محاسبه نیروی محرکه القایی در ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا به روش تحلیلی

وحيد نائيني'، استاديار؛ يوسف شهبازي آيت'، همكار تحقيقاتي

۱ – دانشکده فنی و مهندسی – دانشگاه ملایر – ملایر – ایران – vnaeini@malayeru.ac.ir ۲ – دانشکده فنی و مهندسی – دانشگاه ملایر – ملایر – ایران– ایران – yusef.shahbazi@gmail.com

چکیده: در این مقاله یک روش تحلیلی برای محاسبه نیروی محرکه القایی در سیمپیچی استاتور ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا ارائه شدهاست. در این روش از پتانسیل مغناطیسی اسکالر برای محاسبه چگالی شارمغناطیسی در فاصله هوایی و ناحیه سیمپیچی استاتور استفاده شدهاست. معادله لاپلاس در نواحی مختلف ماشین حل شده و پتانسیل مغناطیسی اسکالر بهدست آمدهاست، سپس چگالی شار مغناطیسی از روی پتانسیل مغناطیسی اسکالر، در فاصله هوایی محاسبه شدهاست. درنهایت نیروی محرکه القایی در سیمپیچهای استاتور معاسبه شده تحلیلی دارای زمان محاسباتی بسیار کمتری نسبت به نرمافزارهای المان محدود میباشد، ازاینرو میتواند در طراحی و بهینهسازی ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت اعتبارسنجی نتایج روش تحلیلی ارائهشده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی انجام شدهاست.

واژههای کلیدی: ماشین شارمحوری، ماشین سنکرون بدون آهنربا، معادلات ماکسول، میدان مغناطیسی

Computation of the EMF in an Axial Flux PM less Machine using Analytical Method

Vahid Naeini¹, Assistant Professor; Yusef Shahbazi Ayat², Research Fellow

1- Department of Electrical Engineering, malayer university, Malayer, Iran, Email: Vnaeini@malayeru.ac.ir 2- Department of Electrical Engineering, malayer university, Malayer, Iran, Email: yusef.shahbazi@gmail.com

Abstract: In this paper an analytical method for electromotive force (EMF) calculation in an axial flux PM less machine is presented. The analytical method uses the scalar magnetic potential to calculate the magnetic flux density at air gap and winding regions. Laplace equation is solved in several regions of machine and the scalar magnetic potential is calculated, then the magnetic flux density is computed using scalar magnetic potential. Finally the EMF in the stator windings is calculated. This analytical method requires less computational time than conventional finite element methods and is therefore suitable for designing and optimization purposes. The proposed analytical model validated by comparing its results to corresponding 3D finite element analysis as well as experimental results.

Keywords: Axial flux machine, PM less synchronous machine, maxwell equations, magnetic field.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۳ و تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰ و ۱۳۹۷/۱۱/۲۱ نام نویسنده مسئول: وحید نائینی نشانی نویسنده مسئول: ایران – ملایر – کیلومتر ۵ جاده اراک – دانشگاه ملایر – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱– مقدمه

ماشینهای شار محوری بهعنوان ماشینهایی با چگالی توان بالا شناخته شدهاند که دارای ساختارهای متنوعی میباشند [۴–۱]. از ماشینهای شارمحوری بهطور فزایندهای در صنعت استفاده میشود که میتوان به کاربردهایی چون استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی و توربینهای بادی اشاره کرد[۷–۵].

در سالهای اخیر پیشنهادهایی برای ماشینهای سنکرون با دو تحریک جداگانه ارائه شدهاست. در ماشینهای تحریک دوگانه، میدان مغناطیسی روتور از دو منبع ناشی میشود، میدان اول ناشی از آهنرباهای دائم است که برروی روتور تعبیه شدهاند و میدان دوم ناشی از میدان کلاف میدان است که برروی استاتور قرار گرفتهاست. کلاف میدان توسط جریان DC تغذیه میشود. باتوجهبه جهت جریان DC، میدان کلاف میدان میتواند میدان ناشی از آهنرباهای دائم را تقویت یا تفعیف نماید [۸]. شکل ۱ نمونهای از این ساختار را نشان میدهد.



