نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۱، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۵۲ – ۲۷

صرفه‌جویی در مصرف انرژی کولرهای آبی با به‌کارگیری موتورهای آهنربا دائم بدون جاروبک

[۱] ابوالفضل حلوایی نیاسر *، [۲] فریبرز عشرت‌آبادی

تاریخ دریافت:
۱۳۹۷/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۸/۲/۲۶

کلمات کلیدی:
بهره انرژی،
درایو الکتریکی،
صرفه‌جویی در مصرف انرژی،
کولر آبی،
کیفیت توان،
موتور آهن‌ربا دائم
بدون‌جاروبک (براشلس)

چکیده

کولرهای آبی به دلیل هزینه پائین، در اغلب مناطق مرکزی و اقلیم گرم و خشک ایران جهت خنک‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند و به عنوان یکی از مصرف‌کنندگان عمده توان الکتریکی شناخته می‌شوند. اغلب کولرهای آبی از موتورهای القایی تکفاز با اتصال مستقیم به شبکه برق در مقادیر مختلف توانی بهره می‌برند. اما بهره این موتورها بسیار پائین است و جایگزینی آنها با موتورهای الکتریکی پربازده مورد توجه دستگاه‌های مختلف حاکمیتی است. استفاده از موتورهای آهنربا دائم بدون–جاروبک (و یا براشلس) امروزه به دلیل مزایای ممتازشان در بسیاری از کاربردهای صنعتی و خانگی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله جزئیات به‌کارگیری موتور بدون جاروبک در کاربرد کولر آبی ارائه و الزامات و استانداردهای موردنیاز طراحی و ساخت موتور بدون جاروبک و درایو آن بیان می‌گردند. در ادامه یک موتور بدون‌جاروبک 5/0 hp و درایو آن طراحی، ساخته و تست می‌شود. همچنین یک کولر آبی 5000 m3/h مجهز به موتور بدون جاروبک در آزمایشگاه مرجع تحت تست هوادهی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده، بیانگر افزایش قابل ملاحظه بهره مصرف انرژی در مقایسه با کولرهای آبی مجهز به موتور القایی تکفاز است. همچنین ملاحظات اقتصادی استفاده از موتورهای بدون جاروبک و افزایش هزینه اولیه ناشی از سیستم جدید و سایر ملاحظات فنی در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرند. نتایج حاصله نشان می دهند که استفاده از موتورهای بدون‌جاروبک در این کاربرد می‌تواند گامی بسیار بزرگ در صرفه‌جویی در مصرف انرژی، حفظ محیط زیست و کاهش مشکلات ناشی از مصرف بیرویه برق در کشور باشد.

۱. دانشیار،گروه مهندسی قدرت،دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان (نویسنده مسئول) halvaei@kashanu.ac.ir
۲. کارشناس، شرکت آرمان انرژی، شهرک صنعتی توس، مشهد، ایران. fariborz_esh@yahoo.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

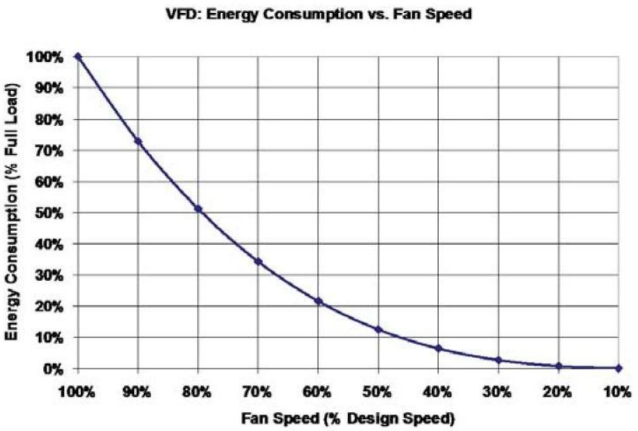
۱. مقدمه

افزایش بی‌رویه مصرف انرژی در کشور و نزدیک شدن و عبور از پیک تولید در فصول گرم سال، مشکلات زیادی را برای مصرف کنندگان و شرکت‌های برق منطقه‌ای و همچنین نیروگاه‌ها به‌وجود آورده است. از طرفی، دادن خاموشی به مشتری‌ها به‌ویژه در مناطق گرمسیری کشور سبب ایجاد نارضایتی عمومی در سطح جامعه می‌شود و از طرف دیگر ایجاد نیروگاه‌های جدید جهت پاسخ به پیک‌بار نه از نظر اقتصادی و نه از نظر زیست‌محیطی مقرون به‌صرفه است. جهت رفع مشکلات فوق‌الذکر، یکی از موضوعاتی که به طوری جدی، مدنظر شرکت‌های برق و همچنین دولت است، کاهش مصرف انرژی با افزایش بهره تجهیزات الکتریکی است (Sojdei، 2014). یکی از مصرف‌کنندگان عمده توان الکتریکی چه در سطح دنیا و چه در کشورمان، موتورهای الکتریکی هستند که آمار بیان‌گر مصرف بیش از ۵۰٪ توان الکتریکی تولیدی توسط موتورها هستند. این درصد در بخش خانگی و تجاری بازهم بیشتر از مقدار فوق است منطقی است جهت افزایش بهره مصرف انرژی، ابتدا کاربردهایی مورد توجه قرار بگیرد که بیشترین تعداد و طولانی‌ترین ساعات مصرف در طی شبانه‌روز را دارند. موتورهای الکتریکی مورد استفاده در کمپرسور یخچال، هواسازهای خانگی و دمنده‌ها، ماشین‌های لباس‌شویی و ظرف‌شویی از جمله این مصرف‌کنندگان هستند که سازندگان آنها تلاش‌های زیادی را جهت بهبود عملکرد موتورهایشان، و یا جایگزینی موتورهای کم‌بازده آنها با موتورهای پربازده انجام داده‌اند و در بسیاری از موارد این تغییرات تجاری نیز گشته و اقبال مصرف‌کنندگان هم به آنها بسیار خوب بوده است (صادق زاده و دیگران، ۱۳۸۴).

استفاده از درایوهای الکتریکی سرعت متغیر جهت تغذیه موتورهای الکتریکی در کاربردهای صنعتی از جمله راهکارهای پذیرفته شده است و مجهز نمودن موتورهای هواسازهای صنعتی (HVACs) به درایو در اغلب صنایع مورد توجه قرار گرفته است (Lee، 2014). با توجه به آن‌که توان مصرفی یک دمنده هوا با توان سوم سرعت آن متناسب است، استفاده از درایوهای سرعت متغیر، و تغییر سرعت به‌منظور دست‌یابی به هواسازی مناسب، سبب کاهش چشم‌گیر مصرف انرژی می‌گردد (Fernando، 2016). شکل (۱) منحنی انرژی مصرفی یک دمنده بر حسب سرعت دورانی محور آن‌را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در مقادیر ۸۰٪ و ۶۰٪ سرعت نامی، انرژی مصرفی به ترتیب حدود ۵۰٪ و ۸۰٪ کاهش می‌یابد [۵].

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

در کاربردهای توان پائین به‌ویژه خانگی و تجاری که برق مشترکین تک‌فاز است، اغلب نیـز از موتورهـای تک‌فاز استفاده می‌شود. به‌کارگیری درایو الکتریکـی سـرعت متغیـر در ایـن نـوع کاربردهـا بـا توجـه بـه محدودیت‌ها و پائین بودن ذاتی بهره موتورهای تک‌فاز، احتمالا تأثیر چشم‌گیری بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی ندارد و از طرفی، اضافه شدن درایو به لحاظ اقتصادی، هزینه سرمایه‌گذاری و قیمت تجهیـز را بـالا می‌برد که ممکن است موفقیت در فروش تجاری را به شدت کاهش دهـد. لـذا اولـین قـدم در ایـن‌گونـه کاربردها، بالا بردن بهره موتور الکتریکی با بهبود طراحی و یا استفاده از موتورهـای جدیـد پربـازده اسـت. استفاده از موتورهای آهن‌ربا دائم بدون‌جاروبک، موتورهـای سـوئیچ رلوکتـانس و ... در همـین راستاسـت (Cohen، 2007، Persson، 2007، بهرام‌گیری، ۱۳۸۸)



شکل ۱. تغییرات مصرف انرژی در یک دمنده برحسب سرعت دورانی محور آن (Binder، 2008)

در کشور خودمان و با توجه به اقلیم خاص آب و هـوایی و گـرم و خشـک اغلـب منـاطق ایـران، موتورهای الکتریکی مورد استفاده در کولرهای آبی پرمصرف‌ترین و پرتعدادترین نوع تجهیزات هسـتند. آمارهای رسمی کشور بیان‌گر وجود ۱۷ میلیون موتور کولر آبی فعال است که در بیش از نصف سال کار می‌کنند و اتفاقاً مشکلات مصرف برق نیز مربوط به ماه‌های گرم سال اسـت. بـا درنظـر گـرفتن تـوان مصرفی ۴۰۰ وات بر هر کولر آبی و بهره ۷۰ درصد از مرحله تولید تـوان الکتریکـی تـا محـل مصـرف (درب منازل)، حدود ۱۰ گیگاوات توان تولیدی نیروگاه‌ها در سطح کشور توسط موتورهای کولرهای آبی مصرف می‌شود که رقم بسیار قابل ملاحظه‌ای است و در حد ۲۰ درصد مقدار متوسـط تـوان الکتریکـی

