرایند را تا زمانی که شرایط پایان برنامه حاصل شود ادامه می دهد. شکل (۱) الگوریتم طراحی و بهینه سازی ژنراتور در نرم افزار ماکسول را نمایش می دهد.

از آنجائیکه گزارشات انجام شده در این مقاله یک کار بین رشته ای می باشد. لذا یک تیم دو نفره متشکل از مهندسی برق و الکترونیک تشکیل شد و با تلاش های زیاد منابع موجود از مقالات مختلف IEEE, ... جمع آوری گردیده است. مباحثی که در زیر می آید نتیجه حدود ده ماه کار گروهی برای انجام گزارشات و نتایج حاصل در این مقاله می باشد.

## ۲- محاسبه ژنراتور الکتریکی مغناطیس دائم

### سنکرون به روش تحلیل اجزاء محدود

برای بررسی رفتار موتور جریان مستقیم به روش های تحلیلی زیادی وجود دارد که می توان به روش تفاضل محدود (FDM)، روش اجزای محدود (FEM) و روش المان مرزی (BEM) اشاره کرد [۳ و ۴]. در این مقاله از روش اجرای محدود (FDM) استفاده شده است. میدان مغناطیسی در موتور الکتریکی توسط معادلات ماکسول به صورت زیر بیان می شود [۵ و ۶].

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times H = j \quad (3)$$

در معادلات بالا،  $B$  چگالی شار میدان مغناطیس،  $H$  شدت میدان مغناطیس و  $j$  چگالی جریان و  $E$  میدان الکتریکی است. معمولاً برای حل معادلات میدان باید آنها را بر حسب بردار پتانسیل  $A$  بیان کرد. در این صورت چگالی شار میدان مغناطیس  $B$  را می توان بر حسب بردار پتانسیل  $A$  به صورت زیر نوشت.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

این پارامترها به ترتیب هندسی و الکتریکی می باشند. پارامترهای هندسی: عبارتند از قطر، طول آرمیچر و استاتور مورد نظر می باشد [۹]. یکی از مهم ترین پارامترهای تاثیر گذار در طراحی ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم، قطر خارجی روتور است. قطر خارجی روتور تاثیر گذار در سرعت خطی، اندازه قوس گام قطبی، تعداد شیارهای استاتور، گام دندان، طول روتور، قطر متوسط طوقه و پارامترهای وابسته به این پارامترها می باشد. در بحث محاسبه طول و قطر روتور ملاحظات مکانیکی حائز اهمیت است. زیرا سرعت ژنراتور مورد محاسبه همواره معلوم است لذا قطر انتخابی نباید ژنراتور را به طرف نیروهای گریز از مرکز رهنمون سازد. پارامترهای الکتریکی: این پارامترها بسیار متعدد هستند که به ترتیب زیر می توانیم انتخاب نماییم [۸].

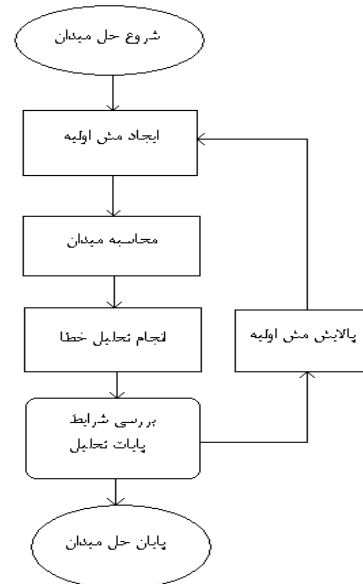
اندوکسیون در فاصله هوایی، آمپر هادی بر متر یا الکتریکال لودینگ که با  $A[ac/m]$  مشخص می شود، تعداد زوج قطب، توان موتور، چگالی جریان در هادی ها، اندوکسیون ها در قسمت های مختلف مدار فرومغناطیسی و نوع سیم بندی بکار رفته شده.

