

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

وحید نائینی^۱، استادیار؛ یوسف شهبازی آیت^۲، همکار تحقیقاتی

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ملایر - ملایر - ایران - vnaeini@malayeru.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ملایر - ملایر - 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 شده است. در این روش از پتانسیل مغناطیسی اسکالر برای محاسبه چگالی شارمغناطیسی در فاصله هوایی و ناحیه سیم‌پیچی استاتور استفاده شده است. معادله لاپلاس در نواحی مختلف ماشین حل شده و پتانسیل مغناطیسی اسکالر به دست آمده است، سپس چگالی شار مغناطیسی از روی پتانسیل مغناطیسی اسکالر، در فاصله هوایی محاسبه شده است. در نهایت نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور محاسبه شده است. این روش تحلیلی دارای زمان محاسباتی بسیار کمتری نسبت به نرم‌افزارهای المان محدود می‌باشد، از اینرو می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهن‌ربا مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت اعتبارسنجی نتایج روش تحلیلی ارائه شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی انجام شده است.

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

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰ و ۱۳۹۷/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱۲/۰۱

نام نویسنده مسئول: وحید نائینی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - ملایر - کیلومتر ۵ جاده اراک - دانشگاه ملایر - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در ساختار بدون آهن ربا، با توجه به این که جریان سیم پیچی DC واقع در استاتور جای گزین آهن رباها می شود، ساختار استاتور پیچیده تر از ساختار استاتورهای مرسوم خواهد شد و مکانی برای تعبیه این سیم پیچی علاوه بر سیم پیچی ac سه فاز باید در نظر گرفته شود که موجب پیچیده تر شدن روند ساخت و حجیم شدن هسته استاتور می گردد. بزرگتر شدن هسته استاتور موجب کاهش چگالی توان در واحد حجم ماشین در ساختار بدون آهن ربا نسبت به ساختار با آهن ربا می شود. همچنین وجود جریان DC موجب ایجاد تلفات در سیم پیچی می گردد که باعث افزایش تلفات مسی و کاهش بازده نسبت به ساختار با آهن ربا می گردد.

در طراحی و بهینه سازی این ماشین ها می توان از نرم افزارهای 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 نرم افزارهای 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 خواهد داشت 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 در نهایت جهت انجام بهینه سازی می توان از روش های تحلیلی بهره برد که در سال های اخیر مورد توجه مهندسين و طراحان ماشین های الکتریکی قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. در روش تحلیلی با استفاده از معادلات ماکسول میدان مغناطیسی فاصله هوایی با توجه به ابعاد هندسی ماشین، محاسبه شده و به تبع آن، نیروی محرکه القایی و گشتاور الکترومغناطیسی تعیین می گردند.

در این تحقیق یک روش تحلیلی برای محاسبه نیروی محرکه القایی در ماشین های شارمحموری بدون آهن ربا ارائه شده است که تاکنون تحقیقی در این زمینه ارائه نشده است. نتایج به دست آمده با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده با نتایج المان محدود و نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

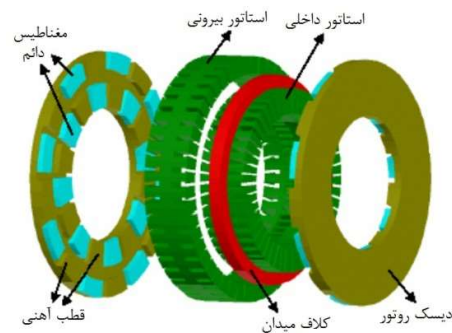
۲- ساختار ماشین سنکرون شارمحموری بدون آهن ربا و مفروضات مسئله

یک نمونه از ساختار ماشین شارمحموری بدون آهن ربا در شکل ۳ نشان داده شده است. روتور شامل ۴ قطب می باشد که این قطب ها به صورت آهن ربا الکتریکی می باشند. استاتور این نوع ماشین به نحوی می باشد که دو نوع سیم پیچی بر روی آن قرار گیرد که شامل سیم پیچی سه فاز و سیم پیچی میدان می باشد. با عبور جریان DC از سیم پیچی میدان، قطب های روتور به آهن ربا الکتریکی تبدیل می شوند.

