

ارزیابی فنی و اقتصادی بهبود بازده با بازسیم‌پیچی موتورهای القایی

حمیدرضا اکبری رسکتی^۱، سید مهدی میرایمانی^{۲*}، جعفر ادبی فیروزجایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۸/۰۶/۰۴، پذیرش: ۹۸/۰۹/۰۵)

چکیده

افزایش بازده موتورها در صرفه‌جویی انرژی مصرفی آن‌ها تأثیر بسزایی دارد. با محاسبه انرژی مصرفی سالانه موتور، می‌توان اثر افزایش بازده در صرفه‌جویی انرژی را تخمین زد. یکی از روش‌های کارآمد و ارزان جهت افزایش بازده انرژی موتورها، بازسیم‌پیچی یا طراحی مجدد سیم‌پیچی استاتور است. ایجاد صرفه‌جویی مالی و کاهش مصرف انرژی از طریق بازسیم‌پیچی موتورها می‌تواند توجه سرمایه‌گذاران را به خود جلب کند. در این مقاله، موتور القایی تک‌فاز با توان ۰/۷۵ اسب بخار برای عملکرد سه فاز، بازسیم‌پیچی شده و تحلیل الکترومغناطیسی به روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار فلاکس انجام شده و مشخصات عملکردی آن مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌های اقتصادی شامل هزینه‌های عملیاتی، دوره بازگشت سرمایه و صرفه‌جویی سالانه انرژی نیز محاسبه شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بازده موتور بازسیم‌پیچی شده سه‌فاز نسبت به موتور القایی تک‌فاز، حدود ۱۲/۵٪ افزایش پیدا کرده و دوره بازگشت سرمایه آن با قیمت برق ۱۳ سنت در هر کیلووات ساعت حدود یک سال به‌دست آمد. بر اساس مقایسه‌ای که انجام شده، جایگزینی موتور القایی تک‌فاز با موتور بازسیم‌پیچی شده سه فاز در کلاس بازده استاندارد (IE1)، کم‌هزینه‌تر از جایگزینی با موتوری در این کلاس بازده است و صرفه‌جویی مالی آن در بار کامل حدود ۶۱ دلار به‌دست می‌آید. جهت راستی آزمایی، نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه گردید و خطای ناشی از اندازه‌گیری حدود ۶٪ مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: صرفه‌جویی انرژی، بازده، بازسیم‌پیچی

۱. مقدمه

اشتباه گران قیمت باشد. با توجه به اینکه امکان تغییر در هندسه شیارهای استاتور و ابعاد هسته موتور ساخته‌شده وجود ندارد، لذا جهت بهبود بازده موتور موجود دو راه پیش رو است:

- جایگزینی با یک موتور جدید که می‌تواند طراحی استاندارد یا بازده بهتر داشته باشد.
- طراحی جدید سیم‌پیچی و بازسیم‌پیچی موتور برای بازده بالاتر [۷].

برای جایگزینی موتور القایی موجود با موتور پربازده، باید مشخصات فنی موتور بررسی شود و از لحاظ اقتصادی مورد ارزیابی قرار گیرد. با وجود اینکه موتور جایگزین شده بازده بالاتری دارد و موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی برق می‌شود، اما دوره بازگشت سرمایه بر اساس قیمت واقعی برق طولانی می‌گردد و این امر توجیه اقتصادی ندارد.

مطالعات مختلفی در زمینه بازسیم‌پیچی و تأثیر آن روی بازده موتور انجام شده است [۸]. برای مثال در مقاله [۹] نشان می‌دهد که بازسیم‌پیچی موجب کاهش بازده در حدود ۲٪ شده