جدول (۱): پارامترهای موتور آهنربا دائم سنکرون

| پارامترهای اصلی موتور |                   |
|-----------------------|-------------------|
| ژنراتور               | نوع ماشین         |
| ۸۰۷                   | توان خروجی (w)    |
| ۳۸۰                   | ولتاژ خروجی (v)   |
| ۱۰                    | تعداد قطب اصلی    |
| ۵۰۰                   | سرعت نامی (r.p.m) |
| توربین بادی           | نوع بار           |
| داخلی                 | نوع آهنربا روتور  |
| ۷۵                    | دمای کارکرد (c°)  |

#### ۴- شبیه سازی، بهینه سازی و آزمایش ژنراتور

نرم افزار MAXWELL توانایی حل معادلات الکترومغناطیسی و معادلات دینامیکی، مکانیکی را دارد. از این نرم افزار برای طراحی و تحلیل مدل مورد نظر استفاده شده است. در این قسمت اندازه فاصله هوایی به روش اجزای محدود برای سه



شکل (۱): الگوریتم طراحی و بهینه سازی ژنراتور در نرم افزار ماکسول

#### ۳- پارامترهای استخراجی مدل

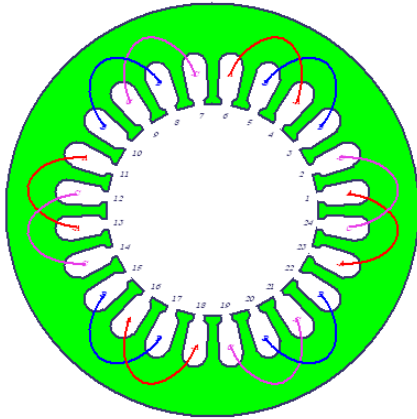
در این بخش پارامترهای اصلی طرح پیشنهادی و قوانین عمومی مربوط به ابعاد، شرح داده شده است و پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی، مطابق جدول (۱) است.

#### الف) داده های مدل

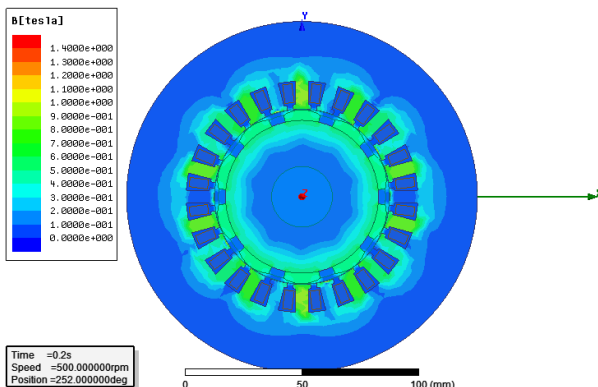
پارامترهای اصلی یک ژنراتور عبارتند از: قدرت مفید، تعداد دور موتور و ولتاژ خروجی است. نکته دیگری که باز بدان باید توجه کرد موضوع کار ماشین در قدرتی بالاتر از قدرت نامی یا پایین تر از قدرت نامی می باشد که اگر در محاسبات ملاحظه و رعایت حالت را نماییم در این صورت ابعاد ماشین بزرگتر و قیمت آن افزونتر خواهد شد. و چنانچه حالت دوم (قدرتی پاییت تر از قدرت نامی) را در نظر بگیریم، با ابعاد کوچکتری سر و کار خواهیم داشت که موتور محاسبه شده در این ابعاد وقتی با قدرت نامی معین کار نماید درجه گرمای موتور آنقدر افزایش خواهد یافت که از درجه حرارت نامی و قابل تحمل انواع عایق های بکار رفته فزونی گرفته و موجب سوختن آنها می گردد [۷].

#### ب) پارامترهای اصلی ابعاد

نمای سه بعدی ژنراتور در این حالت را نمایش می دهد. شکل (۸) نمودار جریان های سه فاز و شکل (۹)  $back-emf^1$  و توزیع فضایی شار در فاصله هوایی را نمایش می دهد. نتایج در این حالت مشخص است، چگالی شار در فاصله هوایی به  $0.9/0.3$  تسلا رسیده است که باعث بهبود عملکرد ژنراتور می شود. در نتیجه در این حالت هسته ژنراتور به اشباع نرسیده است. نتایج کلی در این حالت بیانگر شرایط کاری مناسب ژنراتور می باشد.