مسیر عبور شارمغناطیسی ناشی از سیم پیچی میدان در شکل ۴ در دو حالت جریان مثبت و منفی اعمالی به سیم پیچی میدان نشان داده شده است.

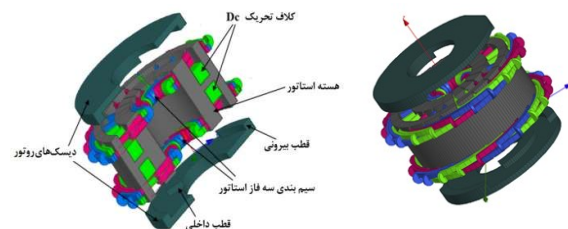
ماشین های شار محوری به عنوان ماشین هایی با چگالی توان بالا شناخته شده اند که دارای ساختارهای متنوعی می باشند [۴-۱]. از ماشین های شارمحموری به طور فزاینده ای در صنعت استفاده می شود که می توان به کاربردهایی چون استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی و توربین های بادی اشاره کرد [۷-۱۵].

در سال های اخیر پیشنهادهایی برای ماشین های سنکرون با دو تحریک جداگانه ارائه شده است. در ماشین های تحریک دوگانه، میدان مغناطیسی روتور از دو منبع ناشی می شود، میدان اول ناشی از آهن ربا های دائم است که بر روی روتور تعبیه شده اند و میدان دوم ناشی از میدان کلاف میدان است که بر روی استاتور قرار گرفته است. کلاف میدان توسط جریان DC تغذیه می شود. با توجه به جهت جریان DC، میدان کلاف میدان می تواند میدان ناشی از آهن ربا های دائم را تقویت یا تضعیف نماید [۸]. شکل ۱ نمونه ای از این ساختار را نشان می دهد.



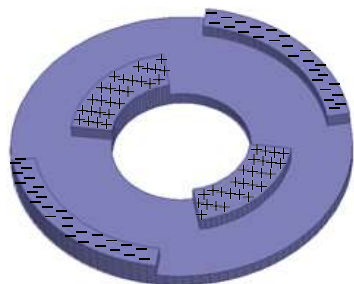
شکل ۱: ساختار ماشین سنکرون شارمحموری با تحریک دوگانه [۸]

باید توجه داشت که استفاده از آهن ربا می تواند محدودیت هایی نیز به دنبال داشته باشد که می توان به دمای کاری آهن رباها در محدوده خاص و نیز بحث تجزیه شیمیایی آهن ربا اشاره نمود که منجر به از بین رفتن خاصیت آهن ربایی خواهند شد. همچنین با توجه به انحصاری بودن تولید آهن ربا های خاک کم یاب، قیمت این آهن رباها می تواند دست خوش تغییرات زیادی گردد و تحقیق بر روی ساختار ماشین سنکرونی که فاقد آهن ربا می باشد، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۹]. شکل ۲ نمونه ای از این ساختار را نشان می دهد. در این ساختار، آهن ربایی وجود ندارد و میدان مغناطیسی روتور به طور کامل با استفاده از کلاف میدان که بر روی استاتور تعبیه شده است، ایجاد می شود.



