

طراحی و ساخت یک موتور القایی شارمحوری دوطرفه با استاتور دارای دندانه‌های مجزا

علی بهنیا^۱ و محمدرضا بقائی پور^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹	موتورهای القایی از جمله پرکاربردترین الکتروموتورهای صنعتی هستند. متداول‌ترین ساختار آنها ساختار استوانه‌ای است که دارای معایب عمده‌ای نظیر چگالی توان پایین و وجود مقدار قابل توجهی پیشانی‌های کلاف در سیم‌پیچی‌های استاتور می‌باشد. البته، تاکنون چند نوع ساختار شارمحوری نیز برای این موتورها پیشنهاد شده که چگالی توان بالاتری نسبت به ساختارهای استوانه‌ای دارند، اما فرآیند ساخت آنها (مخصوصاً در ساختارهای شیاردار) نسبتاً پیچیده و هزینه‌بر می‌باشد. همچنین، بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی در راستای شعاعی در آنها غیریکنواخت است که تلفات هارمونیک ماشین را افزایش می‌دهد. در راستای رفع این‌گونه مشکلات، در این پژوهش یک موتور القایی شارمحوری با ساختاری جدید معرفی می‌گردد. در این ساختار، هسته استاتور به جای یوغ، از یک سری دندانه مجزا تشکیل شده که هر کدام جداگانه سیم‌پیچی می‌شوند. بدین‌سان، پیشانی‌های کلاف حذف شده و تمام بخش‌های سیم‌پیچی به‌طور یکسان در ایجاد ولتاژ القایی و گشتاور الکترومغناطیسی سهیم خواهند بود. همچنین، حجم هسته به‌میزان قابل توجهی کاهش یافته و چگالی توان ماشین افزایش می‌یابد. علاوه بر اینها، بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی در این ساختار در راستای شعاعی یکنواخت می‌باشد. در نهایت، اعتبار ادعاهای فوق و صحت عملکرد موتور القایی با ساختار پیشنهادی از طریق ساخت و آزمایش یک نمونه از آن اثبات گردیده است.
واژگان کلیدی: موتور القایی، ساختار شارمحوری، استاتور دارای دندانه‌های مجزا، حذف پیشانی‌های کلاف، طراحی ماشین الکتریکی.	

۱- مقدمه

موتورهای القایی یا آسنکرون پرکاربردترین موتورهای الکتریکی مورد استفاده در صنعت هستند که به دلیل مزایای متعددشان به نام اسب‌های کشنده صنعت لقب گرفته‌اند [۱]. کاربرد این موتورها در صنعت تنها به کارخانه‌ها محدود نبوده و حوزه‌های کاری متنوع دیگری از قبیل آسانسورها، قطارهای برقی و خودروهای الکتریکی را نیز شامل می‌شود، تا جاییکه بسیاری از پژوهش‌ها به مدل‌سازی و بهبود مکانیزم کنترلی این ماشین‌ها در حوزه‌های مختلف صنعت پرداخته‌اند [۲-۳]. با این وجود، این موتورها معایب قابل توجهی نیز به‌همراه دارند که البته اکثر این معایب از ساختارهای مرسوم آنها ناشی می‌شود. به همین دلیل، در

برخی مقالات روش‌هایی جهت جایگزین کردن موتورهای القایی مرسوم با دیگر مکانیزم‌های مغناطیسی پیشنهاد شده است [۴]. متداول‌ترین ساختار موتورهای القایی ساختار استوانه‌ای یا شار شعاعی می‌باشد [۵]. از مهمترین معایب این ساختار چگالی توان پایین (وزن نسبتاً زیاد) موتور است که محدودیت‌های اساسی را برای صنایع وابسته آن ایجاد کرده است. روش‌های متعددی جهت افزایش چگالی توان این موتورها ارائه شده که اغلب به تغییر سناریوی تغذیه آنها معطوف گشته‌اند [۶-۸]. تعداد اندکی نیز به توسعه ساختار استوانه‌ای موتورهای القایی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، با ایجاد شیارهای موربی در روتور می‌توان تا حد زیادی چگالی توان ماشین را بالا برد [۹]. این شیارها باعث

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m_baghayipour@kub.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گنبد کاووس

۲. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کوثر بجنورد

با توجه به معایب ساختارهای پیشین، ارائه ساختار جدیدی برای موتورهای القایی که در آن با حفظ مزایای شاخص این موتورها، معایب مذکور رفع شود، مورد استقبال صنایع قرار خواهد گرفت. بر این اساس، هدف مقاله پیش‌رو ارائه و ساخت ساختاری جدید برای موتور القایی است به طوری که معایب مذکور تا حد زیادی در آن رفع گردد.