شکل ۱: ساختار ماشین سنکرون شارمحوری با تحریک دوگانه [۸]

باید توجه داشت که استفاده از آهنربا میتواند محدودیتهایی نیز بهدنبال داشتهباشد که میتوان به دمای کاری آهنرباها در محدوده خاص و نیز بحث تجزیه شیمیایی آهنربا اشاره نمود که منجر به ازبینرفتن خاصیت آهنربایی خواهندشد. همچنین باتوجهبه انحصاری بودن تولید آهنرباهای خاک کمیاب، قیمت این آهنرباها میتواند دستخوش تغییرات زیادی گردد و تحقیق برروی ساختار ماشین سنکرونی که فاقد آهنربا میباشد، مورد توجه محققین قرار گرفتهاست [۹]. شکل ۲ نمونهای از این ساختار را نشان میدهد. در این ساختار، آهنربایی وجود ندارد و میدان مغناطیسی روتور به طور کامل با استفاده از کلاف میدان که برروی استاتور تعبیه شدهاست، ایجاد میشود.



شکل ۲: ساختار ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا [۹]

در ساختار بدون آهنربا، باتوجه بهاین که جریان سیمپیچی DC واقع در استاتور جای گزین آهنرباها میشود، ساختار استاتور پیچیدهتر از ساختار استاتورهای مرسوم خواهد شد و مکانی برای تعبیه این سیمپیچی علاوهبر سیمپیچی ac سه فاز باید در نظر گرفته شود که موجب پیچیدهترشدن روند ساخت و حجیمشدن هسته استاتور می گردد. بزرگترشدن هسته استاتور موجب کاهش چگالی توان در واحد حجم ماشین در ساختار بدون آهنربا نسبت به ساختار با آهنربا میشود. همچنین وجود جریان CD موجب ایجاد تلفات در سیمپیچی می گردد که باعث افزایش تلفات مسی و کاهش بازده نسبت به ساختار با آهنربا

در طراحی و بهینهسازی این ماشین ها می توان از نرمافزارهای المان محدود استفاده کرد که به کمک آن ها می توان ساختارهای پیچیده ماشین را شبیه سازی نمود و نتایج بسیار دقیقی به دست آورد. اما پروسه شبیه سازی در نرمافزارهای المان محدود بسیار زمان بر می باشد. این موضوع در زمانی که بهینه سازی ماشین مدنظر است و شبیه سازی ها باید برای اشکال هندسی مختلف و متعدد ماشین انجام پذیرد، زمان بسیار بیشتری نیاز خواهدداشت چرا که روند مش بندی و تحلیل المان محدود برای هر تغییر در ماشین باید انجام شود.

برای تسریع در روند طراحی و فرآیند آنالیز حساسیت و درنهایت جهت انجام بهینهسازی میتوان از روشهای تحلیلی بهره برد که در سالهای اخیر موردتوجه مهندسین و طراحان ماشینهای الکتریکی قرار گرفتهاست [۱-۱۰]. در روش تحلیلی با استفاده از معادلات ماکسول میدان مغناطیسی فاصله هوایی باتوجه به ابعاد هندسی ماشین، محاسبه شده و به تبع آن، نیروی محر که القایی و گشتاور الکترومغناطیسی تعیین می گردند.

در این تحقیق یک روش تحلیلی برای محاسبه نیروی محرکه القایی در ماشینهای شارمحوری بدون آهنربا ارائه شدهاست که تاکنون تحقیقی در این زمینه ارائه نشدهاست. نتایج بهدستآمده با استفاده از روش تحلیلی ارائهشده با نتایج المان محدود و نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفتهاست.

۲- ساختار ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا و مفروضات مسئله

یک نمونه از ساختار ماشین شارمحوری بدون آهنربا در شکل ۳ نشان داده شدهاست. روتور شامل ۴ قطب میباشد که این قطبها بهصورت آهنربای الکتریکی میباشند. استاتور این نوع ماشین بهنحوی میباشد که دو نوع سیمپیچی برروی آن قرار گیرد که شامل سیمپیچی سهفاز و سیمپیچی میدان میباشد. با عبور جریان DC از سیمپیچی میدان، قطبهای روتور به آهنربای الکتریکی تبدیل میشوند.

