

محاسبه ولتاژ ضدمحرکه در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم شارمحوری بدون جاروبک با استفاده از معادلات ماکسول

محمد رضا علیزاده پهلوانی^{۱*}، یوسف شهبازی آیت^۲

۱- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- همکار تحقیقاتی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
(دریافت: ۹۴/۰۸/۲۰، پذیرش: ۹۵/۰۵/۳۱)

چکیده: در این مقاله یک روش تحلیلی برای محاسبه ولتاژ ضدمحرکه در موتور سنکرون مغناطیس دائم شارمحوری بدون جاروبک (BLDC) ارائه شده است. روش تحلیلی با استفاده از معادلات ماکسول و حل معادله لاپلاس در نواحی مختلف موتور انجام شده است. معادله لاپلاس در دستگاه مختصات دکارتی با استفاده از سری‌های فوریه و روش جداسازی متغیرها حل شده تا پتانسیل مغناطیسی اسکالر به دست آید، سپس با استفاده از پتانسیل مغناطیسی اسکالر، چگالی شار مغناطیسی محاسبه شده است. چگالی شار مغناطیسی متوسط برای بدست آوردن ولتاژ ضدمحرکه معرفی شده است. اثر شارهای ناشی در شعاع‌های داخلی و خارجی با استفاده از تعریف یک ضریب تصحیح لحاظ شده است. ضریب تصحیح با استفاده از نسبت پرمانس‌ها به دست آمده است. با استفاده از روش تحلیلی پیشنهادی، هارمونیک‌های مختلف ولتاژ ضدمحرکه برای یک نمونه موتور BLDC محاسبه و ارائه شده است. روش تحلیلی ارائه شده، دارای زمان محاسباتی بسیار کمتری نسبت به نرم افزارهای المان محدود می‌باشد که استفاده از آن را برای مقاصد طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی بسیار سودمند می‌سازد. صحت روش تحلیلی ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار المان محدود سه بعدی تأیید شده است.

کلید واژه‌ها: موتور شارمحوری، موتور بدون جاروبک، موتور سنکرون، روش تحلیلی، معادلات ماکسول.

۱- مقدمه

شکل موج‌های جریان و ولتاژ همان چیزی باشد که انتظار می‌رود، در هر دو حالت گشتاور تولیدی بدون نوسان خواهد بود که در بسیاری از کاربردها مطلوب می‌باشد. به هر حال در عمل ولتاژ ضدمحرکه در موتورهای مغناطیس دائم، به صورت سینوسی کامل یا دوزنقه‌ای کامل نمی‌باشد و به دلیل خطاهای مکانیکی و محدودیت‌های طراحی، تولید شکل موج نیروی محرکه الکتریکی القایی مطلوب، تقریباً غیر ممکن است [۶].

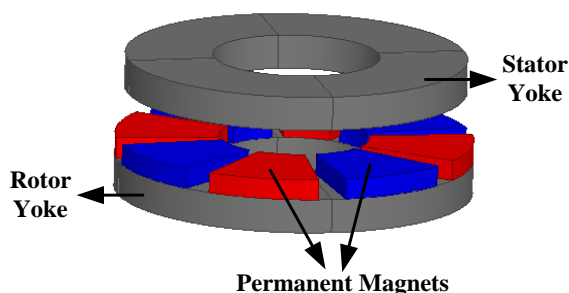
در طراحی و بهینه‌سازی موتورهای BLDC و تحلیل عملکرد آن‌ها، می‌توان از نرم‌افزارهای المان محدود استفاده کرد که به کمک آن‌ها می‌توان ساختارهای پیچیده موتورهای الکتریکی و به‌طور کلی ماشین‌های الکتریکی را شبیه‌سازی نمود و نتایج بسیار دقیقی به دست آورد، اما پروسه شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای المان محدود بسیار زمان‌بر می‌باشد، به خصوص برای زمانی که بهینه‌سازی ماشین مدنظر است و شبیه‌سازی‌ها باید برای اشکال هندسی مختلف و متعدد ماشین انجام پذیرد.

در طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی می‌توان از روش‌های تحلیلی در کنار نرم‌افزارهای المان محدود بهره جست.