شکل (۳): نمای شیارهای استاتور و اتصالات فازها در حالت نامی

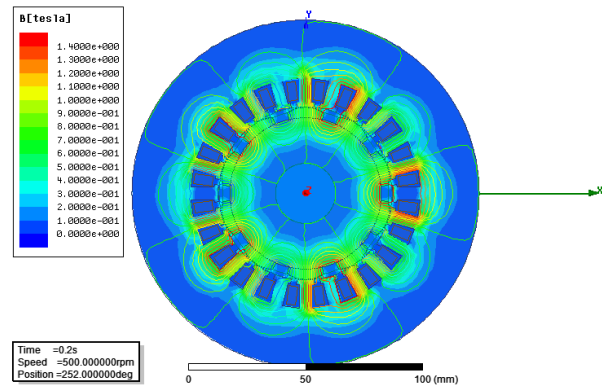


شکل (۴): نمای توزیع چگالی شار در حالت نامی

حالت بررسی شده است. کلیه شبیه سازیها با استفاده از داده های جدول (۱) بدست آمده است و همچنین کلیه پارامترهای استخراجی در ضمیمه این مقاله آورده شده است. نتایج حاصل در شکل های (۱) الی (۱۰) و در جدول های (۲) الی (۴) آورده شده است.

### حالت اول: اندازه فاصله هوایی ۰٫۶ میلیمتر

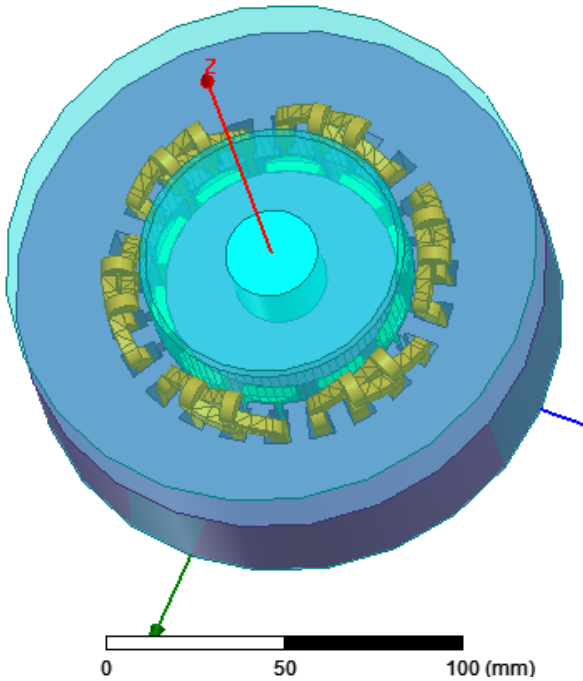
در این حالت ژنراتور با اندازه فاصله هوایی ۰٫۶ میلیمتر طراحی شده است. با کاهش فاصله هوایی، افزایش شار بوجود خواهد آمد. شکل (۲) نمای توزیع چگالی شار ژنراتور را در این حالت نمایش می دهد که رنگ قرمز نشان دهنده بیشترین چگالی شار و رنگ آبی نشان دهنده کمترین چگالی شار می باشد. همان طور که در شکل مشخص است، بیشترین اندازه چگالی شار در محل دندانها و در مجاورت فاصله هوایی می باشد و هسته ژنراتور دچار پدیده اشباع مغناطیسی شده است که این حالت برای ژنراتور مطلوب نمی باشد.



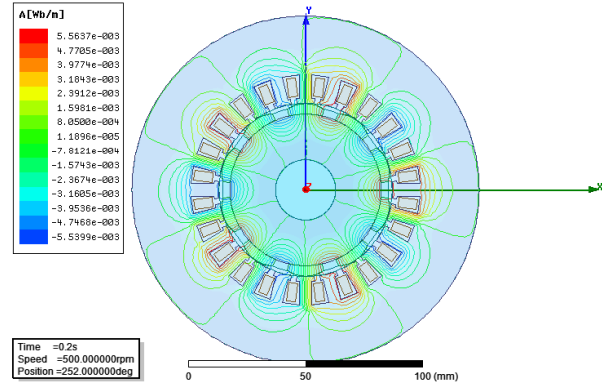
شکل (۲): نمای توزیع چگالی شار و فوران های ژنراتور با فاصله هوایی ۰٫۶ میلیمتر