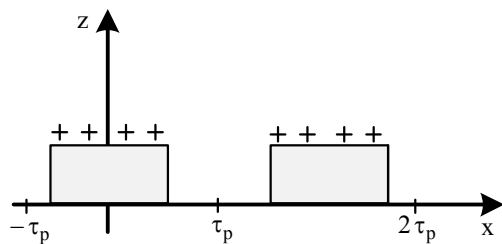
شکل ۲: ساختار ماشین سنکرون شارمحموری بدون آهن ربا [۹]

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

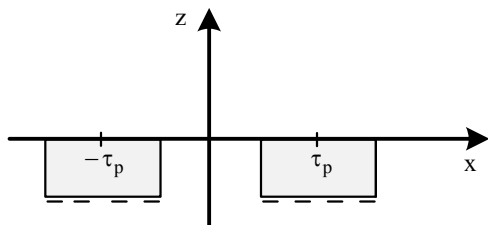


شکل ۶: توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی قطب‌های آهنی

شکل‌های ۷ و ۸، توزیع بارهای مغناطیسی فرضی را بر روی سطح قطب‌های روتور به صورت دوبعدی نشان می‌دهد. مقدار این بارهای مغناطیسی فرضی تابع جریان سیم‌پیچی میدان خواهد بود و شارمغناطیسی توسط این بارهای مغناطیسی فرضی تولید می‌شود.

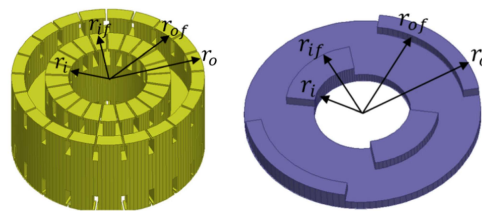


شکل ۷: بارهای مغناطیسی فرضی بر روی قطب‌های N



شکل ۸: بارهای مغناطیسی فرضی بر روی قطب‌های S

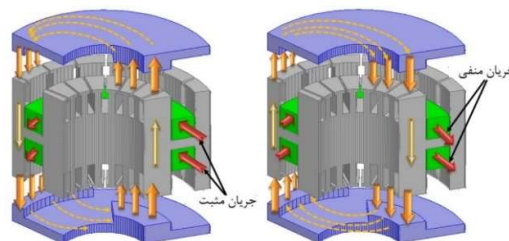
قطب N با بارهای مغناطیسی فرضی مثبت و با چگالی σ_+ در نظر گرفته شده‌است. هم‌چنین قطب S با بارهای مغناطیسی فرضی منفی و با چگالی σ_- در نظر گرفته شده‌است. با استفاده از بسط سری فوریه، توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی قطب‌ها می‌تواند به صورت رابطه (۱) بیان شود.



شکل ۳: ماشین سنکرون شارمحوری بدون آهن‌ریا [۹]

در روش تحلیلی برای کاهش پیچیدگی محاسبات مفروضاتی در نظر گرفته می‌شود که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

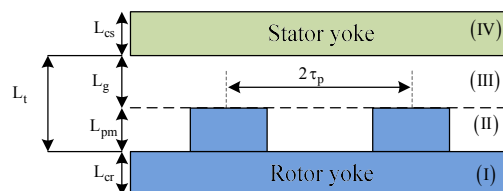
- ضریب نفوذپذیری هسته‌های آهنی بی‌نهایت می‌باشد و پدیده اشباع مغناطیسی وجود ندارد [۱۰].
- از اثر جریان گردابی صرف‌نظر می‌شود [۱۱].
- اثر شیارهای استاتور با استفاده از ضریب کارتر در نظر گرفته می‌شود [۱۲].



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

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. باتوجه به ساختار ماشین که در بخش قبل ارائه شد، فاصله بین دو قطب هم‌نام دو برابر گام قطب می‌باشد. 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

که در روابط فوق، H_x و H_z به ترتیب 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 به صورت تابعی زوج می‌باشد، در ناحیه (II) و (III) جواب کلی معادله لاپلاس به صورت (V) و (A) می‌باشد.

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

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

ضرایب A_n و B_n در روابط بالا می‌توانند با استفاده از شرایط مرزی به دست آیند.