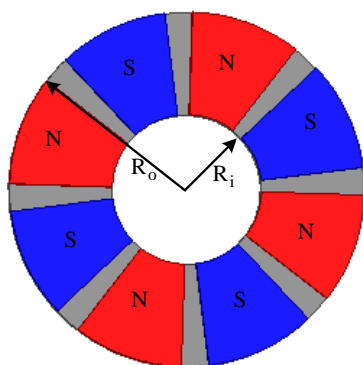
سرو موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک، با توجه به چگالی توان بالا، اینرسی چرخشی پایین و عملکرد دینامیکی خوب به‌طور وسیعی در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۲].

موتورهای مغناطیس دائم شار محوری از جمله موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک می‌باشند که نسبت به موتورهای مغناطیس دائم معمولی دارای گشتاور به وزن بالا و بازده بالا هستند و دارای ساختارهای متنوعی می‌باشند [۳-۵].

موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک به دو دسته موتور سنکرون مغناطیس دائم با تغذیه جریان سینوسی یا PMSM و موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک با تغذیه جریان مستطیلی یا BLDC تقسیم می‌شوند. در حالت ایده‌آل ولتاژ ضد محرکه در PMSM سینوسی می‌باشد و در BLDC ولتاژ ضد محرکه دوزنقه‌ای شکل است. اگر در هر دو روش شرایط ایده‌آل باشد و



شکل (۱): ساختار موتور شارمحوری BLDC بدون سیم‌پیچی



شکل (۲): شکل آهنرباها در ماشین شارمحوری BLDC

در این تحقیق به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات در روش تحلیلی مفروضات زیر لحاظ گردیده است.

۱- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته‌های روتور و استاتور بی‌نهایت فرض شده است.

۲- خاصیت مغناطیسی برای آهنرباها به صورت خطی می‌باشد.

۳- آهنرباها در راستای محوری مغناطیس شده‌اند.

۴- ضریب نفوذپذیری نسبی در ناحیه سیم‌پیچی شده، برابر واحد در نظر گرفته شده است.

۳- محاسبه تحلیلی ولتاژ ضدمحرکه

هارمونیک‌های مختلف ولتاژ ضدمحرکه برای هر فاز موتور BLDC که توسط شار مغناطیسی آهنرباهای روتور ایجاد می‌شود از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$V_{n,rms} = \sqrt{2} \pi n N_{ph} K_{wn} (R_o^2 - R_i^2) m_r B_{n,avg} \quad (1)$$

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 آهنرباها، m_r ضریب تصحیح است که شارهای ناشی در شعاع‌های داخلی و خارجی را لحاظ می‌کند، $B_{n,avg}$ متوسط

استفاده از روش تحلیلی می‌تواند زمان طراحی و بهینه‌سازی را به شدت کاهش دهد. استفاده از روش‌های تحلیلی علاوه بر کاهش زمان محاسبات، اثر ساختار ماشین بر روی توزیع چگالی شار مغناطیسی را معین و مشخص می‌سازد که می‌تواند مطالعات پارامتری و آنالیز حساسیت بر روی ماشین را تسهیل کند.

در چند سال اخیر، کارهای تحقیقاتی بر روی روش‌های تحلیلی انجام شده است که مبتنی بر حل معادلات ماکسول بر روی ساختارهای ماشین‌های مختلف می‌باشد. بطور کلی مسائل میدان مغناطیسی به روش تحلیلی می‌تواند بر اساس پتانسیل مغناطیسی اسکالر و یا برداری فرمول‌بندی و محاسبه شوند [۱۵-۷].

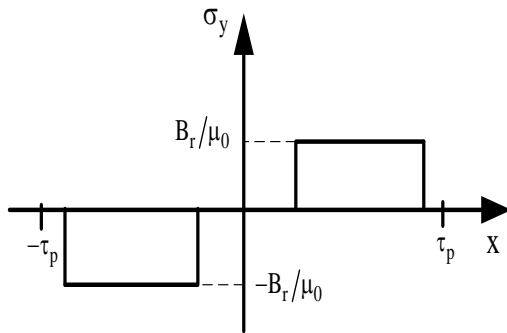
ولتاژ ضدمحرکه یکی از مهمترین پارامترهای ماشین برای طراحی و بررسی عملکرد ماشین می‌باشد. در این تحقیق به محاسبه ولتاژ ضدمحرکه در یک موتور شارمحوری BLDC با حل معادلات ماکسول و با استفاده از پتانسیل مغناطیسی اسکالر پرداخته شده است.