۲- ساختار پیشنهادی

اجزای مختلف ساختار پیشنهادی برای موتورهای القایی شارمخوری و مراحل مونتاژ آن به‌طور کامل در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. مطابق شکل (۱-الف)، هسته استاتور در ساختار پیشنهادی به صورت یکپارچه و دارای دندانه و یوغ با شکلی که بیشتر شناخته شده است، نمی‌باشد بلکه از یک سری دندانه مجزا تشکیل شده که هرکدام از روی هم گذاشتن تعدادی ورق فولاد سیلیسیومی ساخته می‌شوند. این ورقه‌ها با استفاده از برش لیزر از صفحات بزرگ فولاد سیلیسیومی بدست می‌آیند. لازم به ذکر است که ساخت این نوع دندانه‌های بسیار ساده و کم‌هزینه‌تر از ساخت استاتور ساختارهای پیشین نوع شارمخوری می‌باشد. در ادامه، هر دندانه به‌صورت جداگانه سیم‌پیچی شده (شکل ۱-ب) و سپس تمام دندانه‌ها به‌وسیله دو صفحه از جنس تفلن در کنار یکدیگر قرار داده شده‌اند (شکل ۱-ج). استفاده از تفلن در این ساختار منجر به کاهش چشمگیر وزن موتور گشته و بنابراین در یک توان ثابت، موتور وزن بسیار کمتری خواهد داشت که می‌توان به افزایش هرچه بیشتر چگالی توان در این ساختار اشاره کرد. میله‌های قفس روتور در راستای شعاعی در داخل هسته روتور تعبیه شده‌اند (اصطلاحاً قفس خورشیدی). این میله‌ها به‌وسیله دو حلقه دایره‌ای شکل در شعاع‌های داخلی و خارجی اتصال کوتاه می‌گردند (شکل ۱-د). ساختار هسته روتور نیز در شکل (۱-ه) نشان داده شده است. نهایتاً با قرار دادن بلبرینگ‌ها در داخل نگهدارنده‌های استاتور و همچنین سوار کردن مجموعه استاتور بر روی پایه‌ها، مونتاژ نهایی موتور تکمیل می‌گردد (شکل ۱-و). واضح است که مقاومت سیم‌پیچی استاتور با طول سیم رابطه مستقیم دارد. از آنجا که در ساختارهای پیشین بخش نسبتاً قابل توجهی از طول سیم را پیشانی‌های کلاف (کله‌سیم‌ها) به‌خود اختصاص می‌دهند، به‌ناچار مقاومت سیم‌پیچی استاتور و در نتیجه تلفات اهمی موتور در این ساختارها مقادیر قابل توجهی داشته بدون آنکه افزایشی در گشتاور و ولتاژ القایی

نمود هر چه بیشتر میدان مغناطیسی در داخل روتور شده و از آنجا گشتاور القایی را افزایش می‌دهد. در زمینه تغییر ساختار باید اشاره نمود که موتورهای القایی در قالب دیسکی نیز طراحی و ساخته می‌شوند که اصطلاحاً به آنها لفظ تخت و یا شارمخوری اطلاق می‌شود. این ساختارها دارای تنوع فراوانی هستند که با اصلاح برخی از انواع آنها می‌توان چگالی توان ماشین را به میزان قابل توجهی بالا برد [۱۰]. در مرجع [۱۱-۱۲] با استفاده از ساختار شارمخوری دوطرفه، تلاش شده است تا با نحوه سربندی سیم‌پیچ‌ها، مسیر شار از روتور به‌صورت محوری عبور کرده و بنابراین یوغ روتور کاملاً حذف گردیده و در نتیجه چگالی توان ماشین افزایش یافته است. در این ساختار اگرچه یوغ روتور حذف گردیده است اما وجود دو استاتور علاوه‌بر افزایش وزن ماشین، پیچیدگی و هزینه ساخت را نیز بالا برده است. ساختارهای شارمخوری اگر چه می‌توانند با چگالی توان بالاتری نسبت به ساختارهای استوانه‌ای ساخته شوند [۱۳-۱۴]، اما همچنان معایب قابل توجهی نیز به همراه دارند. به‌عنوان مثال، در موتورهای القایی نوع شارمخوری شیاردار، ایجاد شیارهای استاتور فرآیند ماشین‌کاری بسیار پیچیده و هزینه‌بری را می‌طلبد که در بسیاری از موارد نتیجه کار نیز با دقت مطلوب سرانجام نخواهد یافت. از سوی دیگر، غیریکنواخت بودن چگالی شار مغناطیسی [۱۵] و بارگذاری الکتریکی در راستای شعاعی، تلفات هارمونیک و حرارتی قابل توجهی را برای موتورهای شارمخوری شارمخوری پیشین ایجاد می‌کند. علی‌الخصوص، به‌دلیل غیریکنواخت بودن بارگذاری الکتریکی در راستای شعاعی، دمای سیم‌پیچی در شعاع داخلی استاتور به‌میزان قابل توجهی از دما در شعاع خارجی آن بیشتر است و در نتیجه، نمی‌توان از بیشینه ظرفیت حرارتی سیم‌پیچ‌های استاتور استفاده نمود. با پیاده‌سازی موتور القایی در قالب ساختار شارمخوری بدون شیار و یا ساختارهای بدون هسته، تا حد زیادی می‌توان چگالی توان ماشین را بهبود بخشید. البته این ساختارها به‌دلیل افزایش فاصله هوایی مؤثر، جریان مغناطیس‌کنندگی و تلفات بالایی دارند. عیب اساسی دیگر در ساختارهای پیشین موتورهای القایی، وجود مقدار قابل توجهی از پیشانی‌های کلاف در سیم‌پیچی می‌باشد. این بخش‌ها نقشی در تولید گشتاور و ولتاژ القایی نداشته و تنها منجر به افزایش تلفات خواهند شد [۱۶].

از چرخش روتور قرار دارند. به عبارت دیگر، این ساختار به-طور ذاتی دارای یک سیستم خنک‌سازی با هوا بوده و بنابراین به سیستم خنک‌سازی مجزا (فن یا خنک‌سازی با آب، روغن و ...) نیاز ندارد. همین موضوع بسیاری از هزینه‌های ساخت موتور و نیز نویز صوتی آیرودینامیکی آن را کاهش خواهد داد.