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

کشور است. افزایش بهره و کاهش مصرف انرژی در این موتورها با توجه به یکسان بودن الگوی مصرف در تمامی موتورهای الکتریکی کولری، کمک بسیار بزرگی به کشور چه از نظر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی است. صرفه‌جویی ۲۰درصدی در مصرف انرژی هر موتور کولر آبی منجر به صرفه‌جویی در حدود ۲ گیگا وات می‌شود که توان حداقل دو نیروگاه حرارتی بزرگ است. یکی از موتورهایی که می‌تواند به عنوان جایگزین موتورهای تک‌فاز القایی مورد استفاده در کولرهای آبی متداول به‌کار گرفته شود، موتورهای آهن‌ربا دائم بدون‌جاروبک (و یا به اختصار موتورهای بدون‌جاروبک) است (Pullaguram، 2016). این موتورها عموماً دارای بهره بالای ۸۵درصد هستند که با احتساب بهره درایو آنها می‌توان توقع بهره بالای ۸۰ درصد از آنها را از دید شبکه داشت. مقایسه این مقادیر با مقادیر مشابه برای موتورهای تک‌فاز بیانگر افزایش حداقل ۳۰ درصد بهره می‌باشد. خوشبختانه دانش طراحی و ساخت موتورهای بدون‌جاروبک چه در سطح دانشگاهی و چه در صنایع و شرکت‌های داخلی در حد اعلای آن وجود دارد و تنها گلوگاه تولید تجاری این موتورها، آهن‌ربا دائم به‌کار رفته در آن است که با توجه به محدود بودن منابع آن، نیازمند توجه و بررسی بیشتری است. با توجه به استفاده دائمی از مبدل الکترونیک قدرت (درایو) برای این موتورها، قیمت نهایی مجموعه موتور و درایو بیش از قیمت موتورهای کولری تک‌فاز می‌گردد که دستگاه حاکمیتی باید پشتیبانی مناسبی از آن به‌عمل آورد تا هم مصرف کنندگان کولر (مردم) و کارخانجات سازنده کولرهای آبی هم تولیدکنندگان موتور بدون‌جاروبک تشویق به استفاده از آن بشوند.

در کنار افزایش چشم‌گیر بهره مصرف انرژی الکتریکی توسط موتورهای بدون‌جاروبک، امکانات قابل توجه دیگری از جمله دور متغیر بودن کولر (نه لزوما کار در دو دور کند و تند)، قابلیت کنترل از راه دور، قابل مجتمع‌شدن با سیستم‌های مدیریت انرژی ساختمان که هم اکنون جزو مباحث روز است، نیز با استفاده از موتورهای بدون‌جاروبک به‌دست خواهد آمد که برای مشتریان نهایی کولر جذاب است. مباحث کیفیت توان از جمله توان راکتیو و ایجاد هارمونیک‌ها و افت ولتاژ نیز با طراحی درست و منطبق بر استاندارد درایو این موتورها کاملا قابل دستیابی است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

جدول ۱. ۰/۵ hp جهت کاربرد در کولر آبی با هوادهی ۵۰۰۰ (m^3/h)

پارامتر	مقدار	توضیحات
توان موتور	۳۷۵ W	یا ۰/۵ hp در دور تند فن
دور کند فن	۳۰۰ rpm	با رواداری ±۱۰ rpm
دور تند فن	۴۵۰ rpm	با رواداری ±۱۰ rpm
دور کند موتور	۹۵۰ rpm	با قطر فلکه – پولی به ترتیب برابر ۲۵۶ mm و ۷۰ mm
دور تند موتور	۱۴۵۰ rpm	
بهره در دور کند	٪۶۶/۳	بهره از دید ورودی درایو
بهره در دور تند	٪۸۱/۱	بهره از دید ورودی درایو
بهره در نصف دور تند	٪ ۶۱/۹	مطابق ۳-۱-۳۰-۳۷۷۲
ولتاژ ورودی درایو	۲۲۰ V	با قابلیت کار بین ۲۵۰-۱۷۵
ضریب توان	بیش از ۰/۹۵	در هر دو دور تند و کند
جریان مود مشترک	کمتر از ۴۰ mA	در خروجی درایو
زمان راه‌اندازی	حداکثر ۵ ثانیه	در حالت با سنسور موقعیت
حداکثر ریپل سرعت	٪۱ سرعت نامی	
اعوجاج هارمونیکی جریان ورودی (مطابق استاندارد(۲-۳-۷۲۶۰)	۱/۹ A	هارمونیک سوم
	۱ A	هارمونیک پنجم
	۰/۵۵ A	هارمونیک هفتم
میزان نویز صوتی	کمتر از ۵۵ dB	
میزان ارتعاشات مکانیکی	حداکثر ۱/۶ mm/s^2	
درجه حفاظت IP درایو	۵۵	
درجه حفاظت IP موتور	۲۲	

مأخذ: نتایج تحقیق

این مقاله به بررسی فنی و اقتصادی جایگزینی موتور القایی تک‌فاز مورد استفاده در کولرهای آبی با موتورهای بدون‌جاروبک می‌پردازد و جزئیات جایگزینی و تست‌های عملکردی یک موتور بدون‌جاروبک ساخته شده برای یک کولر آبی ۵۰۰۰ تشریح می‌گردد. در ادامه و بخش ۲ این مقاله

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

الزامات فنی مورد نیاز موتورهای بدون‌جاروبک قابل استفاده در کاربرد کولر آبی و استاندارد ملی تدوین شده در مورد موتورهای بدون‌جاروبک تشریح می‌گردد. در بخش ۳ نتایج ساخت و تست موتور بدون‌جاروبک طراحی‌شده برای کاربرد کولر آبی براساس استاندارد ملی تدوین شده ارائه می‌گردند. در ادامه و بخش ۴ نتایج تست هوادهی کولر مجهز به موتور بدون‌جاروبک در آزمایشگاه مرجع ارائه می‌شوند. در بخش ۵ در مورد ملاحظات فنی و اقتصادی این جایگزینی و استفاده از موتورهای بدون‌جاروبک بحث می‌شود. بخش آخر نیز به بیان نتایج حاصل از این پروژه و ارائه پیشنهادها اختصاص دارد.

۲. الزامات مورد نیاز موتور بدون‌جاروبک در کاربرد کولر آبی

الزامات مورد نیاز موتورهای بدون‌جاروبک مورد استفاده در کاربرد کولر آبی با توجه به مشخصات عملکردی کولرهای آبی موجود در بازار توسط مرکز تحقیقات موتورهای الکتریکی پیشرفته پژوهشگاه نیرو تعیین گردیده‌اند. بخشی از این الزامات نیز با توجه به استاندارد جدید ملی در مورد موتورهای بدون‌جاروبک به شماره ۳-۱-۳۰-۳۷۷۲ با عنوان " ماشین‌های‌الکتریکی‌گردان معیارها و مشخصات فنی مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک" (سازمان ملی استاندارد، ۱۳۹۶) و بقیه برمبنای استانداردهای موجود برای موتورهای در کاربرد خانگی تعیین شده‌اند (سازمان ملی استاندارد، ۱۳۸۹). با توجه به اینکه کولرهای آبی موجود در بازار برحسب حجم هوادهی در سه رده اصلی ۳۵۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ متر مکعب بر ساعت (m^3/h) قابل تقسیم‌بندی هستند و موتورهای القایی تک‌فاز مورد استفاده در این کولرها نیز به ترتیب دارای توان‌های ۰/۳۳ (یک سوم)، ۰/۵ (یک دوم) و ۰/۷۵ (سه چهارم) اسب بخار (hp) هستند، لذا توان موتورهای بدون‌جاروبک مورد استفاده در این سه کولر دقیقاً برابر همین سه توان تعیین گردیده‌اند. همچنین با توجه به ساختار فن کولرهای موجود، سرعت دورانی فن کولرهای مجهز به موتور بدون‌جاروبک نیز دقیقاً برابر سرعت دورانی فن کولرهای موجود تعیین گردیده‌اند. انتخاب نسبت قطر فلکه به پولی حتی‌الامکان برابر با مقادیر متناظر در کولرهای آبی متداول توصیه شده‌اند، اما مهم سرعت دورانی فن است که عدد آن مشخص شده است. در جدول (۱) الزامات عملکردی و مشخصات موردنظر موتور بدون‌جاروبک با توان hp ۰/۵ مورد استفاده در کولر ۵۰۰۰ ذکر شده‌اند. برای کولرهای ۳۵۰۰ و ۷۰۰۰ نیز مشابه چنین مشخصاتی الزام شده‌اند. مقادیر بهره، ولتاژ و سایر پارامترهای کیفیت توان همگی از ورودی درایو موتور