موتورهای الکتریکی حدود ۴۶٪ از انرژی برق تولیدشده در جهان را استفاده می‌کنند [۱]. در میان موتورهای الکتریکی، موتورهای القایی به دلیل ساختار ساده، با دوام و کم‌هزینه به‌طور گسترده در صنعت و لوازم خانگی به‌کار می‌روند. با توجه به دسترسی آسان به منابع تغذیه تک‌فاز، موتورهای القایی تک‌فاز بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. موتورهای القایی تک‌فاز علی‌رغم مزایای آن‌ها در کاربردهای توان پایین، نقطه ضعف‌هایی مانند گشتاور خروجی پایین، گشتاور پالسی بالا و بازده انرژی پایین هستند [۳]. از میان معیارهای مختلف برای بررسی عملکرد یک موتور، بدون شک مهم است که بازده در اولویت قرار گیرد [۴]. از آنجایی که هزینه انرژی الکتریکی در طول دوره بهره‌برداری از موتور می‌تواند ۶۰ تا ۱۰۰ برابر قیمت اولیه موتور باشد، استفاده از یک موتور با بازده بالاتر و هزینه اولیه بیشتر می‌تواند موجب صرفه‌جویی سالانه در مصرف انرژی شود [۵ و ۶]. به بیان دیگر انتخاب موتور ارزان قیمت با بازده انرژی پایین می‌تواند یک

افزایش تعداد دور در هر فاز با در نظر گرفتن ضریب تراکم شیار استاتور، موجب کاهش چگالی شار فاصله هوایی می‌شود. این روش کاهش تلفات هسته، کاهش جریان هر فاز و در نتیجه کاهش تلفات مسی استاتور را نتیجه می‌دهد. البته باید اثر کاهش شار مغناطیسی بر گشتاور خروجی موتور را نیز در نظر گرفت [۱۴].

هدف از این مقاله، بازسیم‌پیچی سه‌فاز یک موتور القایی تک‌فاز است و شبیه‌سازی و تحلیل الکترومغناطیسی به روش المان محدود^۲ با استفاده از نرم‌افزار فلاکس^۳ انجام می‌شود. تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی شامل هزینه‌های عملیاتی، دوره بازگشت سرمایه و صرفه‌جویی سالانه انرژی نیز مورد بررسی می‌گیرد. جهت راستی‌آزمایی، پارامترهای موتور به‌صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد.

۲. موتور القایی مورد مطالعه

مورد بررسی، یک موتور القایی قفس سنجابی تک‌فاز دو سرعت با خازن راه‌انداز و توان نامی ۰/۷۵ اسب بخار است که در کولرهای آبی استفاده می‌گردد و در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به تئوری میدان گردان موتور القایی تک‌فاز، میدان گردان راست‌گرد و چپ‌گرد نمی‌تواند گشتاور راه‌اندازی ایجاد کند [۱۷]. به همین علت از خازن سری شده با سیم‌پیچی کمکی استفاده می‌شود تا اختلاف‌فاز لازم جهت راه‌اندازی موتور را ایجاد کند و بعد از رسیدن سرعت موتور به حدود ۷۰٪ سرعت نامی، سیم‌پیچی کمکی و خازن، به کمک کلید گریز از مرکز، از مدار جدا خواهند شد. مقادیر نامی و ابعاد این موتور در جدول (۱) خلاصه شده است.



شکل (۲): موتور القایی تک‌فاز خازن راه‌انداز

است؛ یا اینکه در تحقیقات مهمی که در شرکت هاییدرو کبک^۱ انجام شده، نشان می‌دهد که بازسیم‌پیچی با سه مرتبه تکرار تأثیر چندانی روی افزایش تلفات و کاهش بازده موتور نداشته است (حدود ۰/۳٪ کاهش) [۱۰]. همچنین در مقاله [۱۱] نشان می‌دهد که موتور بازسیم‌پیچی شده نسبت به جایگزینی با موتور در کلاس بازده استاندارد، کم‌هزینه‌تر بوده و در واقع با طراحی سیم‌پیچی جدید و تغییر قطر هادی مسی، بازده موتور ۰/۳٪ نسبت به بازده سابق افزایش پیدا کرده است. در کارهای تحقیقاتی پیش‌رو همچنان سعی در طراحی مجدد موتورهای در حال تعمیر و افزایش بازده و عملکرد آن‌ها هستند [۱۲]. در مقاله [۱۳] نشان داده شده است که طراحی دقیق سیم‌پیچی استاتور ضمن حفظ تعداد دور هادی، موجب کاهش تلفات مسی استاتور و در نتیجه بهبود بازده شده است. به‌طور کلی دیدگاه‌های مختلفی در زمینه بازسیم‌پیچی و تأثیر آن بر بازده موتور وجود دارد، اما این نتایج نشان‌دهنده تفاوت کیفیت در بازسیم‌پیچی و تعمیر موتور است. از این‌رو روش بازسیم‌پیچی برای افزایش بازده موتورها که یک روش ارزان قیمت است و دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تری دارد، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد [۱۴]. اکثریت مطالعات بازسیم‌پیچی روی موتورهای کوچک انجام شده که بیشتر به تأثیر تلفات بر عملکرد موتور پرداخته است. تلفات ماشین معمولاً به تلفات مسی استاتور، تلفات مسی رتور، تلفات هسته، تلفات بادخوری و تلفات سرگردان تقسیم می‌شود [۱۳]. در فرکانس ۵۰ هرتز، متوسط سهم تلفات در شکل (۱) نشان داده شده است. واضح است که کاهش تلفات سیم‌پیچی استاتور، نقش مؤثری در بهبود بازده موتور خواهد داشت.