از جمله معایب ساختار پیشنهادی می‌توان به بالابودن لختی و وجود نیروهای محوری اشاره نمود. از آنجایی که معمولاً موتورهای القایی موجود در صنعت توسط درایو کنترل می‌شوند، لختی بالای این ساختارها، آنچنان تأثیرات نامطلوبی در کاربردهای آنها نمی‌گذارد. از سویی دیگر، باتوجه به تقارن موجود در ساختارهای شارمحوری دوطرفه، چنانچه مراحل ساخت نیز با دقت و با استفاده از مواد و ابزارهای مناسب صورت پذیرد، نیروهای محوری نیز تا حد زیادی قابل مهار شدن است.

۳- طراحی ماشین و روابط ابعادی آن

در این بخش، با استفاده از روابط ابعادی ذیل، یک نمونه اولیه موتور القایی با ساختار پیشنهادی طراحی و ساخته می‌شود. بدین منظور ابتدا با توجه به معادله اساسی برای مقدار مؤثر ولتاژ هر فاز استاتور ماشین داریم:

$$V_{ph} = \sqrt{2} \pi k_w f N_{ph} \Phi_p \quad (1)$$

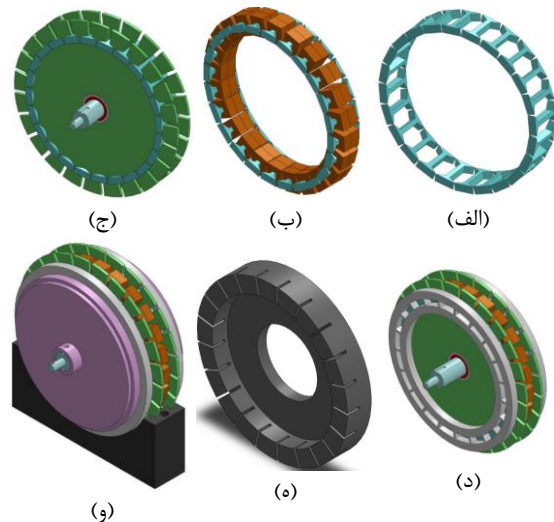
که در آن، f فرکانس ولتاژ ورودی بر حسب هرتز، Φ_p شار قطب ماشین بر حسب وبر، N_{ph} تعداد دورهای سری در هر فاز استاتور و k_w ضریب سیم‌پیچی می‌باشد. در ساختار ماشین پیشنهادی، شار قطب Φ_p به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi_p = B_{av} \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{8p} \quad (2)$$

که در آن، B_{av} ، D_o ، D_i و p به ترتیب نماینده چگالی شار متوسط فاصله هوایی، قطرهای خارجی و داخلی استاتور و تعداد جفت قطب‌های ماشین می‌باشد. با استفاده از روابط (۱) و (۲)، توان مکانیکی خروجی ماشین به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_{out} = m \eta N_{ph} I_{ph} \cos \varphi \\ = \sqrt{2} \pi k_w m \eta f N_{ph} I_{ph} B_{av} \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{8p} \cos \varphi \quad (3)$$

که در آن، I_{ph} ، m ، η و φ به ترتیب معرف مقدار مؤثر جریان



شکل ۱: اجزاء مختلف ساختار پیشنهادی و مراحل مونتاژ آن، (الف) دندانه‌های استاتور، (ب) اضافه شدن کویل‌های استاتور، (ج) اضافه شدن نگهدارنده دندانه‌های استاتور، بلبرینگ‌ها و شفت، (د) اضافه شدن قفسه‌های آلومینیومی روتور، (ه) هسته روتور، (و) اضافه شدن نگهدارنده‌های تغلنی هسته‌های روتور، پایه موتور و ساختار نهایی موتور پیشنهادی

رخ دهد. همچنین، وجود کله‌سیم‌ها باعث افزایش راکتانس‌های پراکندگی و به تبع آن، کاهش ولتاژ القایی داخلی و گشتاور الکترومغناطیسی موتور در ساختارهای پیشین می‌شود. نتیجه اینکه در ساختارهای پیشین به دلیل وجود کله‌سیم‌ها مقادیر بازده و چگالی توان نسبتاً پایین بوده و حجم و وزن ماشین قابل توجه می‌باشد. این درحالی است که ساختار پیشنهادی جدید اصلاً کله‌سیم ندارد. در این ساختار از تمام طول سیم به جهت تولید ولتاژ القایی و گشتاور الکترومغناطیسی استفاده شده و در نتیجه بازده و گشتاور خروجی ماشین افزایش یافته و همچنین تلفات، وزن و حجم ماشین کاهش چشمگیری خواهند داشت. از سوی دیگر، وجود دندانه‌ها در این ساختار باعث کاهش فاصله هوایی مؤثر شده و از آنجا منجر به افزایش راکتانس مغناطیس‌کنندگی می‌شود. تأثیر این موضوع به وضوح در کاهش جریان مغناطیس‌کنندگی و افزایش ضریب توان قابل مشاهده است. همچنین، مجزا بودن دندانه‌ها و دوطرفه بودن این ساختار، نیاز به یوغ و یا مسیر آهنی اضافی برای گردش شار در هسته استاتور را مرتفع ساخته است که در نتیجه آن وزن ماشین تا حد چشمگیری کاهش یافته و چگالی توان ماشین افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت دیگر در ساختار پیشنهادی این است که سیم‌پیچی‌های استاتور در مجاورت هوای آزاد و همچنین در مسیر جریان هوای ناشی