### حالت دوم: اندازه فاصله هوایی ۰٫۸ میلیمتر

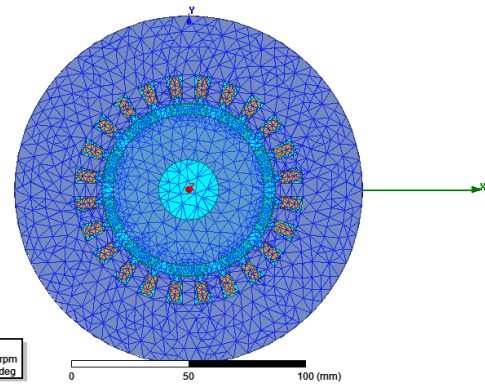
در این حالت اندازه فاصله هوایی ژنراتور را با ۰٫۸ میلیمتر مجددا طراحی شده است. شکل (۳) نمای اتصالات فازها در استاتور ژنراتور را نمایش می دهد. شکل های (۴) و (۵) به ترتیب نمای توزیع چگالی شار و فوران های ژنراتور را نمایش می دهد. شکل (۶) مدل مش گذاری شده سیستم و شکل (۷)



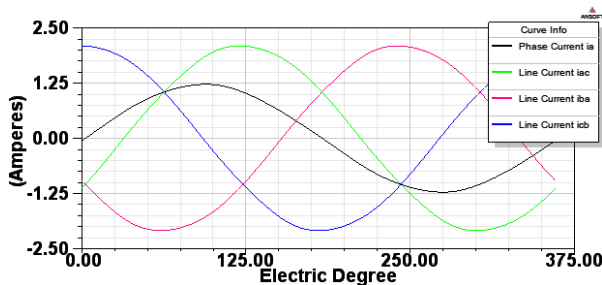
شکل (۷): نمای سه بعدی ژنراتور در حالت نامی



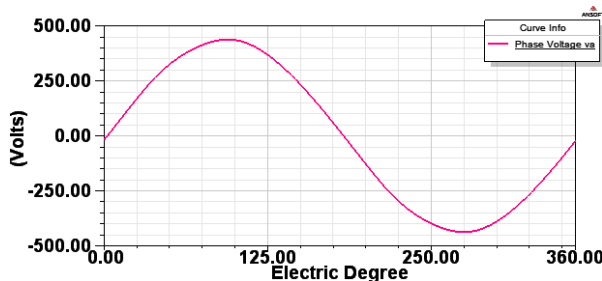
شکل (۵): نمای فوران های موتور در حالت نامی



شکل (۶): مدل مش گذاری شده ژنراتور در حالت نامی



شکل (۸): جریان های فازها بر حسب درجه



شکل (۹): back-emf و توزیع فضایی شار در فاصله هوایی

حالت سوم: اندازه فاصله هوایی ۱ میلیمتر

<sup>1</sup> Back Electromotive Force

در طراحی ماشین های الکتریکی می یابست مسائل و محدودیت های الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی را مورد توجه قرار داد. بنابراین رسیدن به یک طرحی قابل قبول مستلزم تکرارهای محاسباتی زیادی است. استفاده از نرم افزارها و کامپیوترهای جدید همچنین بهره گیری از روش محاسباتی پیشرفته این امکان را بوجود می آورد که به توان رفتار ژنراتور را به دقت مدل کرد و طرح های جدید را به سرعت ارزیابی نمود. از نتایج حاصل از شبیه سازی ژنراتور به روش اجزای محدود و در حالت گذرا مشخص است که با کاهش اندازه فاصله هوایی نمای توزیع چگالی شار ژنراتور به نقاط اشباع مغناطیسی می رود و با افزایش اندازه فاصله هوایی، اندازه جریان فازهای کاهش می یابد. از شبیه سازی ژنراتور در حالت با کامل مشخص است که انتخاب بهینه اندازه فاصله هوایی نقش مهمی در افزایش راندمان و بهبود توزیع چگالی شار در حالت گذرا ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم خواهد داشت.