مسیر عبور شارمغناطیسی ناشی از سیمپیچی میدان در شکل ۴ در دو حالت جریان مثبت و منفی اعمالی به سیمپیچی میدان نشان داده شدهاست.



شکل ۳: ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا [۹]

در روش تحلیلی برای کاهش پیچیدگی محاسبات مفروضاتی در نظر گرفته میشود که میتوان به موارد زیر اشاره نمود: - ضریب نفوذپذیری هستههای آهنی بینهایت میباشد و پدیده اشباع مغناطیسی وجود ندارد [10]. - از اثر جریان گردایی صرفنظر میشود [11].

- اثر شیارهای استاتور با استفاده از ضریب کارتر در نظر گرفته می شود [۱۲].



شکل ۴: مسیر عبور شارمغناطیسی در ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا

۳– محاسبه میدان مغناطیسی بیباری

برای محاسبه تحلیلی میدان میتوان ماشین را به چند ناحیه تقسیم نمود. شکل ۵ نواحی مختلف ماشین را نشان میدهد. در شکل ۵ یک وجه ماشین به نمایش گذاشته شدهاست و دندانههای استاتور با استفاده از ضریب کارتر لحاظ شدهاند. ماشین به چهار ناحیه یوغ روتور (I) ، ناحیه قطبهای آهنی (آهنرباهای الکتریکی) (II) ، ناحیه فاصله هوایی (III) و ناحیه یوغ استاتور (IV) تقسیم شدهاست. باتوجهبه ساختار ماشین که در بخش قبل ارائه شد، فاصله بین دو قطب همنام دو برابر گام قطب می باشد. ضخامت آهنرباهای الکتریکی برابر L_{pm} در نظر گرفته شدهاست. طول فاصله هوایی با لحاظ اثر دندانههای استاتور به کمک ضریب کارتر، L_{g} لحاظ شدهاست. فاصله بین یوغ روتور و یوغ استاتور هم با L_{t} نشان داده شدهاست.



شکل ۵: مدل دوبعدی ماشین

در این تحقیق برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی بیباری از پتانسیل مغناطیسی اسکالر استفاده شدهاست. توزیع بارهای مغناطیسی فرضی برروی سطح قطبهای روتور ماشین در شکل ۶ نشان دادهاست. باتوجهبه جهت جریان سیمپیچی DC در برخی بخشهای روتور قطب N و در برخی دیگر قطب S تشکیل میشود.



شکل ۶: توزیع بارهای مغناطیسی فرضی برروی قطبهای آهنی

شکلهای ۷ و ۸، توزیع بارهای مغناطیسی فرضی را برروی سطح قطبهای روتور بهصورت دوبعدی نشان میدهد. مقدار این بارهای مغناطیسی فرضی تابع جریان سیمپیچی میدان خواهدبود و شارمغناطیسی توسط این بارهای مغناطیسی فرضی تولید میشود.



شکل ۸: بارهای مغناطیسی فرضی برروی قطبهای S

قطب N با بارهای مغناطیسی فرضی مثبت و با چگالی σ_+ در نظر گرفته شدهاست. همچنین قطب S با بارهای مغناطیسی فرضی منفی و با چگالی σ_- درنظر گرفته شدهاست. با استفاده از بسط سری فوریه، توزیع بارهای مغناطیسی فرضی برروی قطبها میتواند به صورت رابطه (۱) بیان شود.

$$\sigma_{+}(x) = \frac{B_{m} \alpha_{p}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2B_{m}}{n\pi\mu_{0}} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_{p}}{2}\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_{p}}x\right) \right)$$
$$\sigma_{-}(x) = \frac{-B_{m} \alpha_{p}}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2B_{m}}{n\pi\mu_{0}} \times \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_{p}}{2}\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_{p}}x\right) \right)$$
(1)