آخرین پارامتر ابعادی باقیمانده از استاتور، عرض هر دندانه آن (t_s) است. به منظور محاسبه این پارامتر باید به این نکته توجه نمود که کل شار مغناطیسی هر قطب ماشین Φ_p از تعداد $\frac{z_s}{2p}$ دندانه عبور می‌کند. حال، اگر مقدار بیشینه چگالی شار مغناطیسی در هر دندانه به $B_{max,tooth}$ محدود گردد، با فرض توزیع چگالی شار سینوسی در فاصله هوایی مقدار متوسط چگالی شار مغناطیسی در هر دندانه ($B_{av,tooth}$) برابر است با:

$$B_{av,tooth} = \frac{2}{\pi} B_{max,tooth} \quad (7)$$

و در نتیجه، داریم:

$$\begin{aligned} \Phi_p &= B_{av,tooth} \left(\frac{z_s}{2p} \right) \left(t_s \frac{D_o - D_i}{2} \right) \\ &= \frac{2}{\pi} B_{max,tooth} \left(\frac{z_s}{2p} \right) \left(t_s \frac{D_o - D_i}{2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

که از آنجا و در ترکیب با رابطه (۲)، نهایتاً به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} t_s &= \frac{2\pi p \Phi_p}{z_s (D_o - D_i) B_{max,tooth}} \\ &= \frac{\pi^2 D_o (1 + \lambda)}{4z_s} \frac{B_{av}}{B_{max,tooth}} \end{aligned} \quad (9)$$

تا اینجا ابعاد استاتور ماشین و نیز مشخصه‌های سیم‌پیچی آن مشخص گردیده‌اند. به منظور محاسبه ابعاد روتور، در این مرحله ابتدا باید تعداد شیارها (یا معادلات تعداد دندانه‌ها)ی روتور (z_r) را مشخص نمود. بدین منظور از قواعد Still و Siskind استفاده می‌شود [۱۷]. براساس این قواعد و با اتخاذ تعداد دندانه‌های استاتور برابر $z_s=24$ ، تعداد شیارهای روتور در اینجا برابر $z_r=21$ حاصل شده است ($p=2$). اکنون با داشتن تعداد دندانه‌های استاتور و روتور، جهت محاسبه عرض دندانه روتور (t_r) باید به این نکته توجه نمود که مقدار کل شار قطب عبوری از دندانه‌های استاتور و روتور با هم برابر است و بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} z_s t_s &= z_r t_r \\ \Rightarrow t_r &= \frac{z_s}{z_r} t_s = \frac{\pi^2 D_o (1 + \lambda)}{4z_r} \frac{B_{av}}{B_{max,tooth}} \end{aligned} \quad (10)$$

از طرفی، گام دندانه روتور (γ_r) به سادگی با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

فاز ماشین بر حسب آمپر، تعداد فازها، بازده توان خروجی و زاویه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ترمینال ماشین بر حسب رادیان می‌باشد. جهت ساده‌سازی رابطه (۳) و نیز عملیاتی نمودن آن، پارامتر A به عنوان بارگذاری الکتریکی ویژه ماشین به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$A = \frac{m(2N_{ph})I_{ph}}{z_s(2L)} = \frac{mN_{ph}I_{ph}}{z_s L} \quad (4)$$

که در آن، L و z_s به ترتیب نماینده تعداد دندانه‌های استاتور و طول محوری هر دندانه هستند. همچنین، نسبت f/p را نیز می‌توان با $\frac{n_s}{60}$ برابر دانست که n_s سرعت سنکرون ماشین بر حسب دور بر دقیقه می‌باشد. در نهایت، با جایگذاری رابطه (۴) در (۳) و اتخاذ λ به عنوان نسبت قطر داخلی به خارجی، معادله توان خروجی ماشین بر حسب پارامترهای الکتریکی، مغناطیسی و ابعاد آن به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$P_{out} = 0.0291 k_w \eta n_s B_{av} A z L D_o^2 (1 - \lambda^2) \cos \varphi \quad (5)$$

با توجه به معادله (۵)، با دانستن مقادیر نامی توان خروجی و سرعت سنکرون مورد انتظار ماشین، و اتخاذ یک سری مقادیر معقول و منطقی برای پارامترهای A ، B_{av} ، k_w ، λ ، η ، $\cos \varphi$ و z می‌توان مقدار LD_o^2 را محاسبه نمود که در نتیجه، با انتخاب مقدار یکی از دو پارامتر L و D_o ، مقدار پارامتر دیگر به دست می‌آید. در ادامه، با دانستن فرکانس نامی تغذیه (f) و سرعت سنکرون ماشین (n_s)، تعداد جفت قطب‌ها (p) و در نتیجه، شار قطب ماشین (Φ_p) محاسبه می‌گردد. اکنون، با داشتن مقادیر شار قطب و ولتاژ مؤثر نامی فاز ترمینال ماشین (V_{ph})، تعداد دورهای سری مورد نیاز در هر فاز سیم‌پیچی استاتور (N_{ph}) نیز با استفاده از رابطه (۱) به راحتی محاسبه خواهد شد. در نهایت، با داشتن مقدار فرض معقول برای بارگذاری الکتریکی ویژه (A) و تعداد فازها (m) و استفاده از رابطه (۴)، مقدار مؤثر جریان نامی عبوری از سیم‌پیچی هر فاز استاتور ماشین (I_{ph}) نیز حاصل خواهد شد که در نتیجه، با اتخاذ یک مقدار منطقی برای چگالی جریان سیم‌پیچی استاتور (J_s)، قطر سیم مورد نیاز برای سیم‌پیچی استاتور (D_{wire}) بر اساس رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$D_{wire} = \sqrt{\frac{4I_{ph}}{\pi J_s}} \quad (6)$$

شده است. در اینجا لازم به ذکر است که تکیه این مقاله بر معرفی ساختار جدید و بررسی کمی و کیفی مزایا و معایب آن بوده و همین موضوع بسیار می‌تواند برای پژوهشگران این عرصه، نقطه آغازینی جهت انجام پژوهش‌های مؤثری گردد. بر این اساس، در این مقاله تنها به ارائه روند طراحی اولیه از این ساختار بسنده شده است. پرواضح است که جهت دستیابی به طرح بهینه دقیق و صنعتی از ساختار پیشنهادی، استفاده از الگوریتم‌های طراحی بهینه امری ضروری خواهد بود.