## ۶- مراجع

[1] Z. Heidaran and M. Rezaie "Design, analys and optimization in permanent magnet synchronous motor (PMSM)" the international conference on non- linear systems and optimization in computer and electrical engineering on 26-27 may, 2015 Dubai international academic city

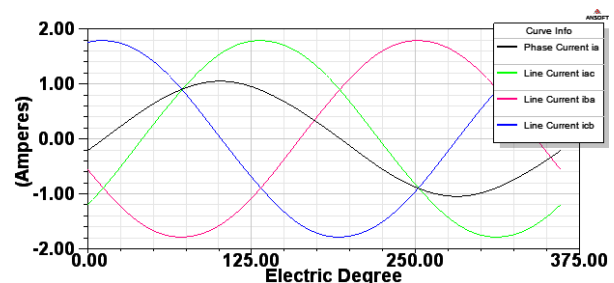
[2] M.R. soheily and M. Rezaie "Design, analysis and study effect of the armature slot model and appropriateness of the slot size in optimizing the efficiency and magnetic design of Dc motor" Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal (CSJ), Vol. 36, No: 3 Special Issue (2015) ISSN: 1300-1949

[3] F. Zhang, N. Neuberger, E. Nolle, P. Gruenberger, F. Wang, "A new type of induction machine with inner and outer double rotors", IEEE Int. Con. on Power Elec. and Motion Control, Vol. 1, pp. 286-289, Jan. 2004.

[4] K.T. Chau, Y.B. Li, J.Z. Jiang, S.X. Niu, "Design and control of a PM brushless hybrid generator for wind power application", IEEE Trans. on Mag., Vol. 42, No. 10, pp.349-356,6-8 Sept. 2006.

[5] D. Zhang, K.T. Chau, S. Niu, J.Z. Jiang, "Design and analysis of a double-stator cup-rotor PM integrated

در این حالت ژنراتور با اندازه فاصله هوایی ۱ میلی متر طراحی شده است. با افزایش فاصله هوایی، کاهش شار بوجود خواهد آمد. شکل (۱۰) نمودار جریان های فازها بر حسب را در این حالت نمایش می دهد که نسبت به حالت دوم، ۳/۵ آمپر افت جریان داشته است. در این حالت اندازه چگالی شار به کمتر از ۰/۷ تسلا رسیده ولی اندوکتانس نشتی افزایش یافته است که این حالت مناسب برای دسترسی به مشخصات مطلوب ژنراتور نمی باشد.



شکل (۱۰): جریان های فازها بر حسب درجه با فاصله هوایی ۱ میلی متر

از مقایسه ۳ حالت در نظر گرفته شده برای شبیه سازی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به روش تحلیلی مشخص است که تعیین مناسب اندازه فاصله هوایی نقش مهمی در بهبود و افزایش راندمان در ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم دارد. همچنین از مقایسه سه حالت طراحی شده به روش اجزای محدود شده مشخص است که با تغییر اندازه فاصله هوایی چگالی شار در فاصله هوایی ژنراتور تغییر یافته است و مناسب ترین چگالی شار و کمترین اندوکتانس نشتی در حالت دوم حاصل شده است.

البته برای بهبود بیشتر عملکرد ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم پارامترهای دیگری نظیر ساختار، جنس و ضخامت آهنربای دائم استفاده شده بر روی روتور، مدل شیار استاتور و یا تعداد قطب نیز می تواند مورد بررسی قرار گیرد که در این مقاله این پارامترها بصورت بهینه شده لحاظ شده است.

## ۵- نتیجه گیری





چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق



۲۰۱۳ و آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

startergenerator", IEEE IAS Annual Meeting, pp. 20-26, Feb.2006.

[6] Y. Zhang, K.T. Chau, J.Z. Jiang, D. Zhang, "A finite element analytical method for electromagnetic field analysis of electric machines with free rotation", IEEE Trans. on Mag., Vol. 42, No. 10, pp. 303-309, Jan. 2006.

[7] P. CKrause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill, USA, pp.67-121, 2004.

[8] Jafarboland, M, Sadati, N., Momeni, H., R., "Robust Tracking Control of Attitude Satellite with Using New SMC and EKF for Large Maneuvers," IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, March 4-11, 2006