۳-۱ محاسبه ضرایب ثابت با استفاده از شرایط مرزی

باتوجه به فرض بی‌نهایت بودن ضریب نفوذپذیری هسته‌های آهنی روتور و استاتور، میدان مغناطیسی در ناحیه (I) و (IV) شکل (۴)، صفر می‌باشد. صفر بودن میدان مغناطیسی، یک پتانسیل مغناطیسی اسکالر ثابت را نتیجه می‌دهد که این مقدار ثابت می‌تواند برابر صفر لحاظ شود ($V_{m1} = V_{m4} = 0$). باید توجه داشت که برای محاسبه میدان مغناطیسی تغییرات پارامتر پتانسیل مغناطیسی مهم می‌باشد و مقدار آن در محاسبات نقشی ندارد.

پیوستگی پتانسیل، شرایط مرزی زیر را موجب می‌شود:

$$V_{m2}(x, z=0) = V_{m1}(x, z=0) \quad (۹)$$

$$V_{m3}(x, z=L_t) = V_{m4}(x, z=L_t) \quad (۱۰)$$

$$V_{m2}(x, z=L_{pm}) = V_{m3}(x, z=L_{pm}) \quad (۱۱)$$

در روابط فوق، V_{m1} ، V_{m2} ، V_{m3} و V_{m4} به ترتیب پتانسیل مغناطیسی در نواحی (I)، (II)، (III) و (IV) می‌باشند. همچنین 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 به دست می‌آید که به صورت زیر قابل بیان است [۱۰]:

$$-\frac{\partial V_{m3}}{\partial z}(x, z=L_{pm}) = \sigma_t(x) \quad (۱۲)$$

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

$$A_n = \frac{4B_0 \tau_{pi}}{(n\pi)^2 \mu_0} \times \sin\left(\frac{n\pi \alpha_{pi}}{2}\right) \times \tanh\left(\frac{n\pi L_g}{\tau_{pi}}\right) \times \sinh\left(\frac{n\pi L_{pm}}{\tau_{pi}}\right) \quad (۱۳)$$

$$\sigma_+(x) = \frac{B_m \alpha_p}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2B_m}{n\pi\mu_0} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_p} x\right) \right) \quad (۱)$$

$$\sigma_-(x) = \frac{-B_m \alpha_p}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2B_m}{n\pi\mu_0} \times \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_p} x\right) \right)$$

که در آن، μ_0 ضریب نفوذپذیری خلأ، τ_p گام قطب، α_p نسبت قوس قطب به گام قطب ماشین می‌باشند. B_m ، چگالی شار مغناطیسی حاصل از جریان سیم‌پیچی میدان، در سطح آهن‌رباهای الکتریکی روتور می‌باشد که وابسته به نیروی محرکه الکتریکی سیم‌پیچی میدان است و از مدار معادل مغناطیسی قابل محاسبه است که به صورت رابطه زیر قابل بیان است:

$$B_m = \frac{N I_{dc}}{R_m A_p} \quad (۲)$$

که در آن، N تعداد دور سیم‌پیچی DC استاتور، I_{dc} جریان سیم‌پیچی DC، R_m مقاومت مغناطیسی مسیر و A_p سطح مقطع هر قطب می‌باشد. باید توجه داشت که B_m ، برای آهن‌ربای الکتریکی مشابه چگالی شار باقی‌مانده برای آهن‌رباهاست. همچنین برای ساختار هندسی و تعداد دور مشخص از سیم‌پیچی DC، B_m به صورت تابعی از I_{dc} قابل بیان می‌باشد.

توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی سطح روتور به صورت مجموع بارهای مغناطیسی مثبت و منفی می‌باشد. با لحاظ مکان هر کدام از بارهای مثبت و منفی، توزیع کل بارهای مغناطیسی فرضی به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$\sigma_t(x) = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \frac{4B_m}{n\pi\mu_0} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_{pi}}{2}\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{\tau_{pi}} x\right) \quad (۳)$$

باتوجه به 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 به صورت (۴) می‌باشد [۱۱]:

$$\frac{\partial^2 V_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial z^2} = 0 \quad (۴)$$