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

بدون‌جاروبک درنظر گرفته شده‌اند. علاوه بر مشخصات عملکردی ذکر شده در جدول زیر، درایو و موتور بدون‌جاروبک طراحی شده باید واجد شرایط دیگری هم باشد. برای نمونه تعداد سیم‌های بین کلید کولر و درایو باید حداکثر ۴ سیم باشد. حفاظت‌های استاندارد نظیر اضافه ولتاژ (OV)، کمبود ولتاژ (UV)، حفاظت دمایی (TP)، حفاظت‌های اتصال کوتاه (SC) و مدار باز (OC) نیز باید در درایو طراحی شوند. همچنین کدهای دیگری از طراحی موتور نظیر کد کلاس عایقی (IVIC)، کد قرارگیری موتور (IM)، کد خنک‌سازی موتور (IC) و کد کلاس حرارتی موتور نیز توسط سازنده باید تعیین شوند. علاوه بر آن موتور و درایو طراحی شده باید تست EMC را مطابق استاندارد مربوطه بگذرانند و طول عمر موتور و درایو نیز باید توسط سازنده مشخص شود.

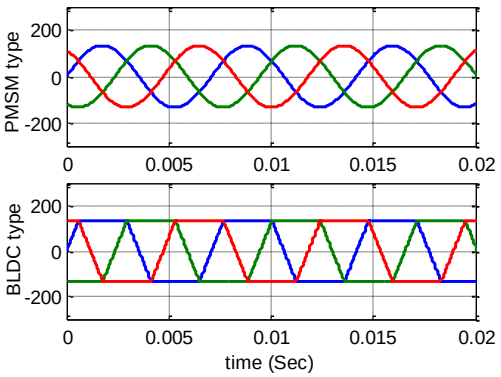
۳. سیستم موتور بدون‌جاروبک و درایو طراحی شده

امروزه، به‌کارگیری موتورهای بدون‌جاروبک در کاربردهای خانگی پرتعداد همانند ماشین‌های لباس‌شویی، کمپرسورهای یخچال فریزر، ماشین‌های ظرفشویی، کولرهای گازی و سیستم‌های هواساز خانگی سبب صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ی در مصرف انرژی، و بهبود عملکرد و بهره‌وری گردیده است. با این نتایج، مجهز نمودن کولرهای آبی با رقم تقریبی ۱۷ میلیون به عنوان پرتعدادترین مصرف‌کننده توان الکتریکی در کشور کاملا توجیه‌پذیر است. نکته مهم دیگر آنست که طول عمر موتورهای القایی تک‌فاز کولرهای آبی، کوتاه و بطور متوسط در حد ۳ سال است و این تعداد موتور بعد از گذران طول عمر، یا از رده خارج شده و یا به‌طور غیراصولی تعمیر می‌شوند که سبب هدر رفت بیشتر انرژی حتی از مقدار نامی اولیه خود می‌شوند. نکته جالب و قابل توجه در مورد سایر مصرف‌کننده‌های جدید خانگی نظیر ماشین لباس‌شویی و یخچال‌فریزر که از موتور بدون‌جاروبک استفاده می‌کنند آن‌است که سازندگان مربوطه، طول عمر ۱۰ سال را برای موتور و درایوشان تضمین می‌کنند. هدف از این پژوهش، طراحی و ساخت درایو و موتور بدون‌جاروبک برای کاربرد کولر آبی با لحاظ نمودن تمام الزامات عملکردی و طول عمر تضمین شده است، که سبب حفظ سرمایه‌های ملی و زیست‌محیطی می‌گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

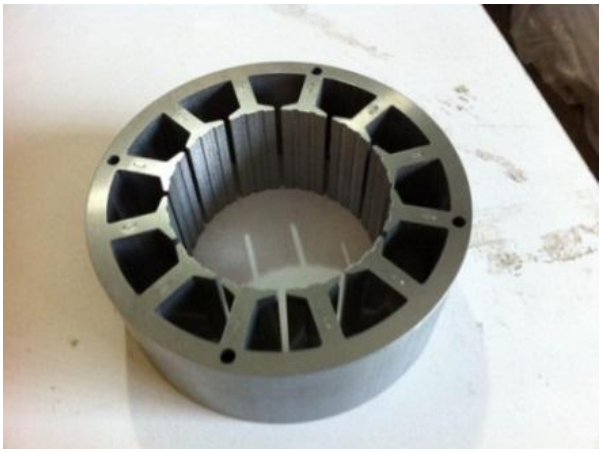
۳-۱. ساختار موتور بدون‌جاروبک طراحی شده

موتورهای آهن‌ربا دائم بدون‌جاروبک برحسب شکل‌موج ولتاژ ضدمحرکه (back-EMF) آنها به دو دسته اصلی بدون‌جاروبک AC (PMSM) و بدون‌جاروبک DC (یا BLDC) تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع PMSM ولتاژ ضدمحرکه فاز آرمیچر سینوسی بوده و در نوع BLDC ولتاژ ضدمحرکه دارای شکل موج ذوزنقه‌ای با بازه تخت ۱۲۰ درجه‌ای است. شکل‌موج‌های ولتاژ ضدمحرکه این دو نوع موتور در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. دسته دیگری از موتورهای بدون‌جاروبک نیز وجود دارند که در دو دسته فوق جای نمی‌گیرند و ولتاژ ضدمحرکه آنها نه به شکل سینوسی باشد و نه ذوزنقه‌ای، که این موتورها ملاحظات کنترلی خود را دارند. تفاوت در ولتاژ ضدمحرکه، از نوع سیم‌پیچی در شیارهای استاتور ناشی می‌شود. تعداد زیاد شیار و سیم‌پیچی توزیع شده در استاتور موتور PMSM سبب ایجاد نیروی‌محرکه مغناطیسی (mmf) و شار سینوسی شده و درنتیجه ولتاژ ضدمحرکه فاز سینوسی تولید می‌شود. اما در صورت استفاده از سیم‌پیچی متمرکز در استاتور، توزیع mmf و شار به‌صورت ذوزنقه‌ای خواهد شد. از نظر ملاحظات اقتصادی و محدودیت‌های تولید، ساخت هسته استاتور با سیم‌پیچی نوع متمرکز بسیار ساده‌تر است. علاوه بر آن خود سیم‌بندی هادی‌های مسی در شیارهای استاتور در نوع متمرکز از نوع توزیع‌شده نیز آسان‌تر و ارزان‌تر است. روتور هر دو نوع موتور شامل یک یا چند زوج قطب با آهن‌ربا دائم است که در کاربرد کولر آبی با توجه به سرعت دورانی پائین موتور از روتور نوع آهن‌ربا سطحی می‌توان استفاده نمود.



شکل ۲. ولتاژ ضد محرکه در انواع مختلف موتورهای آهن‌ربا دائم بدون‌جاروبک

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]



الف) هسته استاتور موتور بدون‌جاروبک طراحی شده

ب) روتور و استاتور سیم‌پیچی شده موتور بدون‌جاروبک

شکل ۳. بخش‌های اصلی موتور بدون‌جاروبک با توان ۰/۵ hp ساخته شده برای کاربرد کولر آبی

موتور بدون‌جاروبک سه‌فاز طراحی شده در این پژوهش از نوع روتور خارجی و دارای ۱۶ قطب است. شکل ۳، تصویر هسته استاتور و استاتور سیم‌پیچی‌شده موتور بدون‌جاروبک سه‌فاز را نشان‌می‌دهد. استاتور دارای اتصال ستاره بوده و شامل ۱۲ شیار است که هر فاز از چهار دسته سیم‌پیچی ۴۵ دوری و با سیم مسی ۰/۶ mm^2تشکیل شده است. عایق مورد استفاده در استاتور نیز از نوع یک‌پارچه است که کار مونتاژ و تولید را بسیار ساده می‌کند. همچنین در شکل (۳- ب) روتور موتور بدون‌جاروبک ساخته شده نیز نشان داده شده است. روتور از نوع آهن‌ربا سطحی و دارای هشت قطب

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

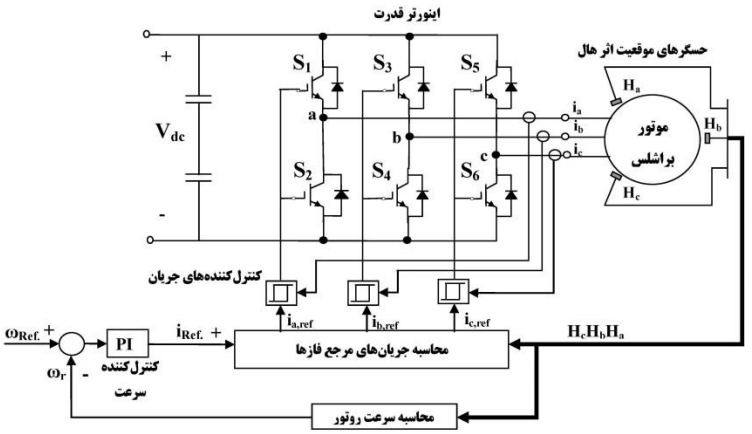
می‌باشد و از آهن‌ربا فریتی استفاده شده است. طراحی موتور در نرم‌افـزار Magnet انجـام شـده اسـت. نتایج تحلیل اجزاء محدود و همچنین تست ژنراتوری موتور نشان می‌دهد که ولتاژ ضدمحرکه القا شـده در موتور طراحی شده دارای شکل‌موج غیرسینوسی است.

