

ارائه روشی جهت انتخاب گام آهنربا برای موتور BLDC نوع IPM برای دستیابی به مشخصات مطلوب موتور

مهرداد جعفربلند^۱، دانشیار، مرتضی میخک بیرانوند^۲، دانشجوی ارشد، محمدهادی ریسمانی^۳، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و اویونیک - دانشگاه مالک اشتر - اصفهان - ایران - J_mehrdad405@hotmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و اویونیک - دانشگاه مالک اشتر - اصفهان - ایران - mikhak.2913@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق و اویونیک - دانشگاه مالک اشتر - اصفهان - ایران - rismani_shiraz@yahoo.com

چکیده: برای موتور BLDC شیار کامل آرایش‌های متعددی را می‌توان برای سیم‌پیچی ارائه داد. در این مقاله با استفاده از تئوری‌های مشخص شده، برای یک نمونه موتور BLDC نوع IPM شیار کامل (۲۴ شیار ۴ قطب) دو نوع سیم‌پیچی یک طبقه با گام کامل و سیم‌پیچی یک طبقه با گام کسری ارائه شده است. در ادامه با استفاده از یک سری روابط تحلیلی برای موتورهای شیار کامل روشی ارائه شده است که بر اساس آن می‌توان برای سیم‌پیچ‌های پیشنهاد شده با انتخاب بهینه کوتاهی گام آهنربا، BACK-EMF ایده‌آل را برای موتور BLDC فراهم کرد. سپس با استفاده از آنالیز المان محدود صحت روش پیشنهادی بررسی شده است به گونه‌ای که نتایج المان محدود نشان‌دهنده این موضوع است که انتخاب بهینه کوتاهی گام آهنربا باعث می‌گردد تا مشخصات BACK-EMF، گشتاور اثر دندانه‌ای و ریبیل گشتاور به صورت مطلوب برای موتور BLDC نوع IPM فراهم شوند. به ازای ثابت بودن ابعاد هندسی موتور، هر دو سیم‌پیچ ارائه شده مشخصات یکسانی را برای موتور BLDC نوع IPM ۲۴ شیار ۴ قطب فراهم کرده‌اند و به علت اینکه سیم‌پیچی گام کسری حجم سیم کمتری نیاز دارد این سیم‌پیچی دارای مزیت نسبی می‌گردد. علاوه بر نتایج المان محدود، نتایج آزمایشگاهی حاصل از موتور نمونه ساخته شده، اعتبار روابط تحلیلی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سیم‌پیچ یک طبقه، شکل BACK-EMF، ریبیل گشتاور، کوتاهی گام آهنربا، موتور BLDC نوع IPM

A New Method to Select the Magnet Pitch for BLDC Motor Type of IPM in Order to Achieve the Motor Desired Characteristics

M. Jafarboland¹, M. Mikhak Biranvand², M. H. Rismani³

1, 2 & 3- Faculty Electrical Engineering, Malek-Ashtar University, Esfahan, Iran

Abstract: Various arrangements can be made for winding of full slot brushless DC (BLDC) motors. In this paper, two kinds of winding arrangements, full pitch single layer winding and fractional pitch single layer winding, for inner permanent magnet brushless DC motor (IPMBLDC) with 24 slots and 4-pole have been presented. Then, a method was presented for full slot motors by using of analytic relations, which based on proposed windings, by optimal choice of small magnet pitch, ideal BACK-EMF for BLDC motor can be provided. The proposed method was verified by FEM analyze so the results shown characteristics BACK-EMF, cogging torque and ripple of torque were desirably provided for IPMBLDC motor by optimal choice of small magnet pitch. By considering the constant geometric dimensions of motor, both windings have same characteristics for IPMBLDC motor (24 slots and 4-pole) and due to fractional pitch single layer winding needs the less wire than another type of winding, fractional pitch single layer winding has a relative advantage. In addition to FEM analyzes, also, the experimental results confirm the validity of the analytic relations.

Keywords: single layer winding, BACK-EMF, IPMBLDC motor, torque ripple, short magnet pitch.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۳/۰۲/۳۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۳/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۸/۲۴

نام نویسنده مسئول: مرتضی میخک بیرانوند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - شاهین شهر - بلوار دانشگاه - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۱- مقدمه

امروزه موتورهای IPM به دلیل مزایای بسیار زیادی که دارند جای پای خود را به سرعت در صنایع مختلف باز کرده‌اند و به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجایی که در موتورهای IPM آهنرباهای دائم درون روتور جاگذاری می‌شوند، اندوکتانس محور q از اندوکتانس محور d بزرگ‌تر است که این اختلاف اندوکتانس محورها باعث تولید گشتاور رلوکتانسی و بهبود راندمان می‌شود و کنترل محدوده وسیعی از سرعت را با استفاده از تضعیف شار امکان‌پذیر می‌کند [۲، ۱]. مزایای دیگر موتور IPM عبارت‌اند از: آهنربا دائم به دلیل مستطیلی بودن دارای شکل ساده و مناسب است، آهنربا به راحتی درون روتور محکم می‌شود، آهنربا به خوبی از نظر مکانیکی محافظت شده است، تلرانس مکانیکی به دلیل عدم نصب آهنربا بر روی سطح روتور کاهش می‌یابد در نتیجه تأثیر تلرانس مکانیکی بر گشتاور اثر دندانه‌ای و ریبیل گشتاور کم می‌شود [۳].