در [۱۵]، برای یک نمونه موتور شارشعاعی ولتاژ ضدمحرکه را با استفاده از ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ‌های هر شیار محاسبه نموده است و البته شارهای ناشی در نظر نگرفته شده است. در این مقاله شارهای ناشی با استفاده از یک ضریب تصحیح لحاظ شده است. در بخش ۲، ساختار ماشین و مفروضات مسئله ارائه شده است. در بخش ۳، ولتاژ بی‌باری با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده است. در بخش ۴، نتایج ناشی از روش تحلیلی ارائه شده با روش المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- ساختار ماشین مورد مطالعه و مفروضات مسئله

در این مقاله، ساختار ماشین BLDC به صورت تک‌وجهی که شامل یک روتور و یک استاتور است، در نظر گرفته شده است. ماشین دارای یک استاتور دیسکی سیم‌پیچی شده است. استاتور می‌تواند شیاردار یا بدون شیار باشد که در این تحقیق ساختار بدون شیار لحاظ شده است. در صورت وجود شیار، اثر شیارها با استفاده از ضریب کارتر می‌تواند لحاظ شود. روتور به صورت دیسکی بوده و در مقابل استاتور بوده و آهنرباها بر روی سطح روتور قرار دارند. شکل (۱)، ساختار ماشین را بدون حضور سیم‌پیچی نشان می‌دهد.

در ماشین BLDC شکل آهنرباها به صورت قطاعی می‌باشد، شکل (۲) روتور با آهنرباهای قطاعی شکل را نمایش می‌دهد.



شکل (۵): توزیع چگالی بار مغناطیسی آهنرباها

با استفاده از سری فوریه توزیع چگالی بار مغناطیسی برای آهنرباها به صورت رابطه زیر قابل بیان می‌باشد.

$$\sigma_y(x) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4B_r}{n\pi\mu_0} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_p}x\right) \quad (3)$$

که در آن، τ_p گام قطب در شعاع متوسط موتور و α_p نسبت قوس قطب به گام قطب است.

با توجه به عدم وجود جریان الکتریکی در محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری، پتانسیل مغناطیسی اسکالر (V_m) در معادله لاپلاس صدق می‌کند که در حالت دو بعدی و در دستگاه مختصات دکارتی به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial^2 V_m}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial^2 y} = 0 \quad (4)$$

مؤلفه‌های محیطی و محوری میدان مغناطیسی طبق روابط زیر، با پتانسیل مغناطیسی اسکالر در ارتباط می‌باشد.

$$H_x = -\frac{\partial V_m}{\partial x} \quad (5)$$

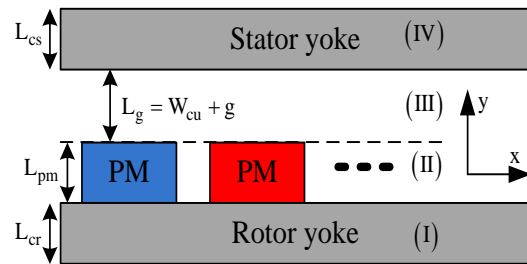
$$H_y = -\frac{\partial V_m}{\partial y} \quad (6)$$

در ناحیه (I) و (IV) چون ضریب نفوذپذیری بی‌نهایت فرض شده است، برای محدود شدن چگالی شار مغناطیسی، میدان مغناطیسی در این ناحیه صفر می‌باشد. صفر بودن میدان مغناطیسی، یک پتانسیل مغناطیسی اسکالر ثابت را نتیجه می‌دهد. این مقدار ثابت می‌تواند برابر صفر لحاظ شود ($V_{m1} = V_{m4} = 0$). با استفاد از روش جداسازی متغیرها و با توجه به نحوه توزیع چگالی بار مغناطیسی در مسیر محیطی که به صورت تابعی فرد می‌باشد، در ناحیه (II) و (III) جواب کلی معادله لاپلاس به صورت روابط (7) و (8) می‌باشد.

چگالی شار مغناطیسی محوری مربوط به هارمونیک n ام ناشی از آهنرباها در ناحیه سیم‌پیچی می‌باشد. با داشتن $B_{n,avg}$ هارمونیک‌های مختلف ولتاژ ضدمحرکه قابل محاسبه می‌باشند. در بخش بعد $B_{n,avg}$ با استفاده از روش تحلیلی محاسبه شده است.