جدول ۱- نتایج طراحی موتور القایی با ساختار پیشنهادی

پارامترها	مقادیر
تعداد فازها	۳
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
ولتاژ نامی خط ورودی	۳۸۰ ولت
جریان نامی فاز	۳/۶۵ آمپر
ضریب توان در بار نامی	۰/۷۸
توان نامی (خروجی)	۱۵۰۰ وات
تعداد قطب‌ها	۴
تعداد کلاف‌های هر فاز	۱۶
تعداد دور سیم در هر کلاف	۱۹۶
قطر سیم لاکه	۰/۸ میلی‌متر
نوع سیم‌پیچی	دو طبقه
گام سیم‌پیچی	کسری یک شیار کوتاه
اتصال سیم‌پیچی استاتور	ستاره
مقاومت سیم‌پیچی استاتور در هر فاز	۶/۱ اهم
شعاع داخلی	۱۰۰ میلی‌متر
شعاع خارجی	۱۲۵ میلی‌متر
طول فاصله هوایی	۱ میلی‌متر
طول محوری دندانه استاتور	۱۰۶ میلی‌متر
ضخامت محوری یوغ روتور	۲۰ میلی‌متر

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، صحت عملکرد موتور القایی با ساختار پیشنهادی طراحی شده در بخش ۳، از طریق شبیه‌سازی مدل دو بعدی ماشین در نرم‌افزار اجزاء محدود JMAGDesigner 16.0 مورد بررسی قرار می‌گیرد. پرواضح است که با استفاده از مدل سه‌بعدی در تحلیل اجزاء محدود، می‌توان به دقت بیشتری دست یافت که البته، نیازمند صرف زمان و هزینه محاسباتی به مراتب بالاتری نیز خواهد بود. این در حالی است که برای اغلب ماشین‌های الکتریکی می‌توان مدل‌های دو بعدی مناسب را به‌گونه‌ای تعریف و اختیار نمود که دقت قابل قبولی بسیار نزدیک به

$$y_r = \pi \frac{D_o + D_i}{2} \frac{1}{z_r} = \frac{\pi D_o (1 + \lambda)}{2z_r} \quad (11)$$

و در نتیجه، عرض شیار روتور (w_r) در نهایت به‌صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$w_r = y_r - t_r = \frac{\pi D_o (1 + \lambda)}{2z_r} - \frac{\pi^2 D_o (1 + \lambda)}{4z_r} \frac{B_{av}}{B_{\max, tooth}} \quad (12)$$

$$= \frac{\pi D_o (1 + \lambda)}{2z_r} \left(1 - \frac{\pi B_{av}}{2 B_{\max, tooth}} \right)$$

در این مرحله، جهت تعیین عمق شیار روتور باید در ابتدا سطح مقطع لازم برای شیار روتور را محاسبه نمود که این خود نیازمند محاسبه مقدار مؤثر جریان عبوری از میله‌های روتور (I_r) می‌باشد. بدین منظور، با معرفی نماد I'_r به‌عنوان مقدار مؤثر جریان روتور ارجاع شده به سمت استاتور داریم:

$$I'_r \approx I_{ph} \cos \varphi \quad (13)$$

اکنون مقدار I_r از طریق برابر قرار دادن مقادیر نیروهای محرکه مغناطیسی تولیدی در روتور و استاتور در ساختار پیشنهادی به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_r Z_r = m \frac{N_s}{2q} I'_r \approx m \frac{N_s}{2q} I_{ph} \cos \varphi \quad (14)$$

$$\Rightarrow I_r = m \frac{N_s}{2q Z_r} I_{ph} \cos \varphi$$

که در آن، q نماینده تعداد دندانه‌های استاتور بر قطب بر فاز بوده و برابر است با $z_s/(2pm)$. بنابراین داریم:

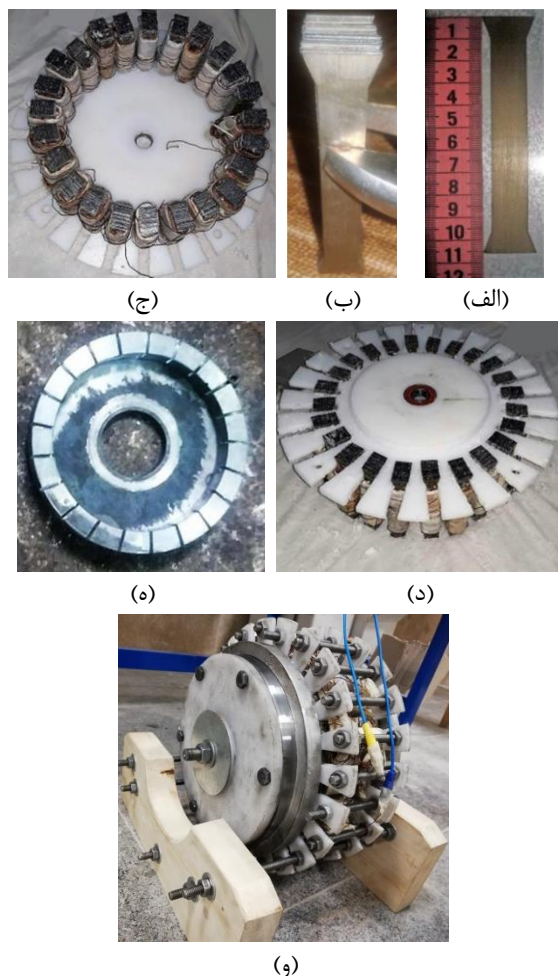
$$I_r = \frac{m^2 p N_s}{Z_s Z_r} I_{ph} \cos \varphi \quad (15)$$