در موتورهای IPM انتخاب توپولوژی روتور و نحوه سیم‌پیچی موتور به تعداد شیار و تعداد قطب بستگی دارد. در بسیاری از مقالات آرایش‌های سیم‌پیچی برای موتورهای IPM به خصوص از نوع BLAC با تعداد شیار و تعداد قطب مختلف، مشخص شده و مشخصات موتور را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴-۸]. در این مقالات عموماً موتورهای شیار کسری مورد بررسی قرار گرفته است. در موتورهای شیار کسری با تعداد شیار و تعداد قطب معلوم، انتخاب نوع سیم‌پیچی محدود است و عموماً سیم‌پیچی بهینه، به صورت دولایه و به گونه‌ای است که اختلاف فاز کلاف‌های هر فاز مینیمم گردد [۹]. با انتخاب ترکیب تعداد شیار و تعداد قطب مناسب موتور شیار کامل حاصل می‌گردد، که آرایش‌های سیم‌پیچی مختلفی برای موتورهای BLDC شیار کامل بخصوص در مواردی که تعداد شیارها زیاد باشد، می‌توان ارائه داد.

در این مقاله ابتدا نحوه انتخاب سیم‌پیچی برای یک نمونه موتور IPM از نوع BLDC سه فاز شیار کامل (۲۴ شیار ۴ قطب) تشریح می‌گردد و سپس با استفاده از تئوری‌های که مطرح خواهد شد دو نوع سیم‌پیچ یک طبقه از نوع گام کامل و گام کسری پیشنهاد می‌شود. برای سیم‌پیچ‌های پیشنهاد شده با استفاده از یک سری روابط تحلیلی یک روش پیشنهاد می‌گردد به نحوی که با انتخاب بهینه گام آهنربا، BACK-EMF مطلوب برای موتور شیار کامل فراهم شود. برای بررسی صحت روش پیشنهادی، خروجی‌های موتور نمونه با استفاده از روش المان محدود استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در انتها سیم‌پیچ‌های مطرح شده باهم مقایسه شده و سیم‌پیچ مناسب برای ساخت موتور نمونه انتخاب می‌گردد و نتایج حاصل از تست موتور مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

۲- سیم‌پیچی یک طبقه گام کامل

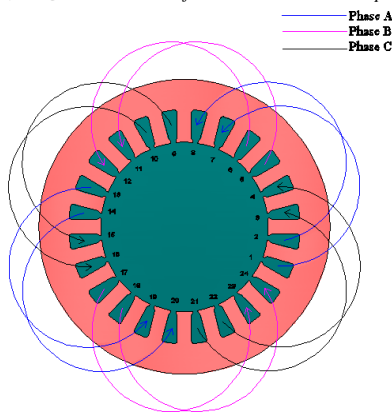
با احتساب کامل بودن گام سیم‌پیچی، گام کلاف به صورت زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$s = \frac{N_s}{N_m} = \frac{24}{4} = 6 \quad (1)$$

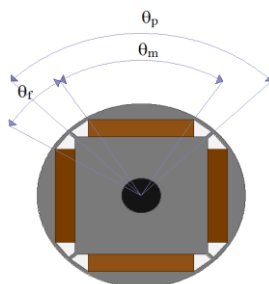
که N_s تعداد شیارهای استاتور و N_m تعداد قطب‌های روتور است. در اینجا با احتساب اینکه سیم‌پیچی یک طبقه باشد، سهم هر فاز ۴ کلاف است. چهار کلاف که کمترین اختلاف فاز را باهم دارند به عنوان کلاف‌های یک فاز انتخاب می‌گردند. جابجایی کلاف‌های فازها نسبت به یکدیگر بر حسب شیار با رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$K_0 = \frac{2 N_s}{3 N_m} = \frac{2 \times 24}{3 \times 4} = 4 \quad (2)$$

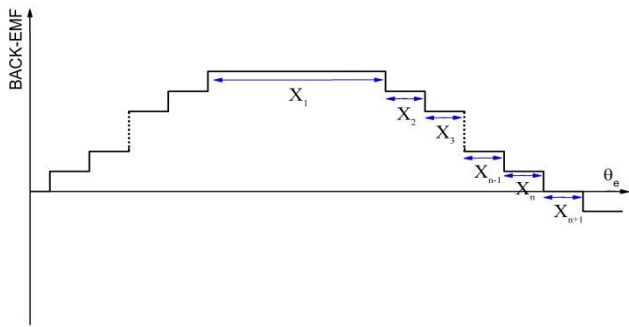
بدین طریق سیم‌پیچی یک طبقه گام کامل برای موتور ۲۴ شیار ۴ قطب به صورت شکل (۱) می‌شود. اگر موتور BLDC با جریان مستطیلی ۱۲۰ درجه الکتریکی تغذیه گردد، مشخصه‌های اصلی موتور هنگامی مطلوب می‌گردد که BACK-EMF به صورت دوزنقه‌ای و با سطح مسطح ۱۲۰ درجه الکتریکی باشد. با مشخص شدن نحوه سیم‌پیچی موتور، شکل هندسی روتور و آهنرباها تعیین کننده شکل BACK-EMF است. نمای هندسی موتور IPM در شکل (۲) نشان داده شده است، در این شکل θ_p گام قطب و θ_m زاویه گام آهنربا است که کسری از θ_p است و همچنین θ_f زاویه کوتاهی گام آهنربا است.