۳-۱- محاسبه تحلیلی چگالی شار مغناطیسی آهنرباها

با توجه به شکل (۱)، می‌توان موتور را به چهار ناحیه تقسیم کرد که ناحیه اول شامل یوغ روتور (I)، ناحیه دوم شامل آهنرباها (II)، ناحیه سوم فاصله میان آهنرباها تا یوغ استاتور که شامل فاصله هوایی و سیم‌پیچی آرمیچر است (III) و در نهایت ناحیه چهارم که شامل یوغ استاتور است (IV). شکل (۳)، مدل دو بعدی ماشین را در شعاع متوسط نشان می‌دهد که نواحی چهارگانه ماشین بر روی آن مشخص شده‌اند.



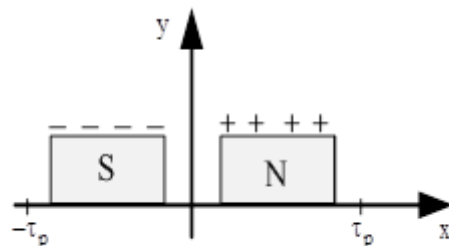
شکل (۳): مدل دوبعدی ماشین در شعاع متوسط

چگالی بارهای مغناطیسی فرضی در سطح آهنرباها می‌تواند مطابق رابطه زیر لحاظ شود [۱۴].

$$\sigma_y = \begin{cases} +B_r/\mu_0 & \text{N poles} \\ -B_r/\mu_0 & \text{S poles} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن، B_r چگالی شار باقیمانده و μ_0 ضریب نفوذپذیری فضای آزاد است.

شکل (۴)، توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی سطح آهنرباها و شکل (۵) توزیع چگالی بار مغناطیسی را نشان می‌دهد.



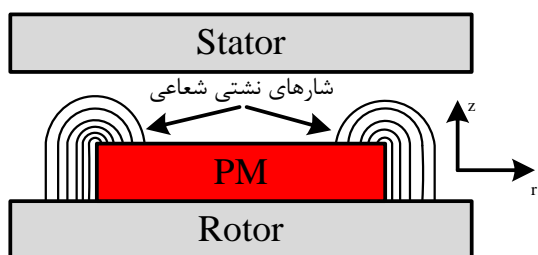
شکل (۴): توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی آهنرباها

که در آن، $B_{y3,n}$ مؤلفه n ام چگالی شار مغناطیسی محوری، Y_1 و Y_2 به ترتیب ناحیه شروع و انتهای سیم پیچی در راستای محوری، R_o و R_i به ترتیب شعاع داخلی و خارجی آهنرباها می باشند.

محاسبات انجام شده برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی در ناحیه سیم پیچی، اثر شار نشستی در شعاع های داخلی و خارجی سطح روتور را لحاظ نمی کند که این اثر در رابطه (۱) با یک ضریب تصحیح لحاظ شده است. در ادامه نحوه به دست آوردن ضریب تصحیح بیان شده است.

۳-۲- محاسبه ضریب تصحیح برای لحاظ نمودن اثر شارهای نشستی

مطابق شکل (۶)، در شعاع های داخلی و خارجی روتور شارهای نشستی وجود دارد که بین سطح آهنرباها و سطح روتور می باشند. این شارهای نشستی می تواند با استفاده از یک ضریب تصحیح در محاسبه ولتاژ ضدمحر که لحاظ شود.



شکل (۶): وجود شارهای نشستی در شعاع های داخلی و خارجی

در این مقاله ضریب تصحیح به صورت رابطه زیر تعریف شده است که از مدار مغناطیسی معادل به دست می آید.

$$m_r = \frac{P_g}{P_g + P_{Li} + P_{Lo}} \quad (16)$$

که در آن، P_g پرمانس فاصله هوایی، P_{Li} پرمانس نشستی در شعاع داخلی و P_{Lo} در شعاع خارجی می باشند.

یکی از متداول ترین روش ها برای محاسبه پرمانس استفاده از مدل استوانه ای است [۱۶-۱۷]. مقادیر پرمانس ها به صورت روابط زیر قابل محاسبه می باشند.

$$P_g = \frac{\mu_0 \tau_p (R_o - R_i)}{L_g} \quad (17)$$

$$P_{Li} = \frac{\mu_0 \alpha_p \tau_p}{\pi} \text{Ln} \left(\frac{R_i + L_g + L_{pm}/\pi}{R_i + L_{pm}/\pi} \right) \quad (18)$$

$$P_{Lo} = \frac{\mu_0 \alpha_p \tau_p}{\pi} \text{Ln} \left(\frac{R_o + L_{pm}/\pi}{R_o - L_g + L_{pm}/\pi} \right) \quad (19)$$

$$V_{m2}(x, y) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} A \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_p} y\right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_p} x\right) \quad (7)$$

$$V_{m3}(x, y) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_p} (y - L_{PM} - L_g)\right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_p} x\right) \quad (8)$$