که در آن، μ_0 ضریب نفوذ پذیری خلاً، τ_p گام قطب، α_p نسبت قوس قطب به گام قطب ماشین می باشند. B_m ، چگالی شار مغناطیسی حاصل از جریان سیم پیچی میدان، در سطح آهن رباهای الکتریکی روتور می باشد که وابسته به نیروی محرکه الکتریکی سیم پیچی میدان است و از مدار معادل مغناطیسی قابل محاسبه است که به صورت رابطه زیر قابل بیان است:

$$B_m = \frac{N I_{dc}}{R_m A_p} \tag{(Y)}$$

کهدرآن، N تعداد دور سیمپیچی DC استاتور، I_{dc} جریان سیمپیچی DC معاومت مغناطیسی مسیر و A_p سطح مقطع هر قطب میباشد. باید توجه داشت که B_m ، برای آهنربای الکتریکی مشابه چگالی شار باقی مانده برای آهنرباهاست. همچنین برای ساختار هندسی و تعداد دور مشخص از سیمپیچی B_m , DC به مورت تابعی از I_{dc} قابل بیان میباشد.

توزیع بارهای مغناطیسی فرضی برروی سطح روتور بهصورت مجموع بارهای مغناطیسی مثبت و منفی میباشد. با لحاظ مکان هرکدام از بارهای مثبت و منفی، توزیع کل بارهای مغناطیسی فرضی بهصورت زیر نتیجه میشود:

$$\sigma_t(x) = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \frac{4B_m}{n\pi\mu_0} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_{pi}}{2}\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}}x\right)$$
(°)

باتوجهبه عدم وجود جریان الکتریکی در ناحیه روتور و فاصل هوایی در محاسبه چگالی شار مغناطیسی بیباری، پتانسیل مغناطیسی اسکالر در معادله لاپلاس صدق میکند که در حالت دوبعدی و در دستگاه مختصات دکارتی بهصورت (۴) میباشد[۱۱]:

$$\frac{\partial^2 V_m}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial^2 z} = 0 \tag{(f)}$$

کهدرآن V_m، پتانسیل مغناطیسی اسکالر، x و z بهترتیب راستای محیطی و محوری دستگاه مختصات میباشند. مؤلفههای میدان مغناطیسی طبق (۵) و (۶)، با پتانسیل مغناطیسی اسکالر در ارتباط هستند[۱۱].

$$H_x = -\frac{\partial V_m}{\partial x} \tag{(b)}$$

$$H_z = -\frac{\partial V_m}{\partial z} \tag{9}$$

کهدر روابط فوق، H_{z} و H_{z} بهتر تیب مؤلفه محیطی و مؤلفه محوری میدان مغناطیسی میباشند.

با استفاده از روش جداسازی متغیرها و باتوجه به نحوه توزیع چگالی بار مغناطیسی در راستای محیطی که بهصورت تابعی زوج میباشد، در ناحیه (II) و (III) جواب کلی معادله لاپلاس بهصورت (Y) و (۸) می باشد.

$$V_{m2}(x,z) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(A_n \sinh(\frac{n\pi}{\tau_{pi}}z) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}}x\right) \right)$$
(V)
$$V_{m3}(x,z) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(B_n \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}}(z-L_t)\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}}x\right) \right)$$
(A)

ضرایب A_n و B_n در روابط بالا می توانند با استفاده از شرایط مرزی بهدست آیند.

۳-۱ محاسبه ضرایب ثابت با استفاده از شرایط مرزی

باتوجه به فرض بی نهایت بودن ضریب نفوذ پذیری هسته های آهنی رو تور و استاتور، میدان مغناطیسی در ناحیه (I) و (IV) شکل(۴)، صفر می باشد. صفر بودن میدان مغناطیسی، یک پتانسیل مغناطیسی اسکالر ثابت را نتیجه می دهد که این مقدار ثابت می تواند برابر صفر لحاظ شود ($V_{m1} = V_{m4} = 0$). باید توجه داشت که برای محاسبه میدان مغناطیسی تغییرات پارامتر پتانسیل مغناطیسی مهم می باشد و مقدار آن در محاسبات نقشی ندارد.

$$V_{m2}(x, z=0) = V_{m1}(x, z=0)$$
(9)

$$V_{m3}(x, z = L_t) = V_{m4}(x, z = L_t)$$
(1.)