شکل (۱): موتور ۲۴ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی یک طبقه گام کامل



شکل (۲): شکل هندسی روتور IPM



شکل (۴): BACK-EMF حاصل از n کلاف سری با اختلاف فاز برابر

در اینجا با توجه به شکل (۴) یک سری روابط تحلیلی ارائه شده است که بتوان به سادگی BACK-EMF را مشخص کرد، به این صورت که اگر θ_c و θ_f بر حسب درجه الکتریکی باشند آنگاه X_1 تا X_{n+1} بر حسب درجه الکتریکی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} X_1 &= 180 - (n-1) \times \theta_c - \theta_f \\ X_2 &= \min(\theta_f, \theta_c) \\ X_3 &= \min(|\theta_c - \theta_f|, \theta_c) \\ X_4 &= \min(|2\theta_c - \theta_f|, X_2) \\ X_5 &= \min(|3\theta_c - \theta_f|, X_3) \\ X_6 &= \min(|4\theta_c - \theta_f|, X_4) \\ X_7 &= \min(|5\theta_c - \theta_f|, X_5) \\ &\vdots \\ X_n &= \min(|(n-2)\theta_c - \theta_f|, X_{n-2}) \\ X_{n+1} &= 180 - X_1 - X_2 - X_3 - \dots - X_n \end{aligned} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) منظور از $X_3 = \min(|\theta_c - \theta_f|, \theta_c)$ این است که مقدار مینیمم θ_c و قدر مطلق $\theta_c - \theta_f$ برای X_3 در نظر گرفته می‌شود. مجموع معادلات تعریف شده در رابطه (۴) برای حالتی که گام کلاف کامل باشد صادق است. با توجه به اینکه برای سیم‌پیچ مطرح شده در اینجا $\theta_c = 30^\circ$ است، در بخش‌های بعد نحوه انتخاب θ_f بهینه برای سیم‌پیچ فوق بر اساس رابطه (۴) بررسی می‌شود.

۳- سیم‌پیچی یک طبقه گام کسری

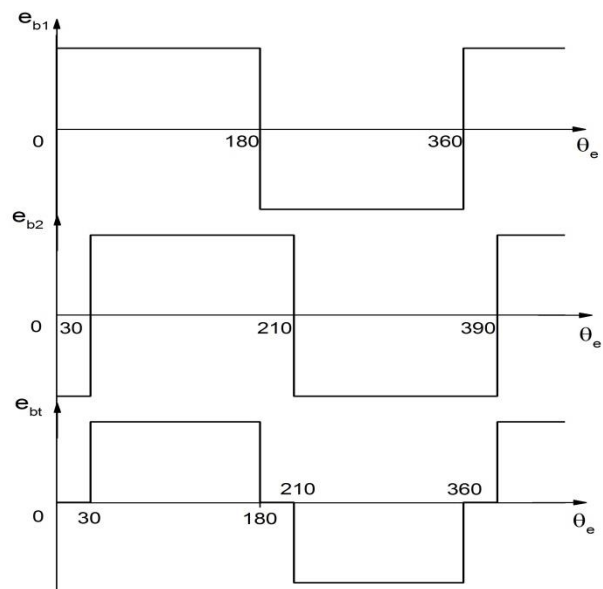
در این بخش با یک شیار کوتاهی گام کلاف برای موتور ۲۴ شیار ۴ قطب، یک نوع سیم‌پیچی یک طبقه گام کسری معتبر معرفی شده است به گونه‌ای که این سیم‌پیچی بتواند مشخصات مطلوب را برای موتور BLDC نوع IPM فراهم آورد. همان‌گونه که در رابطه (۱) مشاهده شد برای موتور ۲۴ شیار ۴ قطب، گام کلاف برابر با ۶ است بدین صورت با یک شیار کوتاهی گام کلاف، شکل (۵) شمای سیم‌پیچی یک طبقه گام کسری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) می‌توان گفت که ۴ کلاف هر فاز با یکدیگر هم‌فازند در نتیجه BACK-EMF هر فاز کاملاً مشابه با BACK-EMF یکی از کلاف‌های تشکیل دهنده آن فاز است. بدین طریق در این قسمت BACK-EMF یک کلاف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

BACK-EMF القاشده در هر کلاف بر اساس رابطه (۳) به دست

می‌آید [۹].

$$e_b = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{N_m}{2} w_m \frac{d\lambda}{d\theta_e} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) λ شار پیوندی با کوئل، w_m سرعت روتور بر حسب رادیان بر ثانیه و θ_e موقعیت روتور بر حسب درجه الکتریکی است. BACK-EMF القاشده در هر فاز از مجموع BACK-EMF چهار کلاف حاصل می‌شود. در سیم‌پیچی یک طبقه گام کامل پیشنهاد شده در شکل (۱)، دو کلاف مربوط به هر فاز که مجاور با یکدیگر هستند ۳۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند و این شرایط برای دو کلاف دیگر فاز مربوطه عیناً تکرار می‌گردد در نتیجه BACK-EMF فاز از نظر دامنه دو برابر و از نظر شکل و فاز عیناً مشابه BACK-EMF حاصل شده از کلاف‌های مجاور هم است. از این رو در اینجا BACK-EMF حاصل از دو کلاف مجاور هم در شکل (۳) مورد بررسی قرار گرفته است که در این شکل فرض بر این است که گام آهنربا کامل است.



شکل (۳): BACK-EMF دو کلاف با اختلاف فاز ۳۰ درجه الکتریکی

همان‌گونه که از شکل (۳) مشاهده می‌شود BACK-EMF حاصل شده به صورت یک موج مستطیلی با سطح ۱۵۰ درجه الکتریکی است. از آنجایی که سطح مسطح شکل موج BACK-EMF مطلوب برای موتور BLDC باید ۱۲۰ درجه الکتریکی باشد، شکل (۳) قابل قبول نیست. با مشخص بودن نحوه سیم‌پیچی تنها با تغییرات در توپولوژی روتور می‌توان BACK-EMF را تغییر داد. اگر گام آهنربا به اندازه θ_f کوتاه شود، مجموع BACK-EMF ایجاد شده برای n کلاف سری شده که دارای گام کامل هستند و به صورت متوالی با یکدیگر اختلاف فازی برابر θ_c دارند را در یک نیم‌سیکل می‌توان به صورت شکل (۴) نشان داد. شکل (۴) با فرض شرایط ایده‌آل ترسیم شده است یعنی از شار نشستی و اثر دندانه‌های استاتور صرف نظر شده است.