۳-۲. استراتژی کنترل موتور بدون‌جاروبک

تفاوت در شکل موج ولتاژ ضدمحرکه فازها سبب می‌شود تا روش‌هـای مـورد اسـتفاده در کنتـرل ایـن موتورها با هم متفاوت باشـند. جهـت ایجـاد گشـتاور لحظـه‌ای ثابـت و عـاری از ضـربان، در کنتـرل موتورهای PMSM از تئوری‌های کنترلی در دسـتگاه مرجـع دومحـوری dq نظیـر روش‌هـای کنتـرل برداری استفاده می‌شود و جریان سینوسی به هر سه فاز موتور تزریق می‌گردد. در صورتی‌که در کنتـرل موتورهای BLDC، با استفاده از روش کنترل جریان فازها، جریان‌های شـبه‌مربعـی (شـش پالسـی) در فازهای موتور جاری می‌شود به نحوی‌که در هرلحظه از زمان تنها از دو فاز موتور جریان عبور می‌کنـد. برای موتورهای BLDC استفاده از روش‌های کنترلی در دستگاه dq معمول نبوده و بـه‌کـارگیری آنهـا بسیار پیچیده می‌باشد (اجتهد، ۱۳۹۵).

در کنترل برداری موتورهای PMSM و جهت داشتن گشتاور لحظه‌ای عاری از ضـربان، دانسـتن مقدار لحظه‌ای موقعیت روتور ضروری است و بـرای ایـن منظـور معمـولاً از اینکودرهـای نـوری و یـا تخمین‌گرهای حالت استفاده می‌گردد. این در حالی‌است که در کنترل موتورهای BLDC تنها دانسـتن ۶ موقعیت روتور که منطبق بر لحظات کموتاسیون هستند کفایت می‌کنـد و بـرای ایـن منظـور از سـه حسگر ارزان‌قیمت موقعیت اثر هال استفاده می‌شود. در مورد موتورهای آهن‌ربا دائم بدون‌جاروبـک کـه ولتاژ ضدمحرکه آنها نه به شکل سینوسی است و نه ذوزنقـه‌ای ایـده‌آل، روش کنترلـی مـورد اسـتفاده وابسته به کاربرد است. اگر با توجه به بار، کاهش ضربان گشـتاور اهمیـت داشـته باشـد، از روش‌هـای خاص کنترلی نظیر حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و یا روش‌های کنترل بـرداری بهبـود یافتـه بایـد استفاده شود (حلوایی، ۱۳۹۶). در غیر این‌صورت هم روش کنترل برداری و هـم روش کنتـرل جریـان شبه مربعی می‌توانند بکار گرفته شوند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]



شکل ۴. بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل موتور بدون‌جاروبک مورد استفاده در درایو کولر آبی

در کاربرد کولر آبی، مطابق جدول (۱)، الزام استاندارد جهت دامنه ارتعاشات مکانیک و نویز صوتی به ترتیب برابر ۱/۶ mm/s^2 و ۵۵ dB است که چندان سخت‌گیرانه نیست و لذا جهت سادگی هرچه بیشتر ساختار درایو از روش کنترل جریان شبه مربعی استفاده می‌شود. البته برای بهبود کیفیت گشتاور ایجاد شده و همچنین حفاظت جریان فازها، از سه حسگر جریان استفاده شده است و با توجه به وجود این سه حسگر جریان، به‌جای تنظیم جریان لینک dc از تنظیم مستقل جریان سه‌فاز استفاده شده است. شکل (۴) بلوک دیاگرام سیستم کنترل مورد استفاده را نشان می‌دهد. موتور ساخته شده هم در اتاق تست استاندارد نویز صوتی آزمایش شد و هم با استفاده از دستگاه ارتعاش‌سنج، مقدار ارتعاشات مکانیکی آن نیز اندازه‌گیری شد که مقادیر مربوطه در محدوده مجاز و الزام استاندارد قرار داشتند. لذا استفاده از روش کنترلی تنظیم مستقل جریان شبه مربعی در سه‌فاز برای این کاربرد هم اقتصادی است و هم ملزومات استاندارد را رعایت می‌کند.

۳-۳. سخت‌افزار درایو موتور بدون‌جاروبک

سخت‌افزار درایو طراحی شده شامل دو برد مجزا است. برد اینورتر و کنترل موتور در شکل (۵- الف) نمایش داده شده است که شامل سوئیچ‌های اینورتر، حسگرهای جریان، میکروکنترلر و درایور

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

سوئیچ‌هاست و در داخل پوسته موتور قرار می‌گیرد. بـرد مـدار تصـحیح ضـریب تـوان (PFC) و فیلتـر ورودی جدای از این برد طراحی شده است. در شکل (۵- ب)، برد PFC نشان داده شده است.

الف) برد اینورتر و کنترل درایو

ب) برد تصحیح ضریب توان و فیلتر ورودی

شکل ۵. سخت‌افزار درایو طراحی شده برای موتور بدون‌جاروبک کولر آبی

۴. نتایج تست‌های عملکردی موتور بدون‌جاروبک و درایو طراحی شده

جهت صحه‌گذاری طراحی‌های انجام شده و انطباق الزامات عملکردی با مجموعه موتور- درایو سـاخته شده، سیستم موتور و درایو بدون‌جاروبک ارائه شده در بخش قبـل در آزمایشـگاه ملـی اسـتاندارد و بـا استفاده از تجهیزات تست کالیبره شده در شرایط مختلف تست می‌گردد. برای اندازه‌گیری بهره موتور و

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

درایو بدون‌جاروبک، از دینامومتر نوع هیسترزیسی نشان داده شده در شکل (۶) استفاده می‌شود. این سیستم با اعمال گشتاور بار مورد نیاز، گشتاور بار و سرعت محور را اندازه‌گیری می‌کند و توان جذب شده از موتور تحت تست (موتور بدون‌جاروبک) را به‌صورت تلفات هیسترزیس مصرف می‌کند. اندازه‌گیری‌های بهره، منطبق بر استاندارد ملی تست موتورهای بدون‌جاروبک به شماره ۳-۱-۳۰-۳۷۷۲ انجام می‌شوند. کیفیت توان ورودی درایو و توان ورودی نیز توسط یک دستگاه آنالایزر قدرت کالیبره اندازه‌گیری می‌شود. برای محاسبه بهره، از رابطه مستقیم نسبت توان حقیقی خروجی به توان حقیقی ورودی به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_{out} \times \omega_m}{V_l I_l \cos\varphi} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، ω_m سرعت دورانی موتور، T_{out} گشتاور بار روی محور موتور است که توسط حسگر گشتاور دستگاه دینامومتر به راحتی قابل اندازه‌گیری است. توان ورودی هم برابر توان ورودی به درایو است که با توجه به حذف هارمونیک‌های جریان ورودی توسط فیلتر برابر توان هارمونیک اصلی ولتاژ و جریان است.

شکل ۶. دینامومتر نوع هیسترزیس مورد استفاده جهت تعیین بهره موتور بدون‌جاروبک

برای بررسی دقیق عملکرد موتور در هر دو سرعت کند و تند، موتور تحت دو نوع تست قرارمی‌گیرد. در تست اول که آنرا تست نقطه کار (یا duty) می‌نامیم، در سرعت ثابت، گشتاور بار موتور برابر با گشتاور نامی در آن سرعت قرار داده می‌شود و کمیت‌های خروجی موتور و درایو (شامل بهره، جریان، ضریب توان، ...) اندازه‌گیری می‌شوند. در تست دوم که آن‌را تست منحنی (یا Curve)،

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

نام‌گذاری می‌کنیم، در دو سرعت ثابت تند و کند، گشتاور بار موتور از مقدار صفر تا مقدار نامی به‌صورت مستمر و با شیب مشخصی تغییر داده می‌شود و کمیت‌های خروجی موتور و درایو اندازه‌گیری می‌شوند. جهت اختصار مطلب، در ادامه، تنها نتایج تست‌های نقطه کار یا duty ارائه می‌شوند.