که در آن، L_{PM} ضخامت آهنربا در راستای محوری و L_g فاصله محوری از سطح آهنرباها تا یوغ استاتور است که شامل ناحیه فاصله هوایی و ناحیه سیم پیچی است. A و B ضرایب ثابتی هستند که با استفاده از شرایط مرزی به دست آیند. پیوستگی پتانسیل، شرایط مرزی زیر را موجب می شود.

$$V_{m2}(x, y=0) = V_{m1}(x, y=0) = 0 \quad (9)$$

$$V_{m3}(x, y=L_{pm} + L_g) = V_{m4}(x, y=L_{pm} + L_g) = 0 \quad (10)$$

$$V_{m2}(x, y=L_{pm}) = V_{m3}(x, y=L_{pm}) \quad (11)$$

با توجه به وجود چگالی بار مغناطیسی در مرز دو محیط، یکی دیگر از شرایط مرزی در مرز بین دو محیط (II و III) به صورت زیر می باشد.

$$H_{y3} - H_{y2} = \sigma_y(x) \quad (12)$$

با مشخص شدن ضرایب A و B ، پتانسیل مغناطیسی اسکالر در ناحیه (II) و (III) بدست می آید و در نهایت چگالی شار مغناطیسی محوری در ناحیه سیم پیچی (ناحیه III) از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد.

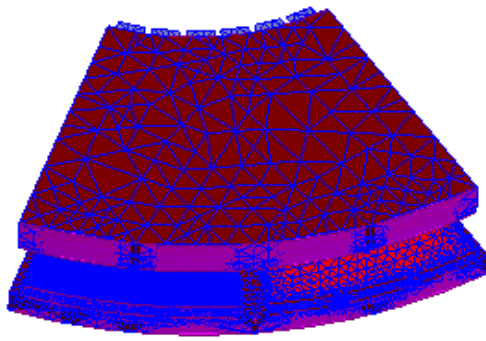
$$B_{y3} = -\mu_0 \frac{\partial V_{m3}}{\partial y} \quad (13)$$

در نهایت چگالی شار مغناطیسی در فاصله محوری دلخواه از سطح آهنربا و نیز شعاع متوسط ماشین، از رابطه تحلیلی زیر قابل محاسبه خواهد بود.

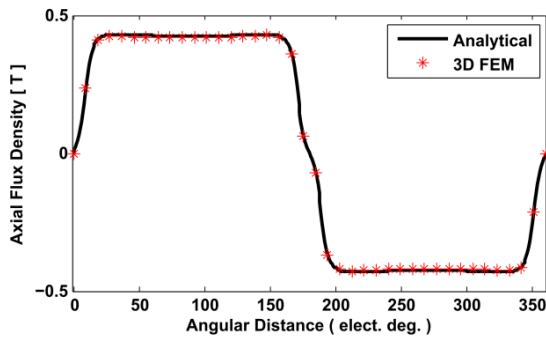
$$B_{y3} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} -\mu_0 \times \frac{4B_r}{n\pi\mu_0} \times \sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \times \left(\mu_r \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_p} L_g\right) \coth\left(\frac{n\pi}{\tau_p} L_{PM}\right) + \cosh\left(\frac{n\pi}{\tau_p} L_g\right) \right) \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_p} x\right) \quad (14)$$

با داشتن چگالی شار مغناطیسی محوری، می توان $B_{n,avg}$ را از رابطه زیر محاسبه نمود که در آن اثر شعاع ماشین و نیز توزیع محوری سیم پیچی لحاظ شده است.