شکل (۱): توزیع تلفات در موتور القایی [۱۱]

نوع سیم‌پیچی استاتور مانند سیم‌پیچی گام کامل، گام کسری و شیار کسری نقش مؤثری در کاهش تلفات موتور خواهد داشت. برای نمونه استفاده از سیم‌پیچی متمرکز شیار کسری موجب کاهش پیشانی کلاف‌های مسی استاتور، کاهش سیم مسی استفاده شده و در نتیجه کاهش تلفات مسی استاتور می‌گردد [۱۵]. در این مقاله دو نوع سیم‌پیچی متحدالمرکز با گام کوتاه و سیم‌پیچی زنجیری به‌صورت شیار کسری بررسی شده است.

^۲ Finite Element Method

^۳ Altair Flux

^۱ Hydro Quebec

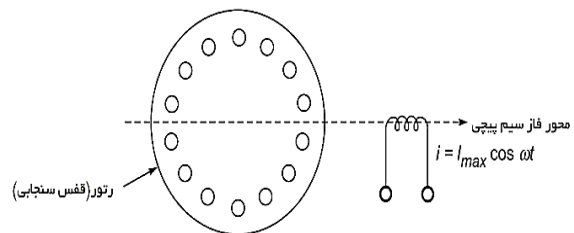
۳. تئوری میدان گردان

طرحی از یک موتور القایی تکفاز با یک سیم پیچی در استاتور و رتور قفس سنجابی در شکل (۳) نشان داده شده است. هنگامی که در سیم پیچی جریان سینوسی جاری می شود، یک نیروی محرکه مغناطیسی^۱ به صورت توزیع شده در فضا ایجاد می کند که پیک آن به صورت ضربانی با زمان تغییر می کند. طبق محور سیم پیچی، mmf در هر زاویه θ به صورت زیر به دست می آید:

$$F(\theta, t) = F_{max} \cos \omega t \cos \theta \quad (1)$$

جدول (۱): مشخصات پلاک موتور القایی تکفاز

ولتاژ نامی	۲۲۰
(آمپر) جریان نامی	۵/۲-۵/۹
(دور بر دقیقه) سرعت نامی	۹۵۰-۱۴۲۵
(میکروفاراد) خازن راه انداز	۲۳۰
(میلی متر) طول محوری هسته استاتور	۵۶
(میلی متر) قطر خارجی استاتور	۱۶۰
(میلی متر) قطر داخلی استاتور	۸۹
(میلی متر) قطر داخلی رتور (شفت)	۱۶
(میلی متر) طول فاصله هوایی	۰/۳
تعداد قطبها	۴
تعداد شیار استاتور	۳۶
تعداد شیار رتور	۴۸
(کیلوگرم در مترمربع) اینرسی	۰/۰۰۲۵



شکل (۳): موتور القایی تکفاز با سیم پیچی اصلی

رابطه (۱) می تواند به صورت مثلثاتی به معادله زیر تفکیک شود:

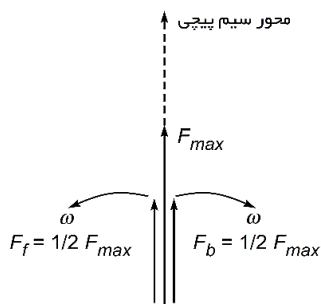
$$F(\theta, t) = \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} F_{max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2)$$