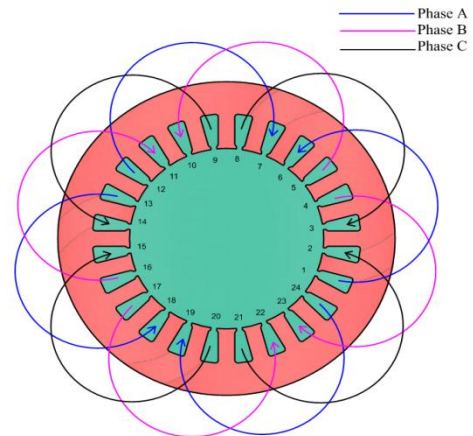
اساس شکل (۴) و رابطه (۴) و با این فرض که $n=2$ و θ_c اختلاف فاز دو بازوی کلاف باشد، مشخص کرد. برای موتور ۲۴ شیار ۴ قطب در دست بررسی چون که گام کلاف ۱۵۰ درجه الکتریکی است، بازوهای کلاف ۳۰ درجه الکتریکی باهم اختلاف فاز دارند بدین صورت فرض می‌شود که $\theta_c = 30^\circ$ است. با این احتساب و بر اساس تئوری‌های بیان شده این نتیجه حاصل می‌شود که هر دو سیم‌پیچ مطرح شده شرایط کاملاً یکسانی را برای BACK-EMF فاز موتور BLDC فراهم می‌کنند.

۴- بررسی نتایج تحلیلی و المان محدود

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته هر دو سیم‌پیچ یک طبقه گام کامل و گام کسری ارائه شده در بخش‌های قبلی مشخصات کاملاً یکسانی را برای BACK-EMF موتور BLDC فراهم می‌کنند. با توجه به مجموع معادلات تعریف شده در رابطه (۴)، اگر $n=2$ و $\theta_c = 30^\circ$ را در این رابطه جاگذاری کنیم BACK-EMF حاصل شده برای این دو سیم‌پیچ به ازای θ_f ‌های مختلف به دست می‌آید. در این بخش علاوه بر نتایج تحلیلی، نتایج المان محدود به دست آمده از نرم‌افزار ماکسول نیز بررسی می‌شوند. در جدول (۱) پارامترهای موتور BLDC نوع IPM در دست بررسی نشان داده شده‌اند.

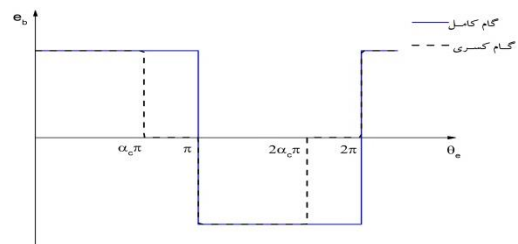
شکل (۷) برای سه مقدار مختلف θ_f ، شکل موج BACK-EMF استخراج شده از طریق رابطه تحلیلی (۴) و آنالیز المان محدود که توسط نرم‌افزار ماکسول به دست آمده است را نشان می‌دهد. همان گونه که پیش‌بینی می‌شد نتایج استخراج شده از طریق آنالیز المان محدود نیز این موضوع را نشان می‌دهد که هر دو سیم‌پیچ مطرح شده BACK-EMF مشابهی برای یک موتور با ابعاد هندسی یکسان تولید می‌کنند.

قابل ذکر است که خروجی‌های آنالیزهای المان محدود نشان داده شده در شکل (۷) مربوط به حالت بی‌باری موتور است. در نتایج تحلیلی به دست آمده از رابطه (۴) شار پیوندی با کلاف‌ها ایده‌آل در نظر گرفته شده است یعنی اینکه توزیع فضایی شار در سطح قطب‌ها به صورت یکنواخت فرض شده است ولی در شرایط واقعی به دلیل وجود شار ناشی بین قطب‌های هم‌جوار روتور و همچنین تغییر رلوکتانس مسیر عبور شار در موقعیت‌های مختلف روتور به دلیل وجود دندان‌های استاتور، توزیع شار غیریکنواخت می‌شود. برخلاف روابط تحلیلی، آنالیز المان محدود نتایج را با لحاظ کردن شرایط واقعی موتور نشان می‌دهد به همین دلیل اختلاف اندکی بین نتایج تحلیلی و نتایج آنالیز المان محدود در شکل (۷) مشاهده می‌شود که این اختلاف با ریبیل ایجاد شده در سطح مسطح BACK-EMF (به دلیل وجود دندان‌های استاتور) به دست آمده از آنالیز المان محدود مشهود شده است. بدین صورت می‌توان گفت که نتایج آنالیز المان محدود صحت تحلیل‌های صورت گرفته بر اساس رابطه (۴) را تأیید می‌کند.



شکل (۵): موتور ۲۴ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی یک طبقه گام کسری

اگر شار پیوندی با کلاف‌ها ایده‌آل در نظر گرفته شوند و از اثر شار ناشی و وجود شیارهای استاتور صرف نظر شود و با فرض اینکه گام آهنربا کامل باشد، شکل (۶) BACK-EMF القاشده در هر کلاف را با در نظر گرفتن کلاف با گام کامل و گام کوتاه نشان می‌دهد [۹].