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

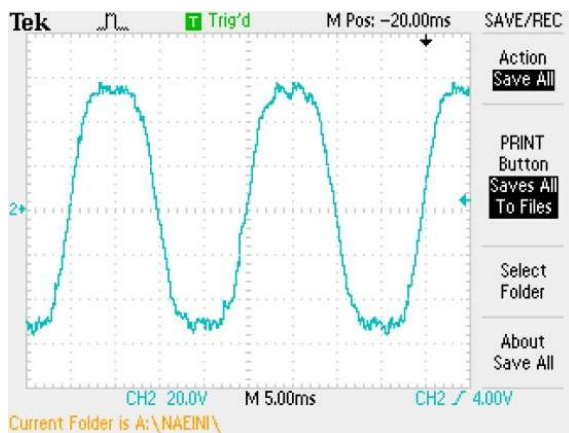
$$H_x = -\frac{\partial V_m}{\partial x} \quad (۵)$$

$$H_z = -\frac{\partial V_m}{\partial z} \quad (۶)$$

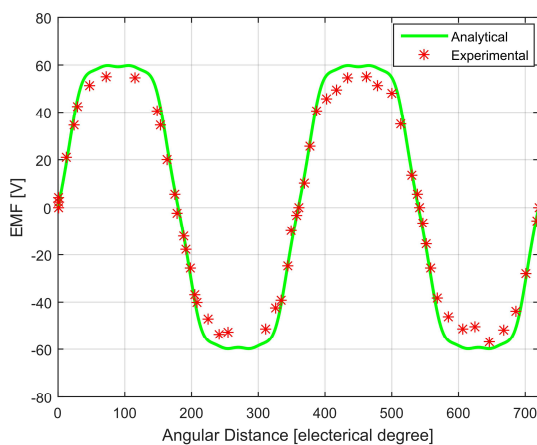


شکل ۹: میز آزمایشگاهی مورد استفاده جهت محاسبه نیروی محرکه القایی

ولتاژ القایی اندازه‌گیری شده 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.



شکل ۱۰: شکل موج ولتاژ القایی در یک‌فاز ماشین سنکرون شارمحروری بدون آهن‌ربا



شکل ۱۱: شکل موج نیروی محرکه القایی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده

در شکل ۱۱، خطای موجود ناشی از آن است که در روش تحلیلی فرض شده‌است که هسته ایده‌آل است و مقاومت مغناطیسی آن صفر است، که باعث می‌شود پدیده اشباع در روش تحلیلی وجود نداشته‌باشد و

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

در نهایت بعد از مشخص شدن ضرایب A_n و B_n ، پتانسیل مغناطیسی در نواحی (II) و (III) مشخص خواهد شد. مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$B_{z3} = -\mu_0 \frac{\partial V_{m3}}{\partial z} \quad (15)$$

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]:

$$V_{n,rms} = \sqrt{2} \pi n N_{ph} K_{wn} (R_o^2 - R_i^2) B_n \quad (16)$$

که در آن، N_{ph} تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور، K_{wn} ضریب سیم‌پیچی هارمونیک n ام، R_o و R_i به ترتیب شعاع‌های درونی و بیرونی مربوط به قطب‌های روتور (آهن‌رباهای الکتریکی)، B_n دامنه چگالی شار مغناطیسی محوری مربوط به هارمونیک n ام در سطح استاتور می‌باشد.

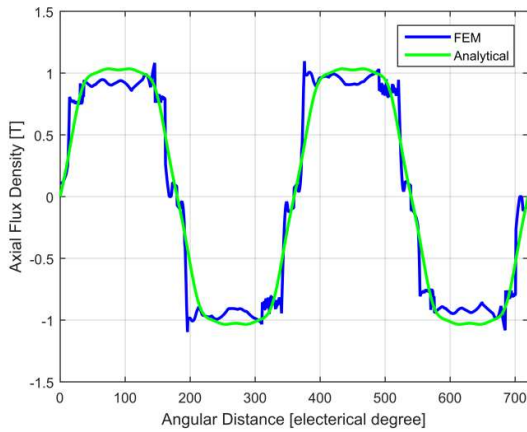
۵- نتایج روش تحلیلی و اعتبارسنجی

در این بخش، ولتاژ محرکه القایی یک نمونه ماشین شارمحروری بدون آهن‌ربا با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده، به دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی و نتایج روش المان محدود مقایسه شده‌است. جدول ۱، مشخصات ماشین مورد نظر را نشان می‌دهد.