رابطه (۲) بیان می کند که میدان تکفاز ضربانی می تواند از مجموع دو میدان گردان که با سرعت سنکرون $\omega = 2\pi f$ و در خلاف جهت هم می چرخند، به دست آید. دو میدان دامنه $\frac{1}{2} F_{max}$ دارند که F_{max} بیشینه مقدار mmf ضربانی است. تقسیم یک

میدان مغناطیسی ضربانی به دو میدان گردان در خلاف جهت در شکل (۴) نشان داده شده است. در موتور القایی سه فاز، جریان سینوسی در هر فاز سیم پیچی یک موج mmf پالسی در فضا ایجاد می کند که دامنه آن به صورت سینوسی با زمان تغییر می کند. سه موج mmf پالسی در فاصله هوایی با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه از هم قرار دارند. موج mmf منتجه که جمع سه موج پالسی میدان است به صورت زیر به دست می آید:

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta - \omega t) \quad (3)$$

در موتور القایی تکفاز یک سیم پیچه، دو میدانی که در خلاف جهت هم می چرخند، باعث ایجاد گشتاور مخالف هم می شوند. این گشتاور ضربانی ایجاد شده، گشتاور متوسط صفر را نتیجه می دهد. ضرورت عملی می گوید دو میدان گردان ساخته شده باید در شرایط ثابت دارای دامنه نابرابر باشند تا باعث شود موتور خودراه انداز باشد. برای راه اندازی موتور نیاز به یک سری سیم پیچی دیگر به نام سیم پیچی کمکی است که باید دارای دور کمتر و سیم نازک تر باشد. سیم پیچی کمکی باید بعد از راه اندازی موتور از مدار جدا شود. گشتاور ضربانی، گشتاور متوسط حاصل نمی کند بلکه باعث می شود موتور تکفاز نسبت به موتور سه فاز پرسی و صدا تر باشد [۱۸].



شکل (۴): میدان ضربانی حاصل از برآیند دو میدان گردان

۴. بازسیم پیچی موتور القایی قفس سنجابی

برای طراحی مجدد سیم پیچی سه فاز و بهبود عملکرد موتور القایی تکفاز، باید تحلیلی روی سیم پیچی جدید انجام شود که آیا می تواند بازده را بهبود بخشد یا خیر. در بیشتر مقاله ها، روش هایی برای کاهش ریپل گشتاور و افزایش گشتاور متوسط ارائه داده اند، اما راه حل مناسبی برای بهبود بازده پیشنهاد نشده است [۳، ۱۹، ۲۰]. با توجه به ساختار موتور القایی تکفاز، طراحی مجدد سیم پیچی تکفاز بهبود چندانی در بازده ایجاد نمی کند. از این رو، سیم پیچی طراحی شده سه فاز را می توان روی استاتور موتور القایی تکفاز پیاده کرد و همین امر موجب بهبود

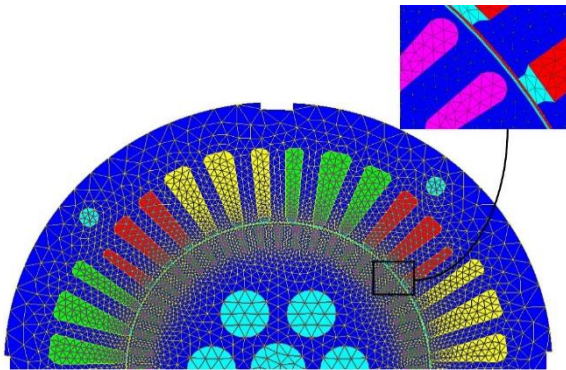
^۱ Magnetomotive force

جدول (۲): محاسبه ضریب اشغال شیار و حجم مس به کاررفته برای دو موتور القایی تک فاز و سه فاز

موتور القایی سه فاز بازسیم پیچی شده	موتور القایی تک فاز	موتور القایی
۰/۶۵	۱/۲۵	قطر سیم مسی (میلی متر)
۹۰	۹۰	متوسط مساحت هر شیار (میلی متر مربع)
۰/۴۴	۰/۳۸	ضریب اشغال شیار
۱/۴۲	۱/۹۲۵	حجم مس به کاررفته (کیلوگرم)

۵. آنالیز اجزاء محدود^۱

برای شبیه سازی موتور مورد مطالعه، از روش اجزاء محدود به صورت دوبعدی در نرم افزار فلاکس^۲ و محیط فلاکس اسکوا^۳ برای در نظر گرفتن رتور مورب شده استفاده شده است. شکل (۶) مش بندی موتور القایی طراحی شده سه فاز را نشان می دهد. مدل تحلیلی شامل ۳۱۸۴۱ گره و ۱۵۹۰۲ المان می باشد که بر قسمت های مختلف موتور اعمال شده است. باید توجه داشت که هرچه تعداد مش زیاد شود جواب مسئله دقیق تر شده اما مدت زمان آنالیز افزایش می یابد.