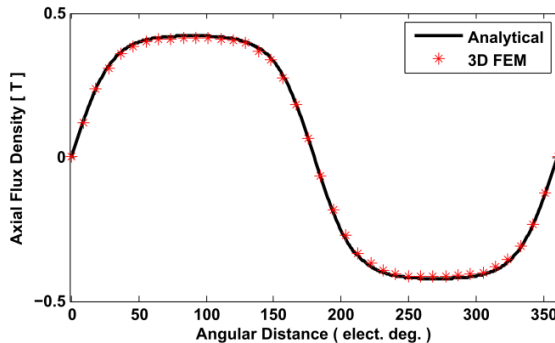
$$B_{n,avg} = \frac{1}{(Y_2 - Y_1)(R_o - R_i)} \int_{R_i}^{R_o} \int_{Y_1}^{Y_2} B_{y3,n} dy dr \quad (15)$$



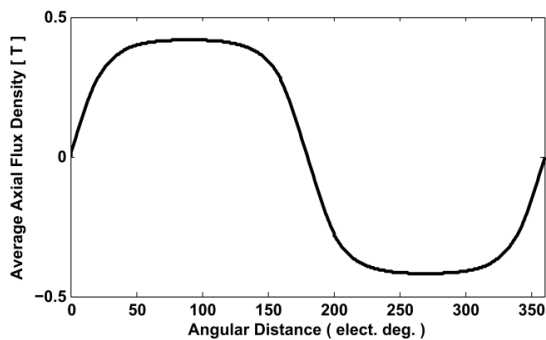
شکل (۷): مش بندی یک جفت قطب از موتور در نرم افزار المان محدود ANSYS Maxwell



شکل (۸): مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی آهنرباها بر حسب فاصله محیطی



شکل (۹): مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی سطح استاتور بر حسب فاصله محیطی



شکل (۱۰): متوسط چگالی شار مغناطیسی محوری در نزدیکی سطح استاتور بر حسب فاصله محیطی

۴- نتایج روش تحلیلی و مقایسه با نتایج المان محدود

محدود

در این بخش به اعتبارسنجی روش تحلیلی ارائه شده با استفاده از نرم افزار المان محدود پرداخته شده است. مشخصات موتور شارمحوری BLDC مطابق جدول (۱) می باشد.

شکل (۷)، مش بندی یک جفت قطب از ماشین مورد نظر را در نرم افزار المان محدود ANSYS Maxwell نشان می دهد.

شکل (۸)، مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی آهنرباها و شکل (۹)، مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی هسته استاتور را نشان می دهند.

با توجه به شکل های (۸-۹) مشاهده می شود که چگالی شار در نزدیکی سطح آهنرباها حالت دوزنقه ای داشته و با دور شدن از سطح آهنرباها به شکل سینوسی نزدیک تر می شود. همچنین شکل های (۷-۸) نشان می دهد که تطابق بسیار خوبی میان نتایج تحلیلی ارائه شده و نتایج ناشی از نرم افزار المان محدود وجود دارد.

شکل (۱۰)، متوسط چگالی شار مغناطیسی محوری در ناحیه سیم پیچی را نشان می دهد که با توجه به رابطه (۱۵)، حاصل می شود.

جدول (۲)، دامنه هارمونیک های مختلف چگالی شار مغناطیسی متوسط و ولتاژ ضد محرکه را برای موتور شارمحوری BLDC در سرعت ۱۸۰۰ rpm نشان می دهد که با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده، محاسبه شده اند.

جدول (۱): مشخصات موتور شارمحوری مورد مطالعه BLDC

توان خروجی	P	5 [kW]
تعداد جفت قطب	p	7
چگالی شار باقیمانده	B_r	1.2 [T]
ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلأ	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
ضریب نفوذپذیری نسبی آهنرباها	μ_r	1.05
قطر خارجی آهنرباها	D_o	257 [mm]
قطر داخلی آهنرباها	D_i	123 [mm]
قطر متوسط ماشین	D_g	190 [mm]
نسبت قوس قطب به گام قطب	α_p	0.9
ضخامت آهنرباها	L_{pm}	4 [mm]
ضخامت یوغ استاتور	L_{cs}	10 [mm]
ضخامت یوغ روتور	L_{cr}	7 [mm]
فاصله بین آهنرباها تا یوغ استاتور	L_g	7 [mm]