۴-۱. تست نقطه کار (duty) در دور تند ۱۴۵۰ rpm و تحت گشتاور نامی ۲/۵ N.m

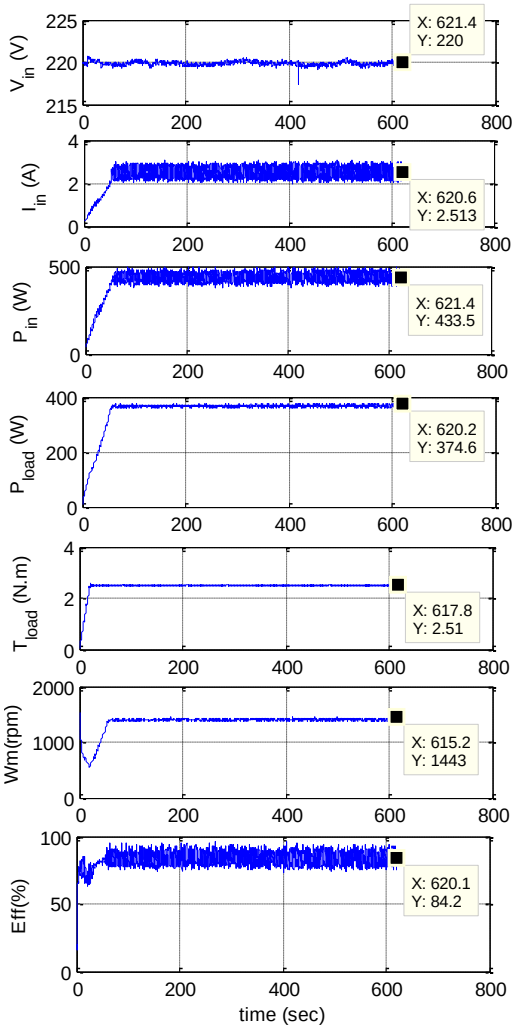
با توجه به طراحی‌های انجام شده و درنظر گرفتن نسبت قطر فلکه به پولی برابر با ۲۵۶ به ۷۰، دور تند موتور ۱۴۵۰ rpm و دور کند نیز برابر ۹۵۰ rpm درنظر گرفته شدند. لذا در این تست، موتور بدون‌جاروبک با توان ۳۷۵ W (یا ۰/۵ hp) در دو دور تند و کند، تحت گشتاور بار متغیر از مقدار صفر تا حدود گشتاور نامی (۲/۵ N.m) برای دور تند و ۱/۲۵ N.m برای دور کند) قرار می‌گیرد. برای این منظور در هر دور، گشتاور اعمالی به موتور به‌مدت ۴۵ ثانیه از مقدار صفر به مقدار نامی آن دور می‌رسد و به‌مدت ۱۰ دقیقه در این شرایط نگه‌داشته می‌شود. سیستم تست مورد استفاده در هر ۲۰۰ میلی‌ثانیه (فرکانس نمونه‌برداری) از داده‌های اندازه‌گیری برای انجام محاسبات استفاده می‌کند.

نتایج تست نقطه کار در دور تند ۱۴۵۰ rpm و تحت گشتاور ۲/۵ N.m در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد ولتاژ خط یا ولتاژ ورودی درایو در مقدار ۲۲۰ V ثابت شده است. جریان ورودی درایو نیز در حد ۲/۵ A است. گشتاور اعمالی به موتور طی تست در مقدار ۲/۵ N.m ثابت نگه‌داشته شده است و سرعت موتور نیز برابر ۱۴۴۳ rpm است که بسیار نزدیک به مقدار مرجع ۱۴۵۰ rpm است و این مقدار خطا با توجه به خطاهای سیستم اندازه‌گیری قابل چشم‌پوشی است. مقادیر توان ورودی و خروجی موتور به ترتیب برابر ۴۳۳ W و ۳۷۵ W هستند که بهره کلی حدود ۸۵ درصد را نتیجه می‌دهد که برای یک سیستم محرکه درایو مقدار بالایی است. این مقدار اگر با بهره موتورهای القایی تک‌فاز متداول با توان ۰/۵ hp در دور تند کولر ۵۰۰۰ که حداکثر برابر با ۵۰٪ است، مقایسه شود، می‌توان برتری موتور بدون‌جاروبک را بیشتر درک نمود. برای همین منظور یک موتور القایی تک‌فاز کولری با توان۰/۵ hp نیز با همین سیستم تست موجود در شرایط کاری مشابه آزمایش گردید. نتایج تست نقطه کار این موتور در دور تند ۱۴۳۷ rpm در شکل (۸) نشان داده شده است.

مشاهده می‌گردد که این موتور القایی تک‌فاز در دور تند دارای بهره ۴۸/۳٪ است که به معنای اتلاف بیش از نصف توان دریافتی از شبکه است. یعنی از توان ورودی ۷۸۱ W تنها ۳۷۲ W را به کار

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

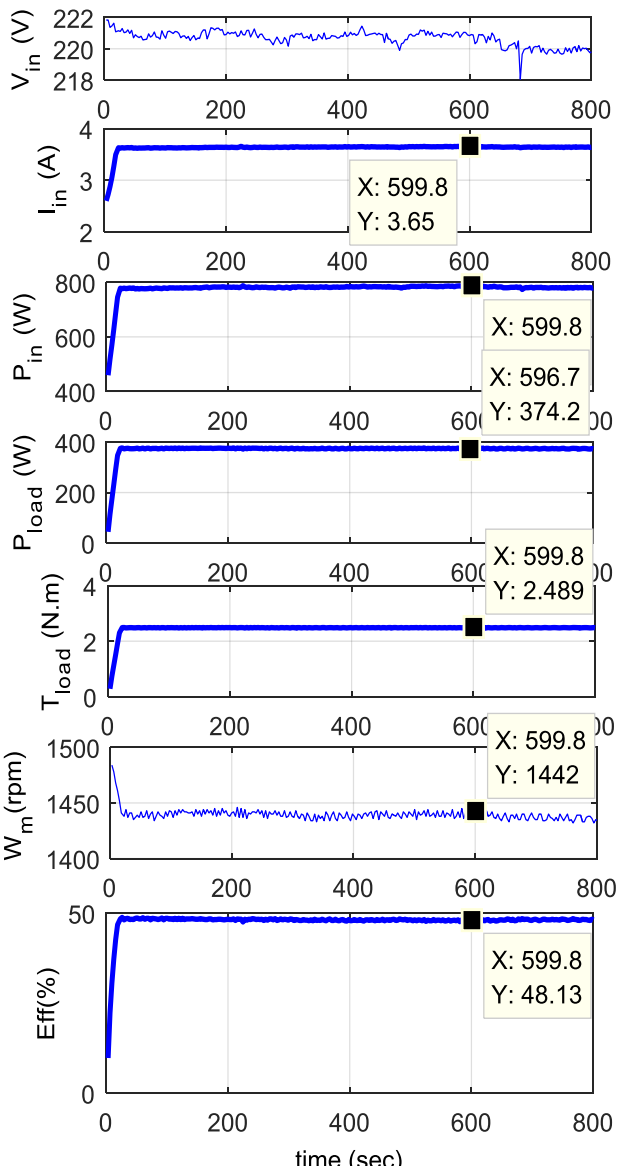
مفید در محور خود تبدیل می‌کند. جریان ورودی موتور تک‌فاز A ۳/۶ است که ۵۰ درصد بیش از جریان A ۲/۵ موتور بدون‌جاروبک است. در مقابل بهره موتور بدون‌جاروبک در این شرایط کاری معادل ۸۴/۲٪ بود یعنی افزایش حدود ۷۵٪ که عدد قابل توجهی است.



شکل ۷. نتایج تست نقطه کار موتور بدون‌جاروبک hp ۰/۵

کولر آبی ۵۰۰۰ در دور تند rpm ۱۴۵۰ و تحت گشتاور نامی N.m ۲/۵

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]