با در دست داشتن I_r با فرض یک چگالی جریان معقول و منطقی (J_r) در میله‌های روتور، سطح مقطع هر میله روتور (S_{br}) و عمق آن (h_{br}) در نهایت به صورت روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$S_{br} = \frac{I_r}{J_r} = \frac{m^2 p N_s}{Z_s Z_r J_r} I_{ph} \cos \varphi \quad (16)$$

$$h_{br} = \frac{S_{br}}{w_r} = \frac{m^2 p N_s}{Z_s Z_r J_r w_r} I_{ph} \cos \varphi \quad (17)$$

بدین‌سان در این مرحله، کلیه ابعاد و مشخصه‌های الکتریکی و مغناطیسی موتور القایی با ساختار پیشنهادی محاسبه می‌گردند که خلاصه نتایج آن در جدول ۱ آورده

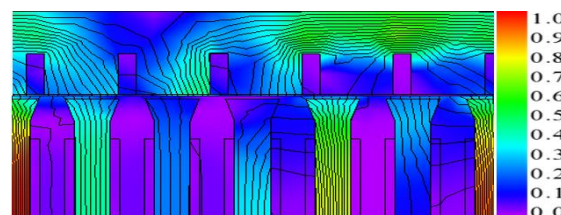


شکل ۴- اجزاء مختلف و مونتاژ نهایی موتور القایی ساخته شده با ساختار پیشنهادی، الف) هر ورق فولاد سیلیسیومی (به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر) سازنده دندانه‌های استاتور، ب) نحوه کنار هم نهادن ورق‌ها (۴۹ عدد) جهت ساخت هر دندانه، ج) نحوه قرار دادن دندانه‌های سیم‌پیچی شده، د) نحوه قرار دادن هر دیسک تغلنی در نقش نگهدارنده دندانه‌های استاتور، ه) ساختار هر دیسک روتور و شیارهای آن، و) مونتاژ نهایی موتور

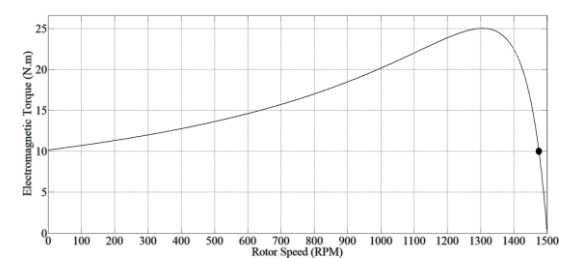
مونتاژ نهایی آن را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۴-ج) می‌توان مشاهده نمود که هسته استاتور از ۲۴ دندانه مجزا تشکیل شده که هر کدام از این دندانه‌ها از روی هم قرار دادن ۴۹ ورق سیلیس دار به ضخامت نیم میلی‌متر، ساخته شده‌اند (شکل ۴-الف و شکل ۴-ب). این دندانه‌ها پس از برش لیزری از یک ورق آهن سیلیس دار، غوطه‌ور در چسب شده و توسط دستگاه پرس، کاملاً فشرده شده و تشکیل یک دندانه استاتور را می‌دهند. سپس دو کلاف سیم‌پیچی بر روی هر دندانه در امتداد هم (و نه بر روی هم) پیچیده شده‌اند به طوری که هر کلاف، نیمی از طول محوری دندانه را اشغال می‌کند. نهایتاً، تمامی دندانه‌ها

مدل‌های سه‌بعدی ارائه نماید. بر این اساس، در این پژوهش نیز مدل دوبعدی ساختار پیشنهادی از طریق باز نمودن دایره ماشین و پهن نمودن آن در راستای یک خط راست، تعریف گردیده و در شبیه‌سازی اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۲) توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور را در شرایط عملکرد نامی و حالت ماندگار در مدل دوبعدی اتخاذ شده نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به جهت وجود تقارن، تنها نیمی از موتور در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و سپس نتایج تعمیر داده شده‌اند. مشخصه گشتاور-سرعت موتور طراحی شده حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود نیز در شکل (۳) ارائه گردیده و نقطه کار نامی موتور در حالت ماندگار در آن مشخص شده است. بر این اساس، مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت و گشتاور خروجی نامی موتور در حالت ماندگار به ترتیب برابر ۱۴۷۵ دور بر دقیقه (معادل ۱۵۴/۵ رادیان بر ثانیه) و ۱۰ نیوتون-متر می‌باشد که توان خروجی نامی برابر ۱۵۰۰ وات را نتیجه می‌دهد.