- [8] Z. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. II. Armature-reaction field," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 29, pp. 136-142, 1993.
- [9] Z. Zhu, D. Howe, and C. Chan, "Improved analytical model for predicting the magnetic field distribution in brushless permanent-magnet machines," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, pp. 229-238, 2002.
- [10] E. Furlani, "Computing the field in permanent-magnet axial-field motors," IEEE transactions on magnetics, vol. 30, pp. 3660-3663, 1994.
- [11] Y. Zhang, S. Ho, H.-c. C. Wong, and G. Xie, "Analytical prediction of armature-reaction field in disc-type permanent magnet generators," IEEE transactions on energy conversion, vol. 14, pp. 1385-1390, 1999.
- [12] J. Bumby, R. Martin, M. Mueller, E. Spooner, N. Brown, and B. Chalmers, "Electromagnetic design of axial-flux permanent magnet machines," IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 151, pp. 151-160, 2004.
- [13] J. Azzouzi, G. Barakat, and B. Dakyo, "Quasi-3-D analytical modeling of the magnetic field of an axial flux permanent-magnet synchronous machine," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, pp. 746-752, 2005.
- [14] 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.
- [15] P. Kumar and P. Bauer, "Improved analytical model of a permanent-magnet brushless DC motor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, pp. 2299-2309, 2008.
- [16] H.-D. Chai, "Permeance model and reluctance force between toothed structures," ibd, vol. 141, 1974.
- [17] D. C. Hanselman, Brushless permanent magnet motor design: The Writers' Collective, 2003.

جدول (۲): نیروی محرکه القایی و درصد هارمونیک‌ها

ولتاژ ضدمحرکه [V]	چگالی شار مغناطیسی متوسط [T]	هارمونیک
39.2	0.498	اول
8.1	0.103	سوم
2.5	0.03	پنجم
0.8	0.01	هفتم
0.1	0.002	نهم

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تحلیلی با استفاده از معادلات ماکسول و حل معادله لاپلاس برای محاسبه ولتاژ ضدمحرکه موتور شارمحموری BLDC ارائه شد. اثر شار نشتی در شعاع داخلی و خارجی روتور با استفاده از نسبت پرمانس فاصله هوایی و پرمانس‌های نشتی به‌صورت یک ضریب تصحیح معرفی شد و در روابط تحلیلی لحاظ گردید. مدل تحلیلی ارائه شده کارآمد بوده و صحت نتایج آن با نرم افزار المان محدود تأیید شده است. روش تحلیلی ارائه شده دارای زمان محاسباتی بسیار کمی در مقایسه با نرم افزار می‌باشد و می‌تواند برای طراحی، بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت ماشین مورد استفاده قرار گیرد.

۶- مراجع

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive," IEEE Transactions on industry applications, vol. 25, pp. 265-273, 1989.
- [2] A. Rubaai, A. Ofoli, and M. Castro, "dSPACE DSP-based rapid prototyping of fuzzy PID controls for high performance brushless servo drives," in Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, 2006, pp. 1360-1364.
- [3] F. Giulii Capponi, G. De Donato, and F. Caricchi, "Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS IA, vol. 48, pp. 2190-2205, 2012.
- [4] M. Aydin, S. Huang, and T. Lipo, "Axial flux permanent magnet disc machines: a review," Wisconsin Electric Machines & Power Electronics Consortium, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, pp. 53706-1691, 2004.
- [5] M. Aydin, S. Huang, and T. A. Lipo, "Torque quality and comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, pp. 822-830, 2006.
- [6] D. C. Hanselman, "Minimum torque ripple, maximum efficiency excitation of brushless permanent magnet motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, pp. 292-300, 1994.
- [7] Z. Zhu, D. Howe, E. Bolte, and B. Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. I. Open-circuit field," IEEE transactions on magnetics, vol. 29, pp. 124-135, 1993.

Computation of Back EMF for Axial Flux BLDC Motors by Using of Maxwell Equations

M. R. Alizadeh Pahlavani* ,Y. Shahbazi Ayat

Department of Electrical Engineering, Malek Ashtar University of Technology

(Received: 11/11/2015, Accepted: 21/08/2016)

Abstract

In this paper an analytical method for back electromotive force (EMF) calculation of axial flux brushless DC (BLDC) motors is presented. The analytical method uses Maxwell equations and solves Laplace's equation in several regions of motor. Laplace's equation is solved in the rectangular coordinate system by using of Fourier analysis and the method of separation of variables to give the scalar magnetic potentials, and then magnetic flux density is calculated by using of scalar magnetic potentials. Average magnetic flux density is introduced to compute back EMF. The effect of flux leakages in inner and outer radii is considered by using of airgap permeance and inner and outer permeances ratio. The proposed analytical method gives back EMF harmonic components. This analytical method requires less computational time than conventional 3D 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.

Keywords: Axial Flux Motor, BLDC Motor, Synchronous Motor, Analytical Method, Maxwell Equations

* Corresponding author E-mail: mr_alizadehp@mut.ac.ir