شکل ۸. نتایج تست نقطه کار موتور القایی تک‌فاز ۰/۵ hp

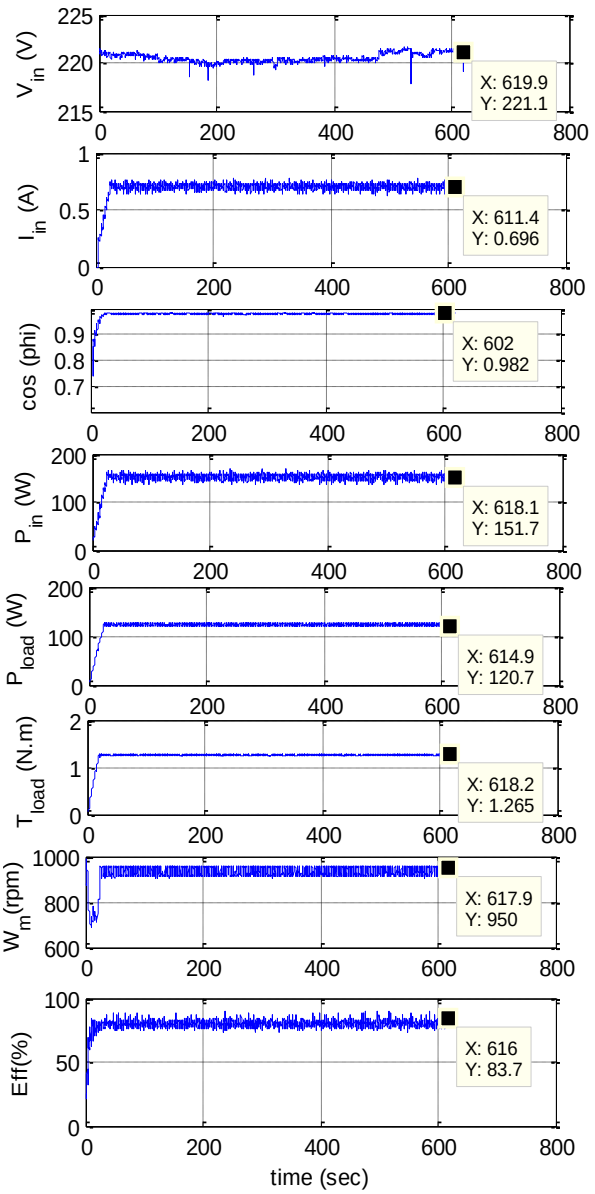
کولر آبی ۵۰۰۰ در دور تند ۱۴۵۰ rpm و تحت گشتاور نامی ۲/۵ N.m

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

۴-۲. تست نقطه کار (duty) در دور کند ۹۵۰ rpm و تحت گشتاور نامی ۱/۲۵ N.m

قبل از ارائه نتایج این تست، طریقه محاسبه مقدار گشتاور نامی در دور کند بیان می‌گردد. همان‌طور که قبلا نیز اشاره شد، دو سرعت تند و کند برای موتور بدون‌جاروبک دقیقاً برابر همان دو سرعت تند و کند موتورهای القایی تک‌فاز درنظر گرفته شدند و از طرفی دور کند برابر دو سوم دور تند می‌باشد. همچنین طبق طراحی‌های سیالاتی مربوط به فن (پروانه) سانتریفیوژ کولرهای آبی و مشخصه‌های توان – سرعت این فن‌ها (که در آنها، توان فن تقریباً با مکعب سرعت متناسب است)، توان فن در دور کند حدود یک سوم توان فن در دور تند خواهد شد. لذا با توجه به نسبت دو سوم سرعت کند نسبت به تند، گشتاور موتور در سرعت کند حدود نصف گشتاور موتور در دور تند و برابر ۱/۲۵ N.m به‌دست می‌آید. نتایج تست نقطه کار در دور کند۹۵۰ rpm و تحت گشتاور ۱/۲۵ N.m در شکل (۹) نمایش داده شده‌اند. مطابق شکل، ولتاژ خط یا ولتاژ ورودی درایو در مقدار ۲۲۰ V ثابت شده است و جریان موتور تا مقدار ۰/۶۹ A افزایش یافته است. گشتاور اعمالی به موتور طی تست در مقدار ۱/۲۵ N.m ثابت نگه‌داشته شده است و سرعت موتور نیز برابر ۹۵۰ rpm است که دقیقاً برابر سرعت مرجع اعمالی به درایو است. ضریب توان ورودی درایو نیز در حد ۰/۹۸ و نزدیک به ۱ است. مقادیر توان ورودی و خروجی موتور به ترتیب برابر ۱۵۱ W و ۱۲۰ W هستند که بهره کلی حدود ۸۳/۷ درصد را نتیجه می‌دهد که برای یک سیستم محرکه درایو مقدار بالایی است. این مقدار اگر با بهره موتورهای القایی تک‌فاز متداول با توان ۰/۵ hp در دور کند کولر ۵۰۰۰ که بین ۳۰٪ تا ۴۰٪ است، مقایسه شود، می‌توان برتری موتور بدون‌جاروبک را با دارا بودن بهره دو برابر نسبت به بهره موتورهای القایی تک‌فاز درک نمود. برای همین منظور موتور القایی تک‌فاز قبلی مجددا در دور کند تحت شرایط کاری همانند موتور بدون‌جاروبک با دستگاه دینامومتر تحت آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش در شکل ۱۰ آورده شده‌اند.

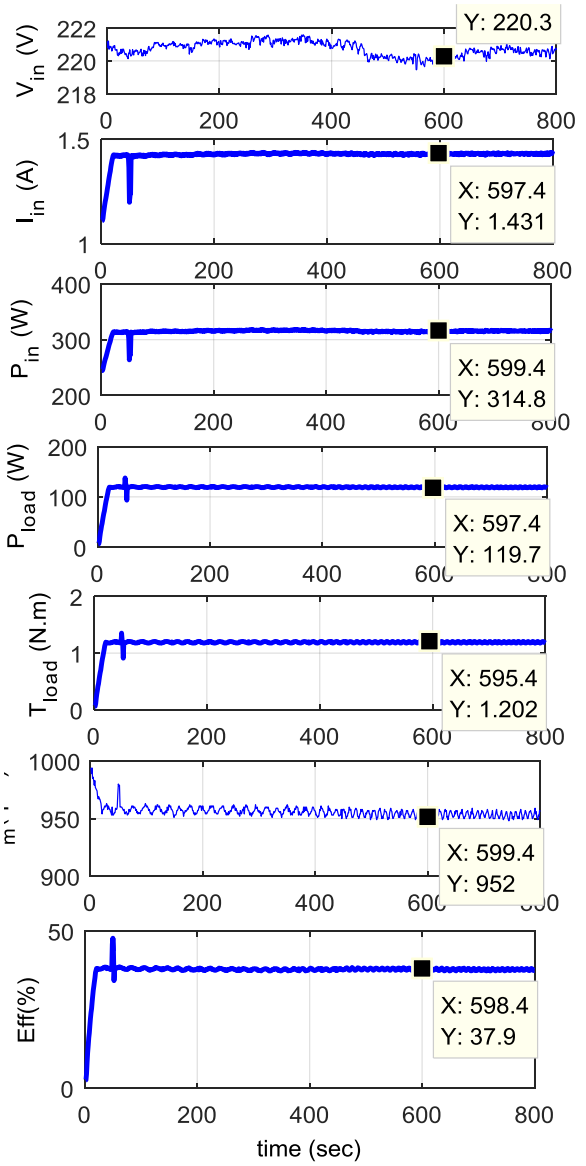
[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]



شکل ۹. نتایج تست نقطه کار موتور بدون‌جاروبک ۰/۵ hp

کولر آبی ۵۰۰۰ در دور کند ۹۵۰ rpm و تحت گشتاور نامی ۱/۲۵ N.m

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]



شکل ۱۰. نتایج تست نقطه کار موتور القایی تک‌فاز ۰/۵ hp
کولر آبی ۵۰۰۰ در دور کند ۹۵۰ rpm و تحت گشتاور نامی ۱/۲۵ N.m

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

جدول ۲. نتایج تست‌های دینامومتری دو موتور بدون‌جاروبک (PMBL) و القایی تک‌فاز (SPIM) با توان hp ۰/۵ جهت کاربرد در کولر آبی

ردیف	کمیت	دور کند (۹۵۰ rpm)		دور تند (۱۴۵۰ rpm)	
		PMBL	SPIM	PMBL	SPIM
۱	توان ورودی (W)	۱۵۳	۳۲۰	۴۴۲	۷۸۱
۲	توان خروجی (W)	۱۲۴/۴	۱۲۰	۳۶۸	۳۷۲
۳	گشتاور بار (N.m)	۱/۲۵	۱/۲۱	۲/۵	۲/۵
۴	ضریب توان ورودی درایو	۰/۹۸۱	---	۰/۹۷	---
۵	جریان ورودی درایو (A)	۰/۷	۱/۴۵	۲/۵۷	۳/۶۵
۶	THD جریان ورودی درایو	٪۷/۸	۰	٪۵	۰
۷	حداکثر ریپل سرعت (rpm)	۱۰	---	۱۲	---
۸	بهره (٪)	۸۳	۳۷/۶	۸۴	۴۸/۳

مأخذ: نتایج تحقیق

۴-۳. جمع‌بندی تست دینامومتری موتور بدون‌جاروبک

جهت تکمیل تست‌ها و انطباق این آزمایش با استاندارد ملی موتورهای بدون‌جاروبک به شماره به شماره ۳-۱-۳۰-۳۷۷۲، تست اندازه‌گیری بهره در نصف دور نامی (یا نصف دور تند) و تحت گشتاور بار نامی N.m ۲/۵ نیز انجام گردید. است. بهره موتور در این شرایط عدد ٪۷۱/۷ به‌دست آمد که بسیار فراتر از مقدار الزام استاندارد در این محدوده توانی یعنی بهره ٪۶۱/۹ است. نتایج تست‌های انجام شده در این بخش در جدول (۲) خلاصه شده‌اند. مقادیر THD ذکر شده در این جدول توسط دستگاه پاورآنالایزر مرجع اندازه‌گیری شده‌اند که این مقادیر بسیار کمتر از THD الزام شده در استاندارد و جدول (۱) است. بهره سیستم موتور بدون‌جاروبک در دو دور تند و کند به ترتیب برابر ٪۸۳ و ٪۸۴ است که از الزام استاندارد موتورهای بدون‌جاروبک ذکر شده در جدول (۱) یعنی ٪۶۶/۳ و ٪۸۱/۱ فراتر است. توجه شود که این مقادیر بهره نسبت به بهره موتورهای القایی تک‌فاز با توان مشابه (به‌عنوان توان مبنا) و در دو دور کند و تند بین ۶۰ تا ۱۰۰ درصد بیشتر است و لذا و به‌کارگیری موتورهای بدون‌جاروبک، افزایش قابل توجهی در صرفه‌جویی انرژی به‌همراه خواهد داشت.