شکل (۶): BACK-EMF القاشده در کلاف با گام کوتاه شده

در شکل (۶) ضریب گام کلاف است که α_c بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

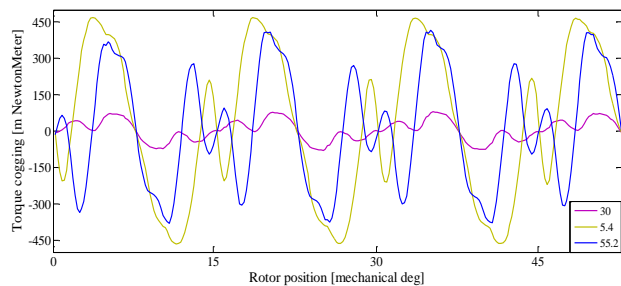
$$\alpha_c = \frac{N_m}{N_s} \times S_c \quad (5)$$

در رابطه (۵) S_c گام کلاف بر حسب شیار در حالت کوتاه‌شدگی است. بر اساس رابطه (۵) و با توجه به اینکه برای موتور ۲۴ شیار ۴ قطب $S_c = 5$ در نظر گرفته شده است در نتیجه $\alpha_c = 5/6$ است. با توجه به مطالب فوق می‌توان گفت که BACK-EMF به صورت یک موج مستطیلی با سطح ۱۵۰ درجه الکتریکی است. اما همان گونه که گفته شد برای حاصل شدن مشخصات مطلوب موتور BLDC باید سطح مسطح شکل موج BACK-EMF ۱۲۰ درجه الکتریکی باشد. با مشخص بودن نحوه سیم‌پیچی در اینجا نیز با تغییرات در توپولوژی روتور (تغییر گام آهنربا) می‌توان BACK-EMF را تغییر داد.

در سیم‌پیچی گام کسری چون که زاویه گام کلاف به اندازه کسری از ۱۸۰ درجه الکتریکی است باعث می‌شود تا بازوهای کلاف هم‌فاز نباشند در نتیجه ولتاژ القاشده در دو بازوی کلاف غیر هم‌فاز هستند حال شکل BACK-EMF کلاف به این اختلاف فاز وابسته است. این مشابه حالتی است که دو کلاف (گام کامل) غیر هم‌فاز سری شده باشند بدین طریق می‌توان BACK-EMF کلاف با گام کوتاه شده را بر

بعضی از مشخصات خروجی موتور BLDC نوع IPM را با اعمال دو سیم‌پیچ مطرح‌شده و به ازای مقادیر مختلف برای θ_f ، در شرایطی که موتور با جریان مستطیلی با پالس‌های ۱۲۰ درجه الکتریکی تغذیه می‌شود را مورد بررسی قرار می‌گیرد.

گشتاور اثر دندانه‌ای که از مهم‌ترین معضلات موتورهای آهنربا دائم محسوب می‌شود به علت اثر متقابل دندانه‌های استاتور و آهنربا ایجاد می‌گردد، بنابراین نوع سیم‌پیچی تأثیری بر گشتاور اثر دندانه‌ای ندارد. شکل (۸) گشتاور اثر دندانه‌ای استخراج‌شده از آنالیز المان محدود را به ازای سه مقدار θ_f نشان می‌دهد. به ازای $\theta_f = 30^\circ$ گشتاور اثر دندانه‌ای به میزان قابل‌توجهی کمتر است. البته قابل‌ذکر است که در حالت کلی گشتاور اثر دندانه‌ای موتور ۲۴ شیار ۴ قطب به ازای $\theta_f = 30^\circ$ ، $\theta_f = 60^\circ$ ، $\theta_f = 90^\circ$ ، $\theta_f = 120^\circ$ و $\theta_f = 150^\circ$ کمترین مقدار را دارد [۱۰] که با توجه به مباحث قبلی، از این میان $\theta_f = 30^\circ$ مشخصات مطلوبی را برای موتور BLDC فراهم می‌کند.



شکل (۸): گشتاور اثر دندانه‌ای حاصل‌شده به ازای $\theta_f = 30^\circ$ ، $\theta_f = 5.4^\circ$ و $\theta_f = 55.2^\circ$

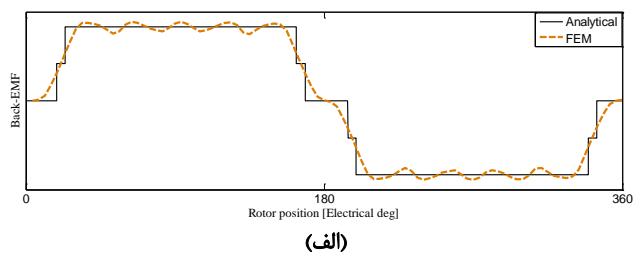
یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های موتورهای آهنربا دائم ریبیل گشتاور است، مقدار ریبیل گشتاور بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100 \quad (۶)$$

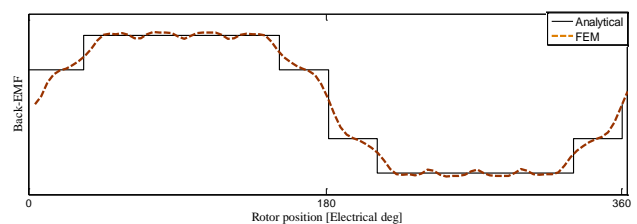
در رابطه (۶) T_{min} و T_{max} به ترتیب مقدار گشتاور ماکزیمم و مینیمم ایجادشده در طول یک سیکل کاری است. با استفاده از رابطه (۶) ریبیل گشتاور را می‌توان از نتایج تحلیل المان محدود محاسبه کرد، که بر این اساس شکل (۹) ریبیل گشتاور موتور BLDC نوع IPM (۲۴ شیار ۴ قطب) را با اعمال سیم‌پیچ‌های مطرح‌شده و به ازای ۱۴ مقدار مختلف θ_f نشان می‌دهد. چون که به ازای مقادیر مختلف θ_f توزیع چگالی شار در موتور متفاوت است به همین منظور در آنالیز المان محدود به ازای مقادیر مختلف θ_f ، ابعاد هندسی موتور از قبیل عرض دندانه استاتور و عرض یوغ استاتور به نحوی تغییر داده شده‌اند که موتور به ازای این مقادیر θ_f دچار اشباع نشود. در اینجا برای حاصل شدن θ_f های مختلف، ابعاد آهنربا ثابت نگه‌داشته شده و قطر روتور تغییر یافته است که با توجه به توپولوژی روتور در موتورهای IPM که در شکل (۲) نشان داده شد این مهم محقق می‌شود. ثابت ماندن ابعاد آهنرباها باعث می‌شود تا منبع تولید شار در موتور به ازای مقادیر