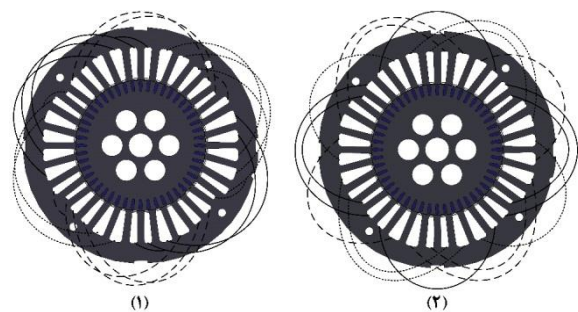


شکل (۶): مش بندی موتور القایی بازسیم پیچی شده سه فاز

توزیع خطوط شار مغناطیسی و توزیع چگالی شار مغناطیسی برای موتورهای القایی تک فاز و سه فاز سیم پیچی شده به ترتیب در شکل (۷) و (۸) نشان داده شده است. با مقایسه دو شکل می توان دریافت که چگالی شار مغناطیسی در دندانه های استاتور موتور القایی تک فاز نسبت به موتور القایی سه فاز بیشتر است. در طراحی سیم پیچی سه فاز، افزایش تعداد دور در هر فاز با در نظر

عملکرد موتور، کاهش ریپل گشتاور، میدان گردان سینوسی تر در فاصله هوایی و افزایش بازده می شود که در بخش بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین موجب حذف سیم پیچی راه انداز، خازن راه انداز و کلید گریز از مرکز می شود. برای کاهش هزینه های ناشی از ساخت اینورتر PWM که جهت تغذیه موتور می تواند استفاده شود، سیم پیچی سه فاز برای کار در ولتاژ نامی ۱۱۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز طراحی شده است.

دو طراحی پیشنهادی برای سیم پیچی سه فاز در شکل (۵) نشان داده شده است. طبق شکل (۵-۱)، سیم پیچی زنجیری به صورت شیار کسری طراحی شده است. در واقع تعداد شیارهای استاتور، ۳۰ شیار در نظر گرفته شده و در شیارهای کوچک به تعداد نصف شیار اصلی هادی قرار می گیرد. در شکل (۵-۲) نیز از آرایش هم مرکز با گام کوتاه استفاده شده است. برای سیم پیچی زنجیری، در هر شیار استاتور ۳۰ دور هادی جای می گیرد. در سیم پیچی متحدالمرکز، برای کاهش هارمونیک های میدان مغناطیسی، تعداد هادی ها در شیارها متفاوت انتخاب شده است. به طوری که در شیارهای کوچک ۱۸ دور و در دیگر شیارها ۲۰ و ۲۷ دور هادی قرار می گیرند که در مجموع ۱۳۰ دور هادی در هر فاز خواهیم داشت. جدول (۲) محاسبات مربوط به ضریب اشغال هادی مسی در هر شیار برای موتور القایی تک فاز و موتور القایی سه فاز انجام شده است. البته با توجه به نامتقارن بودن شیارهای استاتور، متوسط مساحت برای شیار در نظر گرفته شده است. ضریب اشغال شیار برای موتورهای سیم پیچی شده معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۵ است. با توجه به ضریب پایین تر از ۰/۴ برای موتور سه فاز، می توان دریافت در واقعیت این سیم پیچی قابل اجرا خواهد بود. همچنین حجم مس به کار رفته برای دو موتور القایی اندازه گیری شده است. همان طور که در جدول (۲) مشاهده می شود، حدود ۵۰۰ گرم هادی مسی کمتری در موتور سه فاز بازسیم پیچی شده به کار رفته است.