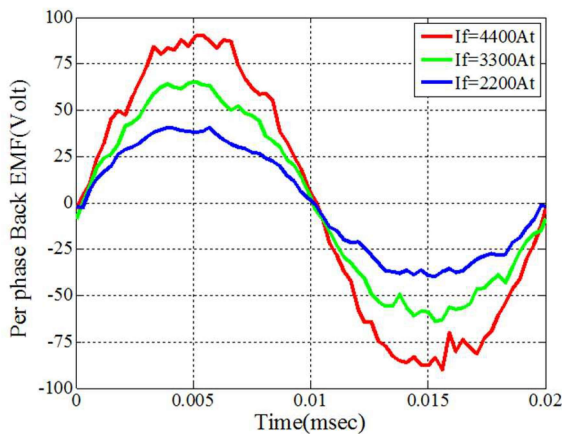
جدول ۱- مشخصات و ابعاد ماشین شارمحروری بدون آهن‌ربا

۱۰۰۰W	توان خروجی
۴	تعداد قطب‌ها
۱۵۰۰ دور در دقیقه	سرعت نامی
۱۰۰ V	ولتاژ خط
۳	تعداد فاز
۱۱۲	تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور
۳۰۰	تعداد دور سیم‌پیچی DC
۲۱	تعداد شیارهای استاتور
۱۸۶ میلی‌متر	قطر خارجی استاتور
۷۶ میلی‌متر	قطر داخلی استاتور
۹۲ میلی‌متر	طول محوری استاتور
۱۵ میلی‌متر	طول محوری روتور
۲۱	تعداد شیارهای استاتور
۰.۸	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 شارمحروری بدون آهن‌ربا توسط یک موتور DC تحریک مستقل با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه راه‌اندازی شده‌است. جریان تحریک سیم‌پیچی میدان ماشین سنکرون شارمحروری بدون آهن‌ربا ۱۱ آمپر در نظر گرفته شده‌است.

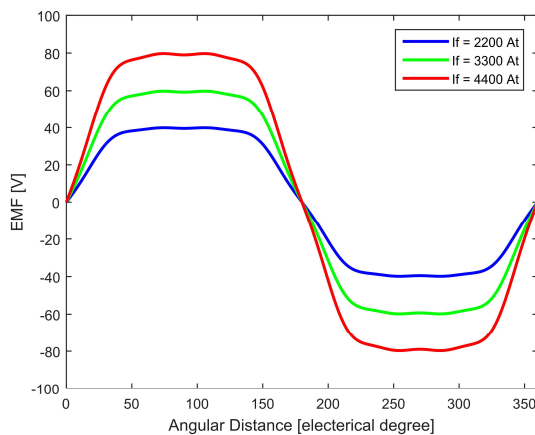


شکل ۱۲: مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی



شکل ۱۴: شکل موج نیروی محرکه القایی برای آمپردوره‌های مختلف

سیم پیچ میدان (نتایج المان محدود)



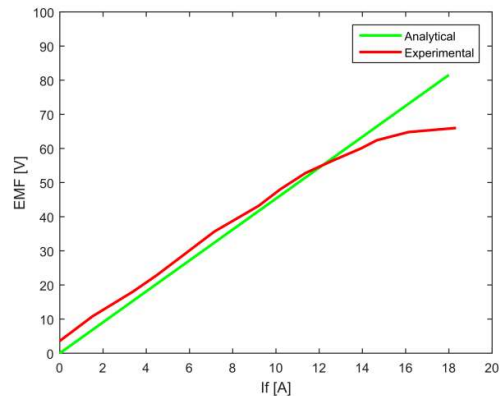
شکل ۱۵: شکل موج نیروی محرکه القایی برای آمپردوره‌های مختلف