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

۵. نتایج تست موتور بدون‌جاروبک تحت بار واقعی و هوادهی کولری

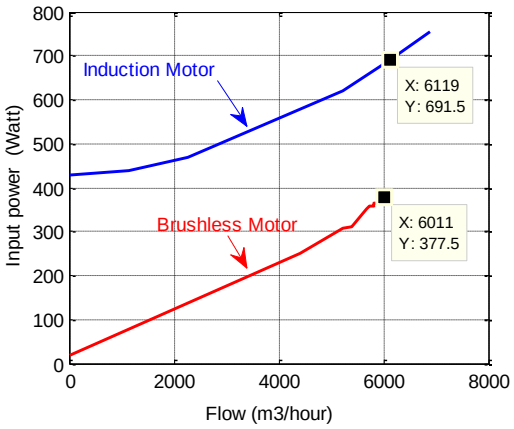
جهت بررسی عملکرد موتور بدون‌جاروبک طراحی شده تحت بار واقعی با هماهنگی انجام شده با آزمایشگاه مرجع شرکت لورچ اصفهان یک دستگاه کولر ۵۰۰۰ به موتور بدون‌جاروبک ۰/۵ hp طراحی شده مجهز گردید. این کولر مطابق استاندارد ASHRAE 133-2015 که ملاحظات تست استاندارد کولرهای آبی را تعیین می‌کند، تحت تست هوادهی قرار گرفت (ASHRAE، 2015). شکل(۱۱) سیستم تست کولر در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. روش تست به این‌صورت است که با باز و بست دمپرهای موجود در کانال خروجی هوای کولر، اختلاف فشار (ΔP) بین ابتدا و انتهای کانال به‌وجود آورده می‌شود و لذا دبی هوای خروجی تغییر می‌کند. در کاربرد واقعی، این اختلاف فشار به دلیل افزایش طول کانال، و یا پیچ و خم‌های مسیر عبور هوا در کانال به‌وجود می‌آید. در کولرهای آبی مجهز به موتورهای القایی تک‌فاز، با ایجاد اختلاف فشار بیشتر، گشتاور اعمالی به موتور بیشتر شده و دور موتور به دلیل وجود لغزش کاهش می‌یابد و در نتیجه دبی هوا کاهش می‌یابد. موتوری مناسب‌تر است که با توان مصرفی پائین‌تر، دبی هوای بیشتری ایجاد نماید. هدف از انجام این تست، بررسی و مقایسه عملکرد هوادهی کولر مجهز به موتور بدون‌جاروبک با موتورهای القایی تک‌فاز است. لازم به ذکر است که تست هوادهی مطابق استاندارد فقط در دور تند یعنی ۱۴۵۰ rpm موتور یا ۴۵۰ rpm فن انجام می‌گیرد.

الف) دمپرهای تغییر دبی هوای خروجی کولر

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

ب) موتور بدون‌جاروبک نصب شده روی کولر آبی

شکل ۱۱. سیستم تست هوادهی و برچسب انرژی کولرهای آبی در آزمایشگاه مرجع



شکل ۱۲. توان مصرفی توسط موتورهای بدون‌جاروبک و القایی تک‌فاز نصب شده روی کولر آبی ۵۰۰۰

همچنین کولرهای آبی ۵۰۰۰ مجهز به موتور القایی تک‌فاز با توان ۰/۵ hp در دور تند خود، دبی حدود ۶۰۰۰ m^3/h ایجاد می‌نمایند. اما تست‌های اولیه نشان داد که کولر ۵۰۰۰ مجهز به موتور بدون‌جاروبک در دور تند ۴۵۰ rpm دبی بسیار زیادی تا حدود ۸۰۰۰ m^3/h ایجاد می‌کند. لذا برای مقایسه بهتر توان مصرفی موتور بدون‌جاروبک با موتور تک‌فاز، دور تند موتور در این تست از ۴۵۰ rpm به ۳۷۵ rpm تقلیل یافت.

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

تست هوادهی برای دو کولر ۵۰۰۰ که هر یک مجهز به یکی از دو موتور بدون‌جاروبک و القایی تک‌فاز بودند انجام پذیرفت. در شکل (۱۲) توان دریافتی توسط هر موتور در مقادیر مختلف دبی هوا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در دبی حدود $6000\ m^3/h$، کولر مجهز به موتور بدون‌جاروبک توان ۳۷۷ W را از شبکه ۲۲۰ ولت دریافت می‌کند، در حالی‌که کولر مجهز به موتور القایی تک‌فاز توان بسیار زیادی در حد ۶۹۱ W دریافت می‌کند که حدود ۸۳٪ بیش از توان موتور بدون‌جاروبک است. همچنین در دبی $5000\ m^3/h$ توان موتور بدون‌جاروبک و القایی به ترتیب برابر ۳۰۰ W و ۶۱۰ W هستند. در دبی $3000\ m^3/h$ توان این دو موتور به ترتیب برابر ۱۸۰ W و ۵۰۰ W هستند. مقایسه این اعداد نشان می‌دهد که موتور بدون‌جاروبک تحت شرایط بار واقعی، با دبی هوای خروجی یکسان کولرها، توان مصرفی خیلی کمتری نسبت به موتور القایی تک‌فاز دارد. لازم به ذکر است که اغلب کولرهای آبی ساخت داخل که مجهز به موتور القایی تک‌فاز هستند از لحاظ برچسب انرژی در رده E و F جای می‌گیرند، اما موتورهای بدون‌جاروبک به راحتی امکان قرار گرفتن در رده انرژی +A را دارند.

۶. ملاحظات اقتصادی به‌کارگیری موتور بدون‌جاروبک در کاربرد کولر آبی

در دو بخش قبل، عملکرد موتور بدون‌جاروبک ساخته شده در دو تست با بار دینامومتری و با بار واقعی کولری بررسی شد و مشاهده گردید این موتور از جمیع جهات بر موتورهای القایی تک‌فاز ترجیح دارد. مساله مهم دیگر، درنظر گرفتن هزینه تولید موتور بدون‌جاروبک و درایو آن و موفقیت در فروش تجاری آن است. هزینه‌های اصلی این سیستم جدید در سه بخش اصلی موتور بدون‌جاروبک، درایو و سیستم تصحیح ضریب توان و فیلتر ورودی است.

طراحی و ساخت موتور شامل هسته استاتور، سیم‌پیچی استاتور، هسته روتور، آهن‌ربا روتور، محور و یاتاقان‌های روتور است. به لحاظ هزینه، هسته استاتور موتور بدون‌جاروبک طراحی شده و همچنین مقدار هادی مسی مورد استفاده در آن به ترتیب تقریباً برابر نصف و یک‌سوم مقدار هسته و سیم مسی موتور القایی تک‌فاز هم‌توان است. به لحاظ طراحی و مونتاژ هسته و سیم‌پیچی هم با توجه سیم‌پیچی متمرکز با تعداد شیارهای کمتر در موتور بدون‌جاروبک، کار سهل‌تر است. لذا قیمت تمام شده استاتور موتور بدون‌جاروبک کمتر از ۵۰٪ قیمت استاتور موتور تک‌فاز است. مهم‌ترین افزایش هزینه در موتور بدون‌جاروبک بخاطر استفاده از آهن‌ربا دائم در روتور است که در این کاربرد معمولا از مواد آلنیکو، ساماریم–کبالت و یا نئودیم–آهن– بور استفاده می‌شود. این مواد آهن‌ربا دائم معمولا به کشورمان