$$V_{m2}(x, z = L_{pm}) = V_{m3}(x, z = L_{pm})$$
(11)

در روابط فوق، V_{m1} ، V_{m2} ، V_{m4} و V_{m4} بەترتیب پتانسیل مغناطیسی در نواحی (I)، (II)، (II) و (IV) میباشند. هم چنین L_{pm} ، ضخامت قطب آهنرباهای الکتریکی و L_t فاصله میان یوغ روتور و یوغ استاتور میباشند. یکی دیگر از شرایط مرزی در ناحیه بین (II) و (III) از برابری مؤلفههای عمودی چگالی شار مغناطیسی بهدست می آید که بهصورت زیر قابل بیان است [10]:

$$-\frac{\partial V_{m3}}{\partial z}(x, z = L_{pm}) = \sigma_t(x)$$
(17)

با استفاده از شرایط مرزی، ضرایب A_n و B_n به صورت روابط زیر حاصل می شوند:

$$A_{n} = \frac{4B_{0}\tau_{pi}}{\left(n\pi\right)^{2}\mu_{0}} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_{pi}}{2}\right) \times \tanh\left(\frac{n\pi L_{g}}{\tau_{pi}}\right) \times \sinh\left(\frac{n\pi L_{pm}}{\tau_{pi}}\right)$$
(1°)

$$B_n = -\frac{4B_0 \tau_{pi}}{\left(n\pi\right)^2 \mu_0} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_{pi}}{2}\right) \times \frac{1}{\cosh\left(\frac{n\pi L_g}{\tau_{pi}}\right)}$$
(14)

درنهایت بعد از مشخص شدن ضرایب A_n و R_n ، پتانسیل مغناطیسی در نواحی (II) و (II) مشخص خواهد شود. مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد: $B_{z\,3} = -\mu_0 \frac{\partial V_{m3}}{\partial \tau}$ (۱۵)

۴- محاسبه تحلیلی نیروی محرکه القایی

هارمونیکهای مختلف نیروی محرکه القایی برای هر فاز ماشین که توسط شار مغناطیسی ناشی از سیمپیچی DC ایجاد میشود از رابطه زیر قابل محاسبه است[۱۳]:

$$V_{n,rms} = \sqrt{2} \pi n N_{ph} K_{wn} \left(R_o^2 - R_i^2 \right) B_n \tag{19}$$

که در آن، N_{ph} تعداد دور سیمپیچی هر فاز استاتور، K_{wn} ضریب سیمپیچی هر فاز استاتور، R_{i} مرونی و سیمپیچی هارمونیک n_{i} ، n_{i} و R_{i} بهترتیب شعاعهای درونی و بیرونی مربوط به قطبهای روتور (آهنرباهای الکتریکی) ، B_{n} دامنه چگالی شار مغناطیسی محوری مربوط به هارمونیک n در سطح استاتور میباشد.

۵- نتایج روش تحلیلی و اعتبارسنجی

دراین بخش، ولتاژ محرکه القایی یک نمونه ماشین شارمحوری بدون آهن ربا با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده، به دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی و نتایج روش المان محدود مقایسه شده است. جدول ۱، مشخصات ماشین مورد نظر را نشان می دهد.

جدول۱- مشخصات و ابعاد ماشین شارمحوری بدون آهنربا

r	1
$\cdots W$	توان خروجي
۴	تعداد قطبها
۱۵۰۰ دوردردقيقه	سرعت نامی
۱۰۰ V	ولتاژ خط
٣	تعداد فاز
١١٢	تعداد دور سیمپیچی هر فاز استاتور
۳۰۰	تعداد دور سیمپیچی DC
۲۱	تعداد شيارهاي استاتور
۱۸۶ میلیمتر	قطر خارجي استاتور
۷۶ میلیمتر	قطر داخلى استاتور
۹۲ میلیمتر	طول محورى استاتور
۱۵ میلیمتر	طول محوری روتور
۲۱	تعداد شیارهای استاتور
• /A	قوس قطب به گام قطب
۱ میلیمتر	طول فاصله هوایی

شکل ۹ میز آزمایشگاهی مورد استفاده جهت محاسبه نیروی محرکه القایی را نشان میدهد. ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا توسط یک موتور DC تحریک مستقل با سرعت ۱۵۰۰دوردردقیقه راهاندازی شدهاست. جریان تحریک سیمپیچی میدان ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا ۱۱آمپر در نظر گرفته شدهاست.