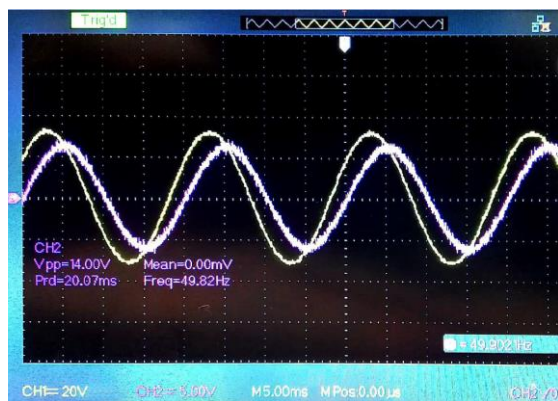
شکل ۲- توزیع شار مغناطیسی در مقطع دوبعدی موتور القایی مورد مطالعه حاصل از تحلیل اجزاء محدود (جهت وضوح بهتر، تنها یک چهارم از کل ساختار موتور نمایش یافته است).



شکل ۳- مشخصه گشتاور-سرعت موتور با ساختار پیشنهادی و طراحی اولیه حاصل از تحلیل اجزاء محدود

۵- فرآیند ساخت موتور و نتایج تست آن

جهت نمایش هر چه بهتر کارایی و صحت عملکرد موتور القایی با ساختار پیشنهادی در این پژوهش، یک نمونه عملی از آن ساخته شده که جزئیات فرآیند ساخت و نتایج انجام آزمایش‌های عملی بر روی آن در این بخش ارائه می‌گردد. شکل (۵) اجزاء مختلف نمونه ساخته شده و



شکل ۶- شکل موج ولتاژ و جریان موتور در بار کامل

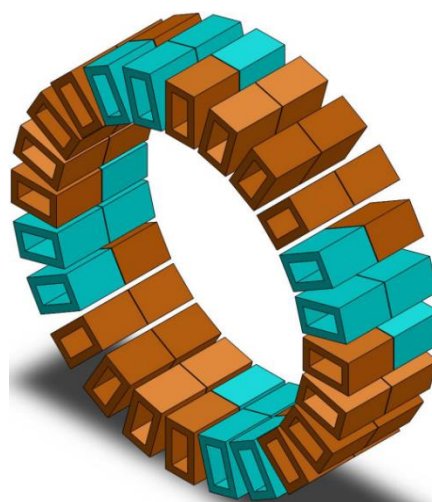
جدول ۲- نتایج تست موتور در بار کامل

مقادیر	پارامترها
۵۰ هرتز	فرکانس نامی
۳۸۰ ولت	ولتاژ خط ورودی
۴/۲ آمپر	جریان فاز
۱۶۲۰ وات	توان ورودی در بار کامل
۱۴۱۰ دور در دقیقه	سرعت
۳۶ درجه سلیسیوس	دما پس از یک ساعت کاری

با داشتن داده‌های جدول ۲ و مقاومت هر فاز سیم‌پیچی استاتور مندرج در جدول ۱ (۶/۱ اهم)، تلفات اهمی استاتور برابر ۳۲۴ وات محاسبه می‌شود که با کم کردن از توان ورودی، مقدار توان انتقالی در فاصله هوایی موتور برابر ۱۲۹۶ وات به دست می‌آید. در نهایت، با توجه به مقدار اندازه‌گیری شده برای سرعت موتور در شرایط بار کامل و حالت ماندگار (۱۴۱۰ دور بر دقیقه)، لغزش روتور (s) برابر ۰/۰۶ محاسبه شده که با ضرب (1-s) در توان انتقالی فاصله هوایی و صرف نظر از تلفات هسته، بادخوری و اصطکاک، توان خروجی موتور برابر ۱۲۱۸ وات (متناظر با بازده ۰/۷۵) حاصل می‌گردد. دلیل کاهش مقادیر حاصل از اندازه‌گیری عملی برای توان خروجی و بازده نسبت به مقادیر مورد نظر در طراحی، عدم دسترسی به تجهیزات ماشین‌کاری دقیق و با فناوری بالا قطعات بوده که منجر به افزایش فاصله هوایی بین روتور و استاتور بیشتر از مقدار مورد نظر در طراحی شده است. این امر سبب افزایش جریان مغناطیس‌کنندگی و کاهش ضریب قدرت موتور گردیده و در نتیجه، در محدوده جریان نامی، قدرت خروجی موتور کمتر از مقدار مورد انتظار در طراحی شده است. واضح است که این گونه مشکلات ساخت در شرایط دسترسی به یک خط تولید مکانیزه با انواع مختلف تجهیزات ماشین‌کاری، برطرف گردیده و امکان ساخت نمونه‌های صنعتی

همانند شکل (۴-د)، مابین دو نگهدارنده تفلنی قرار گرفته و تشکیل یک هسته مغناطیسی با دندان‌های مجزا را داده‌اند. بکارگیری تفلن در ساختار این ماشین منجر به کاهش چشمگیری در وزن آن شده است و از این رو، چگالی توان در این ماشین افزایش می‌یابد چراکه در یک توان ثابت، وزن ماشین کاهش یافته است.

شکل (۵) نحوه سیم‌بندی فاز a را نشان می‌دهد. تمامی ۱۶ کلاف فاز a با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که جهت پیچش تمامی کلاف‌ها یکسان بوده منتهی با اتصال سر به ته، از یک قطب به قطب دیگر، سربندی هر فاز انجام گرفته است. آرایش سیم‌بندی فازهای b و c نیز با انتقال دادن الگوی سیم‌بندی فاز a به میزان مثبت و منفی ۱۲۰ درجه الکتریکی قابل استحصال است. همانطور که از این شکل مشخص است، با تزریق مجموعه جریان متعادل سه‌فاز، این نحوه سیم‌پیچی، یک میدان دوار با دامنه ثابت تولید کرده و بنابراین منجر به ایجاد گشتاور خواهد شد.