جدول (۱): پارامترهای موتور BLDC نوع IPM مورد بررسی

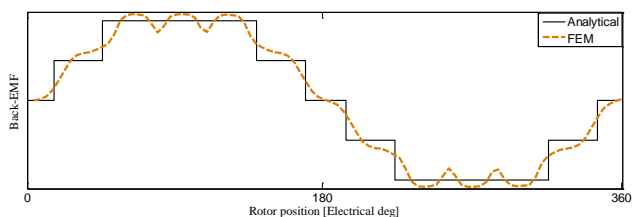
مقدار	پارامتر
۲۴	تعداد شیارهای استاتور
۴	تعداد قطب‌های روتور
۸۵۰۰rpm	سرعت
۴۶۸۰W	توان خروجی
۷۲V	ولتاژ تغذیه DC
۲	تعداد دور هر کلاف
۰/۸mm	طول فاصله هوایی
۱۰۰mm	طول استاتور
۱۱۴mm	قطر بیرونی استاتور
۱/۲۳T	چگالی شار پسماند آهنربا
۱۰mm	ضخامت آهنربا
۳۰mm	عرض آهنربا
Nd-Fe-B35	نوع آهنربا



(الف)



(ب)



(ج)

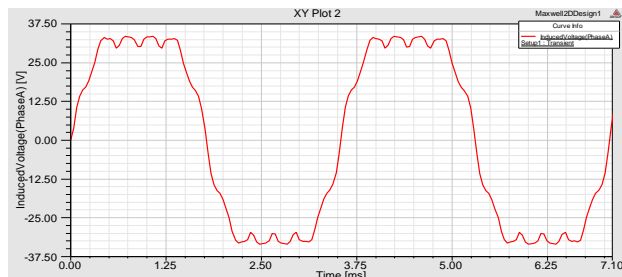
شکل (۷): BACK-EMF حاصل‌شده از طریق روابط تحلیلی و آنالیز المان محدود به ازای؛ (الف) $\theta_f = 5.4^\circ$ ، (ب) $\theta_f = 30^\circ$ ، (ج) $\theta_f = 55.2^\circ$

با توجه به رابطه (۴) از لحاظ تئوری (یا تحلیلی) می‌توان گفت برای اینکه سطح مسطح شکل موج BACK-EMF حاصل‌شده ۱۲۰ درجه الکتریکی گردد θ_f باید ۳۰ درجه الکتریکی باشد که صحت این موضوع در شکل (۷-ب) با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز المان محدود نیز نشان داده شده است. برای اینکه اطمینان حاصل شود که انتخاب $\theta_f = 30^\circ$ بهترین انتخاب برای این دو سیم‌پیچ است و هم اینکه دو سیم‌پیچ مطرح‌شده با یکدیگر مقایسه شوند، در این قسمت

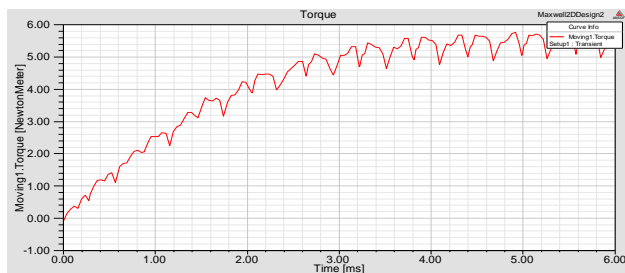
با توجه به مواد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که برای موتور BLDC نوع IPM شیار کامل که امکان کسری کردن سیم‌پیچ در آن وجود دارد همانند موتور ۲۴ شیار ۴ قطب که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت، سیم‌پیچ یک طبقه گام کسری نسبت سیم‌پیچ یک طبقه گام کامل مفیدتر و مؤثرتر واقع می‌شود. البته این استدلال برای موتور BLDC از نوع SPM نیز صادق است. در نهایت سیم‌پیچی یک طبقه گام کسری و $\theta_f = 27^\circ$ (جهت جبران شار نشتی θ_f را 3° کوتاه‌تر در نظر گرفته شده است) به‌عنوان انتخاب نهایی برای موتور BLDC نوع IPM ۲۴ شیار ۴ قطب، انتخاب شده است. شکل (۱۰) BACK-EMF و گشتاور خروجی موتور نهایی را نشان می‌دهد.

۵- نتایج حاصل از ساخت

با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، در این قسمت نتایج حاصل‌شده از ساخت موتور BLDC از نوع IPM، ۲۴ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی یک طبقه گام کسری و $\theta_f = 27^\circ$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب استاتور در حال سیم‌پیچی و نمای موتور ساخته‌شده را نشان می‌دهند. از آنجایی‌که سیم‌پیچ استاتور به دلیل بالا بودن جریان به سیم با قطر بزرگ نیاز دارد در اینجا برای سهولت در سیم‌پیچی به جای یک‌رشته سیم از ۱۶ رشته سیم موازی شده استفاده شده است که این موضوع به‌وضوح در شکل (۱۱) قابل مشاهده است.