شکل ۹: میز آزمایشگاهی مورد استفاده جهت محاسبه نیروی محرکه القایی

ولتاژ القایی اندازه گیریشده برای یکفاز ماشین در شکل ۱۰ نشان داده شدهاست و در شکل ۱۱ مقایسهای بین نتایج روش تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی ارائه شدهاست. مشاهده میشود که تطابق خوبی بین روش تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و میزان خطای موجود در حدود ۵ درصد میباشد.







در شکل ۱۱، خطای موجود ناشی از آن است که در روش تحلیلی فرض شدهاست که هسته ایدهال است و مقاومت مغناطیسی آن صفر است، که باعث می شود پدیده اشباع در روش تحلیلی وجود نداشتهباشدو

چگالی شار ناشی از روش تحلیلی مقداری بیشتر از چگالی شار واقعی باشد و درنتیجه مقدار ولتاژ القایی ناشی از روش تحلیلی اندکی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی را دارا میباشد و این موضوع در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. همچنین مقدار کمی شار نشتی در شعاع داخلی و خارجی هر کدام از آهنرباهای الکتریکی وجود خواهدداشت که در روش تحلیلی این موضوع نادیده گرفته شدهاست و باعث ایجاد اختلاف در روش تحلیلی ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی و نتایج روش المان محدود گردیدهاست.

شکل ۱۲، منحنی مقدار مؤثر ولتاژ القایی برحسب جریان تحریک در حالت بیباری را برای روش تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد، جریان تحریک تا مقدار ۱۸ آمپر اضافه شدهاست که در این حالت مشاهده می شود هسته به اشباع می رود. روش تحلیلی برای جریان تحریکهای تا ۱۴ آمپر، دقت قابل قبولی دارد و پسازآن به دلیل وقوع اشباع در دندانه ها و هسته، اختلاف جواب روش تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی زیاد می شود. البته باید توجه داشت که جریان نامی تحریک که ماشین برای کار در آن جریان تحریک طراحی شدهاست، ۱۱ آمپر می باشد و نتایج روش تحلیلی در محدوده جریان نامی تحریک، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شكل ١٢: نمودار مقدار مؤثر ولتاژ القايي برحسب جريان تحريك

مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی با استفاده از دو روش تحلیلی و المان محدود در جریان نامی تحریک که برابر ۱۱ آمپر میباشد در شکل ۱۳ رسم شدهاست. اثرات دندانه در روش المان محدود نمایان است، اما در روش تحلیلی اثرات دندانه با استفاده از ضریب کارتر در نظر گرفته شدهاست.

شکل ۱۴ نیروی محرکه القایی برای آمپردورهای مختلف را که با استفاده از نرمافزار المان محدود ماکسول محاسبه شدهاست و شکل ۱۵ نیروی محرکه القایی برای آمپردورهای مختلف را که به روش تحلیلی محاسبه شدهاست، نشان میدهند. با افزایش جریان سیمپیچ میدان، شار ناشی از آهنرباهای الکتریکی افزایش مییابد و به تبع آن نیروی محرکه القایی افزایش مییابد. نتایج بهدست آمده از روش تحلیلی و المان محدود با دقت خوبی با یک دیگر تطابق دارند.



شکل۱۳: مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی



شکل ۱۴: شکل موج نیروی محر که القایی برای آمپردورهای مختلف



شکل ۱۵: شکل موج نیروی محر که القایی برای آمپردورهای مختلف سیمپیچ میدان (نتایج روش تحلیلی)

شایان ذکر است که زمان موردنیاز در روش تحلیلی بسیار کمتراز زمان موردنیاز برای شبیهسازی به کمک نرمافزار المان محدود ماکسول میباشد. جدول ۲ زمان محاسبات در روش تحلیلی و و در روش المان Transactions on Industry Applications, vol. 48, pp. 2190-2205, 2012.