سیم پیچ میدان (نتایج روش تحلیلی)

شایان ذکر است که زمان مورد نیاز در روش تحلیلی بسیار کمتر از زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار المان محدود ماکسول می‌باشد. جدول ۲ زمان محاسبات در روش تحلیلی و در روش المان

چگالی شار ناشی از روش تحلیلی مقداری بیشتر از چگالی شار واقعی باشد و در نتیجه 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 خواهد داشت که در روش تحلیلی این موضوع نادیده گرفته شده است و باعث ایجاد اختلاف در روش تحلیلی ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی و نتایج روش المان محدود گردیده است.

شکل ۱۲، منحنی مقدار مؤثر ولتاژ القایی برحسب جریان تحریک در حالت بی‌باری را برای روش تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، جریان تحریک تا مقدار ۱۸ آمپر اضافه شده است که در این حالت مشاهده می‌شود هسته به اشباع می‌رود. روش تحلیلی برای جریان تحریک‌های تا ۱۴ آمپر، دقت قابل قبولی دارد و پس از آن به دلیل وقوع اشباع در دندان‌ها و هسته، اختلاف جواب روش تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی زیاد می‌شود. البته باید توجه داشت که جریان نامی تحریک که ماشین برای کار در آن جریان تحریک طراحی شده است، ۱۱ آمپر می‌باشد و نتایج روش تحلیلی در محدوده جریان نامی تحریک، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۱۶: نمودار مقدار مؤثر ولتاژ القایی برحسب جریان تحریک

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 شده است. اثرات دندان در روش المان محدود نمایان است، اما در روش تحلیلی اثرات دندان با استفاده از ضریب کارتر در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۴ نیروی محرکه القایی برای آمپردوره‌های مختلف را که با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ماکسول محاسبه شده است و شکل ۱۵ نیروی محرکه القایی برای آمپردوره‌های مختلف را که به روش تحلیلی محاسبه شده است، نشان می‌دهند. با افزایش جریان سیم پیچ میدان، شار ناشی از آهن‌رباهای الکتریکی افزایش می‌یابد و به تبع آن نیروی محرکه القایی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از روش تحلیلی و المان محدود با دقت خوبی با یکدیگر تطابق دارند.

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 permanent-magnet 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-coupled wind-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 flux 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 می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه زمان شبیه‌سازی روش تحلیلی و المان محدود

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

۶- نتیجه

در این مقاله، یک روش تحلیلی برای محاسبه نیروی محرکه الکتریکی ماشین سنکرون شارمخوری بدون آهن‌ریا ارائه شد. در این روش ابتدا پتانسیل مغناطیسی، چگالی شار مغناطیسی در ناحیه سیم‌پیچی محاسبه شد، سپس نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی استاتور به دست آمد. اعتبارسنجی روش تحلیلی با استفاده از آنالیز المان محدود و نتایج آزمایشگاهی انجام شد. روش تحلیلی دارای زمان محاسبات بسیار کمتری نسبت به روش المان محدود می‌باشد و می‌تواند در روند طراحی و بهینه‌سازی ماشین سنکرون شارمخوری بدون آهن‌ریا مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [۱] رضا عمادی‌فر، سجاد توحیدی، محمدرضا فیضی، نقی رستمی، مجتبی‌الدینی، «بررسی تأثیر شکل مغناطیس‌های دائم بر گشتاور دندانه و نیروی محرکه القایی یک ژنراتور مغناطیس دائم شارمخوری به کمک روش المان محدود»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۱۵۹-۱۱۴۷، ۱۳۹۶.
- [۲] حسین آذرین‌فر، محمدرضا آقابراهیمی، «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 ۱۳۰۶-۱۲۹۱، ۱۳۹۶.
- [3] F. G. Capponi, G. De Donato, and F. Caricchi, "Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology," IEEE