(الف)

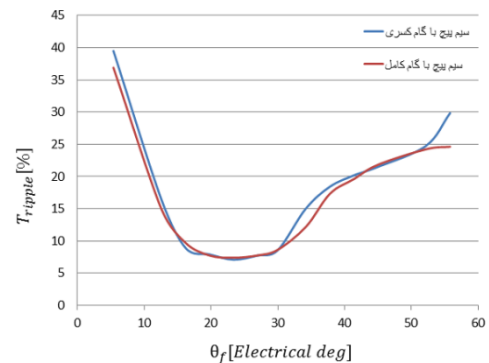


(ب)

شکل (۱۰): مشخصات موتور؛ (الف) BACK-EMF (ب) گشتاور خروجی

شکل (۱۳) شکل موج ولتاژ فاز موتور را که از تست بی‌باری به دست آمده است را نشان می‌دهد، از آنجایی‌که در حالت بی‌باری افت ولتاژ ناشی از مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچ ناچیز است بنابراین می‌توان ولتاژ فاز موتور را به‌عنوان BACK-EMF موتور مورد ارزیابی قرار داد. BACK-EMF به‌دست‌آمده از آنالیز المان محدود که در شکل (۱۰-ب) نشان داده شد دوباره در گوشه شکل (۱۳) نمایان گردیده

مختلف θ_f ثابت باشد و هم اینکه گشتاور رلوکتانسی (که در موتورهای IPM وجود دارد) متأثر از تغییر ابعاد آهنربا نباشد.

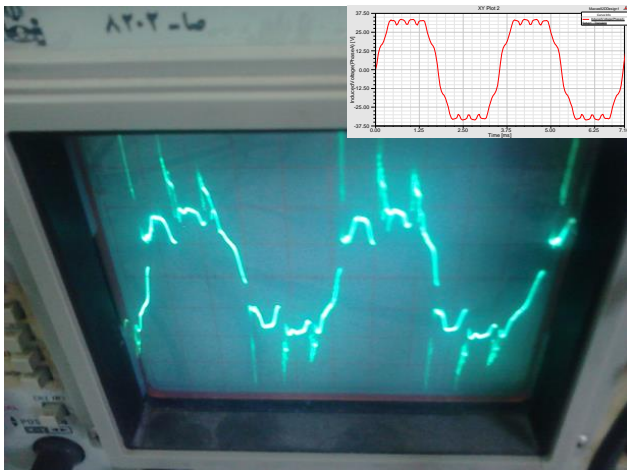


شکل (۹): ریپل گشتاور حاصل‌شده به ازای مقادیر مختلف θ_f

همان‌گونه که از شکل (۹) مشاهده می‌شود کمترین ریپل گشتاور به ازای $20^\circ \leq \theta_f \leq 30^\circ$ حاصل می‌گردد و این در صورتی است که پیش‌بینی می‌شد به ازای $\theta_f = 30^\circ$ کمترین ریپل گشتاور حاصل گردد. علت این امر این است که در تحلیل‌های صورت گرفته شرایط موتور BLDC را ایده‌آل در نظر گرفته شده است درحالی‌که در آنالیز المان محدود موتور در شرایط واقعی بررسی می‌گردد به صورتی که اثر شار نشتی و دندانه‌های استاتور در نظر گرفته می‌شوند. با این اوصاف می‌توان گفت که شکل (۹)، تحلیل‌های صورت گرفته برای θ_f را مورد تأیید قرار می‌دهد. نکته قابل‌تأمل این است که هر دو سیم‌پیچ مطرح‌شده شرایط تقریباً برابری را برای ریپل گشتاور فراهم کرده‌اند که با توجه به اینکه هر دو سیم‌پیچ BACK-EMF یکسانی را ایجاد کرده بودند این موضوع قابل پیش‌بینی بود.

با توجه به نتایج و مباحث مطرح‌شده مشخص گردید مشخصاتی از قبیل BACK-EMF و ریپل گشتاور را که دو سیم‌پیچ گام کسری و سیم‌پیچ گام کامل برای موتور BLDC نوع IPM ۲۴ شیار ۴ قطب ارائه می‌دهند مشابه هم می‌باشند و چون قطر و تعداد دور این دو سیم‌پیچ یکسان است پس فضای شیار و در نتیجه ابعاد هندسی استاتور برای هر دو سیم‌پیچ نیز یکسان است. تنها وجه تمایز این دو سیم‌پیچ پیشانی کلاف‌ها است که در سیم‌پیچ گام کسری چون گام کلاف‌ها به اندازه یک شیار کوتاه شده است به‌تبع از پیشانی کلاف‌ها نیز کاسته می‌شود که این امر چندین مزیت را به همراه دارد:

- ✓ حجم سیم مصرفی در موتور کاهش می‌یابد.
- ✓ تلفات مسی موتور کاهش یافته و در نتیجه راندمان موتور افزایش می‌یابد.
- ✓ همان‌گونه که در شکل (۱) و شکل (۵) دیده می‌شود چون که در سیم‌پیچ گام کسری کلاف‌ها کمتر از روی هم عبور می‌کنند در نتیجه پیشانی کلاف‌ها حجم کمتری را اشغال می‌کنند و این باعث می‌شود که طول موتور و در نتیجه حجم و وزن موتور کاهش یابد.