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

وارداتی هستند و قیمت آنها تحت تأثیر عوامل مختلفی می‌تواند قرار بگیرد، در حالی‌که روتور موتور تک‌فاز از مواد ریخته‌گری شده است که تکنولوژی ساخت و مواد آنها در داخل کشور موجود است. در نهایت قیمت آهن‌ربا دائم و هسته روتور مورد استفاده در موتور بدون‌جاروبک حدود ۲۵٪ قیمت کلی موتور خواهد شد. بخش دیگر موتور، یاتاقان‌های آن هستند که با توجه به پائین بودن توان موتور کولری، می‌توان همانند موتورهای کولری تک‌فاز از یاتاقان‌های ساده یا بوش استفاده نمود و یا برای کاهش بیشتر اصطکاک و مصرف کمتر توان از یاتاقان‌های غلتشی یا ساچمه‌ای استفاده کرد. هزینه یاتاقان ساچمه‌ای نسبت به بوش اندکی بیشتر است، اما در صورت مراقبت طول عمر بیشتری دارد. هزینه یاتاقان غلتشی در حدود ۲٪ قیمت کلی موتور بوده که عدد قابل ملاحظه‌ی نیست. لذا در انتخاب نوع یاتاقان به جزء عامل افزایش جزیی هزینه، عوامل دیگری چون طول عمر موتور، هزینه نگهداری و غیره اثرگذار هستند. در مجموع و با بررسی‌های صورت گرفته، قیمت تمام شده یک موتور بدون‌جاروبک در تولید انبوه حدود ۷۵٪ قیمت موتور کولری تک‌فاز خواهد شد. در بخش هزینه درایو و مدار PFC، این دو بخش هزینه مازادی نسبت به موتور کولری تک‌فاز ایجاد می‌کنند. برآورد هزینه قطعات به‌کار رفته در این دو بخش تقریباً معادل هزینه خود موتور بدون‌جاروبک است. در مجموع می‌توان گفت که هزینه تمام شده موتور بدون‌جاروبک و درایو آن تقریباً ۱۵۰٪ هزینه موتور القایی تک‌فاز هم‌توان آن خواهد شد. با توجه به افزایش ۱/۵ برابری هزینه استفاده از موتور بدون‌جاروبک نسبت به موتور تک‌فاز، استفاده از آنها نیازمند به فرهنگ‌سازی و همچنین حمایت دولت دارد. حمایت می‌تواند در سطح تولید کننده موتور بدون‌جاروبک، یا حمایت از کولرساز و یا حمایت از مشتری نهایی کولر آبی یعنی مصرف‌کننده باشد. اینکه حمایت در کدام سطح و به چه مقدار باشد، نیازمند مطالعه و بررسی کارشناسی است.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج طراحی، ساخت و تست و تحلیل عملکرد یک موتور بدون‌جاروبک و درایو الکتریکی آن برای کاربرد در کولر آبی ارائه گردید. پس از انجام تست‌های عملکردی و روتین، سیستم طراحی شده در شرایط کار و بار واقعی و در آزمایشگاه استاندارد تست کولر آبی آزمایش شد و با نتایج موتور القایی تک‌فاز هم‌توان مقایسه گردید. نتایج تست، بیان‌گر آن‌است که کولر آبی مجهز به این موتور به راحتی قابل قرار گرفتن در رده‌بندی A انرژی است، در حالی‌که موتورهای تک‌فاز موجود در رده انرژی

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

E و F هستند. موتور بدون‌جاروبک طراحی شده اگرچه طبق الزامات، فقط در دو سرعت تند و کند متناظر با موتورهای القایی تک‌فاز تست شد و دارای افزایش بهره حداقل ۶۰٪ بیشتر (با درنظر گرفتن بهره موتور تک‌فاز به عنوان بهره مبنا) نسبت به نمونه تک‌فاز خود بود، اما در تمامی بازه سرعت خود دارای بهره بالاتری است و می‌تواند در مود سرعت متغیر به‌کار گرفته شود. همچنین تحلیل مختصری در مورد ملاحظات اقتصادی و هزینه ساخت این سیستم انجام گرفت. در صورت تولید این موتور در داخل کشور و در تعداد بالا، هزینه تحمیلی به مشتری حدود ۵۰٪ بیش از هزینه موتور القایی تک‌فاز خواهد بود. از لحاظ فنی، نتایج حاصله از این پروژه بیانگر آن است عملکرد موتور بدون‌جاروبک در کاربرد کولر آبی با به‌کارگیری روش‌های کنترلی مناسب‌تر به‌جای عملکرد موتور در حالت سرعت ثابت قابل بهبود است. همچنین با بهبود طراحی موتور بدون‌جاروبک و استفاده از سایر ساختارهای موتور بدون‌جاروبک نظیر ساختار روتور خارجی و در نتیجه اتصال مستقیم موتور به پروانه کولر و حذف فلکه، تسمه و پولی، بهره کلی کولر قابل افزایش است و هزینه و مشکلات نگهداری آن کاهش می‌یابد. علاوه بر آن جهت بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم درایو و کاهش هزینه‌های مربوط به آن، استفاده از روش‌های کنترل بدون‌حسگر (سنسورلس) حتی به‌جای حسگرهای موقعیت اثر هال ارزان‌قیمت به‌طور اکید توصیه می‌شود. ذکر این نکته هم ضروری است که موتور و درایو بدون‌جاروبک پیشنهادی این مقاله سبب بهبود قابل‌ملاحظه بهره مصرف انرژی الکتریکی موتور می‌شود و گرنه از نظر نسبت بهره انرژی (شاخص EER)، کولر آبی حتی با موتور پربازده بدون‌جاروبک کماکان سیستمی کم بازده است.

سپاس‌گزاری

این مقاله حاصل طرح پژوهشی به شماره ۲۶۹۱۶-۹۶معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان با پژوهشگاه نیرو می‌باشد. نویسندگان این مقاله از حمایت‌های معنوی و مادی مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته پژوهشگاه نیرو، آزمایشگاه الکتروموتور سازمان ملی استاندارد و آزمایشگاه تست کولر آبی شرکت لورچ اصفهان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

[۱] اجتهد، سید حسین و ابوالفضل حلوایی نیاسر (۱۳۹۵)، کنترل محرکه‌های موتورهای DC بدون‌جاروبک، مجله انرژی ایران، ۱۹(۳)، صص ۱۴۵-۱۶۶.

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]

[۲] سازمان ملی استاندارد (۱۳۹۶)، استاندارد ملی ماشین‌های الکتریکی گردان - معیارها و مشخصات فنی مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک، شماره۳-۱-۳۰-۳۷۷۲.

[۳] سازمان ملی استاندارد (۱۳۸۹)، استاندارد ملی وسایل برقی خانگی و مشابه – ایمنی – قسمت ۱: الزامات عمومی، شماره ۱-۱۵۶۲.

[۴] بهرام‌گیری، مریم؛ عفت نژاد، رضا و مجتبی بابایی (۱۳۸۸)، "طراحی و ساخت موتور سوئیچ رلوکتانس برای کاربرد در کولرهای آبی جهت افزایش راندمان و کاهش مصرف انرژی"، *نشریه انرژی ایران*، ۱۲(۳)، صص ۱۳-۲۴.

[۵] حلوایی نیاسر، ابوالفضل و علیرضا فرجی (۱۳۹۶)، "کنترل بدون حسگر موتور بدون‌جاروبک آهن‌ربا دائم غیرسینوسی برمبنای روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و با استفاده از روئیتگر مود لغزشی مرتبه کامل"، *مجله علمی – پژوهشی مهندسی برق*، دانشگاه تبریز، ۴۷(۱)، صص ۵۵-۶۸.

[۶] صادق زاده، سیدمحمد؛ زارع، مهدی و حشمت‌اله اکبری (۱۳۸۴)، "ارزیابی فنی ـ اقتصادی راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی در الکتروموتورهای سه فاز بخش صنعت کشور"، *پنجمین همایش ملی انرژی*، صص ۹-۱.

[7] ASHRAE Standard (2015). “Standard 133-2015--Method of Testing Direct Evaporative Air Coolers.” (ANSI Approved).

[8] Binder A. (2008). “Potentials for Energy Saving with Modern Drive Technology – a Survey.” International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 90-95.

[9] Cohen B. (2007). “Variable Frequency Drives Operation and Application with Evaporative Cooling Equipment”, *CIT Journal*, 28(2), pp. 28-31.

[10] Fernando J.T.E. et al. (2016). “Overview on Energy Saving Opportunities in Electric Motor Driven Systems - Part 1 System Efficiency Improvement.” IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), pp. 1-8.

[11] Lee K. et al. (2014). “Energy Saving HVAC System Modeling and Closed Loop Control in Industrial and Commercial Adjustable Speed Drives”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1286-1292.

[12] Persson E. et al. (2007). “The Challenges of using Variable-speed Motor Drives in Appliance Applications”, *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, pp. 453-458.

[13] Pullaguram D. et al. (2016).“Standalone BLDC based Solar Air cooler with MPPT tracking for Improved Efficiency”, IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), pp. 1-5.

[14] Sojdei F. et al. (2014). “Potentials of Energy Conservation in the Industry Sector of Iran”, ECEEE Industrial Summer Study Proceedings, pp. 323-330.

[Downloaded from necjournals.ir on 2024-06-26]