شکل ۵- نقشه سیم‌کشی فاز a موتور با ساختار پیشنهادی

هسته روتور از آهن سیاه که با نام تجاری CK45 شناخته می‌شود، ساخته شده است. جنس قفس در ساختار پیشنهادی از آلومینیوم ریخته‌گری بوده که با قرار گرفتن هسته روتور در قالب‌های ریخته‌گری، مذاب آلومینیوم شیارها و نواحی کناره آن را پر می‌کند و تشکیل قفس موتور را می‌دهد.

با تست موتور در بار کامل، منحنی‌های ولتاژ ترمینال و جریان آرمیچر موتور در شکل نمایش داده شده است. جدول ۲ نیز نتایج عملی حاصل برای سایر مشخصه‌های عملکردی موتور را در بر دارد.

پیچیده‌ای دارند که گاهی تولید انبوه آنها را محدود ساخته است. در این مقاله یک ساختار جدید برای موتور القایی نوع شارمخوری ارائه گردید. در این ساختار دندانه‌های استاتور به صورت جدا از یکدیگر مونتاژ شده و پیشانی کلاف کاملاً حذف شده است که نهایتاً منجر به افزایش چگالی توان و همچنین کاهش تلفات ماشین می‌گردد. همچنین یک نمونه موتور با ساختار پیشنهادی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات نشان می‌دهند که عملکرد موتور القایی با ساختار پیشنهادی مورد قبول بوده و می‌تواند جایگزین ساختارهای مرسوم گردد.

کارآمدتری از موتور القایی با ساختار پیشنهادی فراهم خواهد گردید.

۶- نتیجه‌گیری

اغلب ساختارهای موتورهای القایی از نوع استوانه‌ای بوده که معایبی همچون چگالی توان پایین، جریان راه‌اندازی بالا و وجود قابل توجه پیشانی‌های کلاف را به همراه دارند. ساختارهای شارمخوری نیز گرچه چگالی توان بهتری نسبت به ساختارهای استوانه‌ای فراهم می‌کنند اما دارای معایب اساسی مانند غیریکنواخت بودن بارگذاری مغناطیسی و الکتریکی و مراحل ماشین‌کاری سخت و

مراجع

- [1] Juha J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, "Design of Rotating Electrical Machines", Wiley, 2008.
- [۲] سجاد صدر، داود عرب خابوری و مصطفی نمازی، "مدل سازی سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل"، مجله مدل‌سازی در مهندسی دانشگاه سمنان، جلد ۱۴، شماره ۴۷، ۱۳۹۵، صفحه ۲۵۵-۲۶۳.
- [۳] محمدجواد غازی اردکانی، مجید حسین پور، مهدی شاهپرستی، مهدی سیاهی، "کنترل برداری غیرمستقیم سرعت ماشین القایی مبتنی بر اینورتر دو-سه سطحی"، مجله مدل‌سازی در مهندسی دانشگاه سمنان، ۱۳۹۸، چاپ آنلاین.
- [۴] محمدیوسف ولی، نیما امجدی، "طراحی و ساخت موتور مغناطیسی خورشیدی برای خودروها"، مجله مدل‌سازی در مهندسی دانشگاه سمنان، جلد ۱۶، شماره ۵۲، ۱۳۹۷، صفحه ۱۴۹-۱۶۱.
- [5] W. T. Thomson, and I. Culbert, "Design, Construction, and Manufacture of Squirrel Cage Rotors", Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories, Wiley-IEEE Press, 2017, pp. 39 - 54.
- [6] P. C. K. Luk, M. G. Jayne, and D. Rees, "The development of an integrated induction motor drive system using a network of transputers", IEE Colloquium on Developments in Real-Time Control for Induction Motor Drives, London, UK, 1993.
- [7] P. Xie, G. Li, F. Xie, C. Hu, and X. Qi, "Research on field-weakening control of induction motor based on torque current component of the voltage closed-loop", IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Auckland, New Zealand, 2015.
- [8] R. J. Wai, and C. C. Chu, "Robust Petri Fuzzy-Neural-Network Control for Linear Induction Motor Drive", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007, pp. 177-189.
- [9] S. L. Ho, Sh. Niu, and W. N. Fu, "A Novel Solid-Rotor Induction Motor With Skewed Slits in Radial and Axial Directions and Its Performance Analysis Using Finite Element Method", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, June 2010, pp. 1089-1092.
- [10] F. Yu, Z. Xi, and Q. Wei, "New Structure of Axial flux Induction Motor and Characterization Analysis", International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011.
- [11] C. Hong, W. Huang, and Z. Hu, "Design and Analysis of a High-Speed Dual Stator Slotted Solid-Rotor Axial-Flux Induction Motor", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 5, No. 1, March 2019, pp. 71-79.
- [13] J. Mei, C. H. T. Lee, and J. L. Kirtley, "Design of Axial Flux Induction Motor With Reduced Back Iron for Electric Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 69, No. 1, 2020, pp. 293-301.
- [14] D. J. Patterson, J. L. Colton, B. Mularcik, B. J. Kennedy, S. Camilleri, and R. Rohoza, "A Comparison of Radial and Axial Flux Structures in Electrical Machines", International electric machines and drives conference, 2019.

- [15] J. F. Gieras, R. Wang, and M. J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Springer, 2008.
- [16] C. Hong, W. Huang, and Z. Hu, "Performance Calculation of a Dual Stator Solid Rotor Axial Flux Induction Motor Using the Multi-Slice and Multi-Layer Method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 55, No. 2, pp. 1-9, February 2019.
- [17] Still and Siskind, Elements of Electrical Machine Design, McGraw-Hill, 1954.