شکل (۱۳): Back-EMF به دست آمده از تست بی‌باری موتور

۶- نتیجه‌گیری

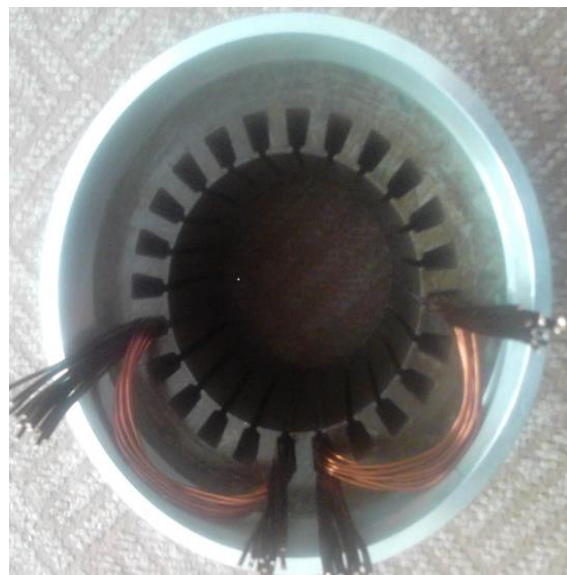
در این مقاله بررسی سیم‌پیچی موتورهای BLDC شیار کامل هدف‌گذاری گردید. بدین منظور برای یک نمونه موتور BLDC نوع IPM شیار کامل (۲۴ شیار ۴ قطب) دو نوع سیم‌پیچی معتبر یک طبقه، یکی سیم‌پیچی با گام کامل و دیگری سیم‌پیچی با گام کسری پیشنهاد شد. در ادامه با استفاده از یکسری روابط تحلیلی روشی ارائه شد تا کوتاهی گام آهنربا به نحوی بهینه انتخاب گردد که سیم‌پیچ‌های پیشنهاد شده بتوانند مشخصات مطلوبی را برای موتور BLDC فراهم کنند. با توجه به روابط ارائه شده کوتاهی گام آهنربا بهینه برای سیم‌پیچ‌های پیشنهاد شده $\theta_f = 30^\circ$ حاصل شد. نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود، را $\theta_f = 27^\circ$ نشان داد که علت این اختلاف صرف نظر شدن از اثر دندانه‌های استاتور و شار نشتی در روابط تحلیلی است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که به ازای ابعاد هندسی یکسان برای موتور، مشخصات مطلوبی از قبیل BACK-EMF، گشتاور اثر دندانه‌ای و ریپل گشتاور را که دو سیم‌پیچ گام کسری و سیم‌پیچ گام کامل با انتخاب بهینه کوتاهی گام آهنربا ارائه می‌دهند مشابه هم می‌باشند. با توجه به این موضوع و از آنجایی که در سیم‌پیچ گام کسری پیشانی کلاف‌ها کوتاه‌تر شده است باعث می‌گردد تا در موتورهای BLDC شیار کامل این سیم‌پیچی نسبت به سیم‌پیچی گام کامل سودمندتر واقع گردد. در نهایت نتایج آزمایشگاهی حاصل از ساخت موتور BLDC نوع IPM ۲۴ شیار ۴ قطب، صحت روش پیشنهادی و تحلیل‌های صورت گرفته را مورد تأیید قرار می‌دهد.

مراجع

- [1] Y. Honda, H. Murakami, N. Kazushige, T. Higaki, S. Morimoto and Y. Takeda, "Optimum design of a multilayer interior permanent magnet synchronous motor using reluctance torque," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, pp. 64-72, Apr. 1999.
- [2] L. Qi, F. Tao, W. Xuhui, Y. Li, T. Xiang and L. Yong, "Stator teeth eddy-current loss analysis of interior permanent magnet machine during flux weakening," *International Conference of Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1226 - 1230, Oct. 2013.

است تا به سادگی نتیجه تست بی‌باری موتور با آنالیز المان محدود مقایسه شود. شکل (۱۳) به وضوح مشابه بودن نتایج تست بی‌باری موتور با آنالیز المان محدود را نشان می‌دهد، به دلیل پایین بودن فرکانس نمونه‌برداری اسیلوسکوپ، شکل موج حاصل شده از تست بی‌باری منقطع ظاهر شده است در صورتی که اگر فرکانس نمونه‌برداری اسیلوسکوپ بالا باشد نتیجه تست بی‌باری موتور با آنالیز المان محدود بیش از پیش تطابق خواهد داشت.

همان‌گونه که قابل پیش‌بینی بود اثر دندانه‌های استاتور در قسمت پیک BACK-EMF، در تست بی‌باری موتور نیز ظاهر شده است ولی پیک‌های مزاحمی علاوه بر اثر دندانه‌های استاتور در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که این پیک‌های ولتاژ بر اثر سوئیچ زنی درایو موتور در لحظه تعویض فازهای موتور، تولید شده‌اند. با صرف نظر از پیک‌های تولید شده می‌توان گفت که مشابه بودن BACK-EMF حاصل شده از تست بی‌باری موتور و آنالیز المان محدود، صحت تحلیل‌های انجام شده در این مقاله را مورد تأیید قرار می‌دهد.



شکل (۱۱): استاتور در حال سیم‌پیچی



شکل (۱۲): نمای موتور ساخته شده

- [3] G. Ombach and Junak, "Torque ripple optimization of skewed IPM motor for field weakening operation," International Conference of Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 20-23, Aug. 2011.
- [4] D. Ishak, Z. Q. Zhu and D. Howe, "High torque density permanent magnet brushless machines with similar slot and pole numbers," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 272, pp. 1767-1769, May. 2004.
- [5] J. Wang, X. Yuan and K. Atallah, "Design optimization of a surface-mounted permanent-magnet motor with concentrated windings for electric vehicle applications," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 3, pp. 1053-1064, March. 2013.
- [6] D. Noia, L. Pio, I. Spina, R. Rizzo and D. L. Cascia, "Mathematical model of a PM brushless motor with different stator-rotor pole pairs number," Vehicular Technology, Modelling Symposium (EMS), pp. 353-358, 2013.
- [7] G. Heins, D. Ionel and M. Thiele, "Winding factors and magnetic fields in permanent magnet brushless machines with concentrated windings and modular stator cores," Vehicular Technology, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 5048-5055, 2013.
- [8] L. Parsa and L. Hao, "Interior permanent magnet motors with reduced torque pulsation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, pp. 602-609, Feb. 2008.
- [9] Dr. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Designs*, Second Edition, Magna Physics Publishing, USA, pp. 125-150, 2006.
- [10] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," IEEE Transactions on energy conversion, vol. 15, no. 4, pp. 407-412, 2000.
- [11] H. Zeroug, Boukais B and Sahraoui H, "Analysis of torque ripple in a brushless DC motor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, pp. 1293-1296, March. 2002.