- [4] M. Aydin, S. Huang and T.A. Lipo, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: a Review" Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2004. pp 61-71, Jun. 2004.
- [5] R. J. Wang, M. J. Kamper, K. Van der Westhuizen, and J. F. Gieras, "Optimal design of a coreless stator axial flux permanentmagnet generator," IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 1, pp. 55–64, Jan. 2005.
- [6] S. Brisset, D. Vizireanu, and P. Brochet, "Design and optimization of a nine-phase axial-flux PM synchronous generator with concentrated winding for direct-drive wind turbine," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 3, pp. 707–715, 2008.
- [7] T. F. Chan and L. L. Lai, "An axial-flux permanent-magnet synchronous generator for a direct-coupledwind-turbine system," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 1, pp. 86–94, 2007.
- [8] M. Aydin, S. R. Huang and T. A. Lipo, "A new axial fiux surface mounted permanent magnet machine capable of field control," IEEE IAS Annual Meeting, Pittsburgh, USA, pp.1250-1257, 2002.
- [9] V. Naeini, M. Ardabili, "New axial flux PM less synchronous machine with concentrated DC field on stator," Electrical Power and Energy Systems, vol. 67, pp. 651-658., 2014.
- [10] Y. S. Ayat and M. R. A. Pahlavani, "3D computation of no-load magnetic flux density in slotless axial-flux permanent-magnet synchronous machines using conformal mapping," IET Electric Power Applications, vol. 11, pp. 1391-1396, 2017.
- [11] T. Chan, L. Lai, and S. Xie, "Field computation for an axial flux permanent-magnet synchronous generator," IEEE Transactions on energy conversion, vol. 24, pp. 1-11, 2009.
- [12] O. De la Barriere, S. Hlioui, H. B. Ahmed, M. Gabsi, and M. LoBue, "3-D formal resolution of Maxwell equations for the computation of the no-load flux in an axial flux permanent-magnet synchronous machine," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, pp. 128-136, 2012.
- [13] M. R. Pahlavani, Y. S. Ayat, and A. Vahedi, "Minimisation of torque ripple in slotless axial flux BLDC motors in terms of design considerations," IET Electric Power Applications, vol. 11, pp. 1124-1130, 2017.

محدود که با استفاده از نرمافزار ماکسول انجام شدهاست را نشان می دهد.

جدول۲- مقایسه زمان شبیهسازی روش تحلیلی و المان محدود

مدت زمان شبيەسازى	روش مورد استفاده
کمتر از ۱ دقیقه	روش تحلیلی
بیش از ۲ ساعت	روش المان محدود

۶– نتيجه

دراین مقاله، یک روش تحلیلی برای محاسبه نیروی محرکه الکتریکی ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا ارائهشد. دراین روش ابتدا پتانسیل مغناطیسی، چگالی شار مغناطیسی در ناحیه سیمپیچی محاسبه شد، سپس نیروی محرکه القایی در سیمپیچی استاتور بعدستآمد. اعتبارسنجی روش تحلیلی با استفاده از آنالیز المان محدود و نتایج آزمایشگاهی انجام شد. روش تحلیلی دارای زمان محاسبات بسیارکمتری نسبت به روش المان محدود میباشد و میتواند در روند طراحی و بهینهسازی ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهنربا مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] رضا عمادی فر، سجاد توحیدی، محمدرضا فیضی، نقی رستمی، مجتبی الدرمی، «بررسی تأثیر شکل مغناطیس های دائم بر گشتاور دندانه و نیروی محرکه القایی یک ژنراتور مغناطیس دائم شارمحوری به کمک روش المان محدود»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۱۵۹–۱۱۳۹، ۱۳۹۶.

[۲] حسین آذرینفر، محمدرضا آقاابراهیمی،«طراحی، بهینهسازی و شبیهسازی یک نوع جدید از ژنراتورهای شار متقاطع روتور دیسکی مغناطیس دائم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۴، صفحه ۱۳۰۶–۱۳۹۱، ۱۳۹۶.

[3] F. G. Capponi, G. De Donato, and F. Caricchi, "Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology, " IEEE