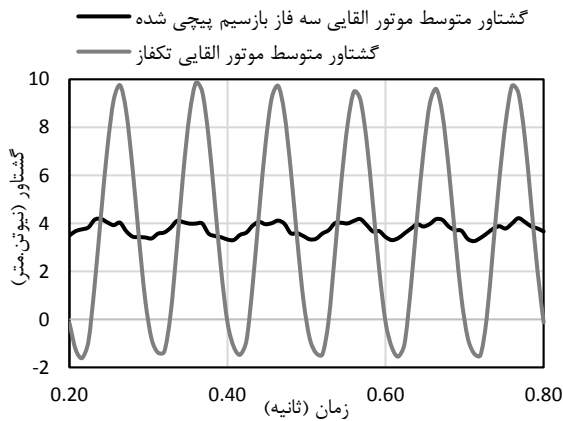


شکل (۵): ساختار سیم پیچی سه فاز (۱) زنجیری (۲) متحدالمرکز

^۱ Finite element analysis

^۲ Altair Flux

^۳ FluxSkew



شکل (۹): مقایسه گشتاور خروجی موتور القایی تکفاز و موتور القایی سه فاز بازسیم پیچی شده در بار کامل

۵-۱. محاسبه تلفات و بازده

بر اساس توزیع تلفات که در شکل (۱) مشخص شده است، تلفات سیم پیچی جدید استاتور با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$P_s = 3R_s I_1^2 \quad (4)$$

تلفات آهن (P_{fe}) از آزمایش بی باری محاسبه می شود. تلفات هادی رتور (P_r) به روش اجزاء محدود به دست می آید. اگر یاتاقان و اجزای مکانیکی تغییری نکنند، تلفات اصطکاک و بادخوری P_{fw} بدون در نظر گرفتن سیم پیچی جدید، ثابت است. پارامترهای به دست آمده از دو مدل سیم پیچی، شامل مشخصات عملکردی موتور، تلفات و بازده که با استفاده از معادله (۵) محاسبه می شود، در جدول (۳) گنجانده شده است.

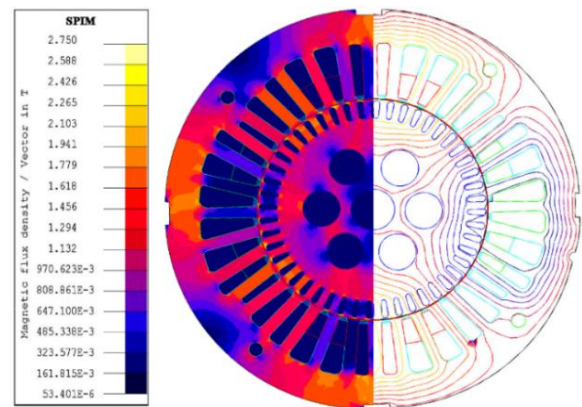
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + (P_s + P_r + P_{fe} + P_{fw})} \quad (5)$$

با مقایسه دو مدل، مشخص است که جریان نامی موتور با سیم پیچی متحدالمرکز نسبت به سیم پیچی زنجیری، کمتر است. طبق معادله (۴)، آشکار است که تلفات مسی استاتور نیز عدد کوچک تری به دست خواهد آمد. به دنبال آن جریان القا شده در هادی های رتور نیز کمتر خواهد بود و تلفات مسی رتور نیز کاهش خواهد یافت.

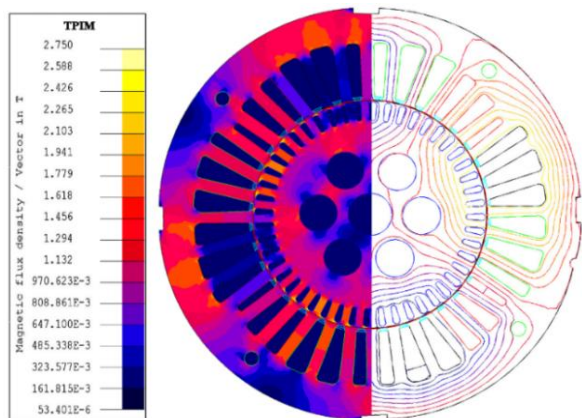
بازده در بار کامل برای موتور با سیم پیچی متحدالمرکز، حدود ۰/۹ نسبت به موتور با سیم پیچی زنجیری بیشتر است. سیم پیچی متحدالمرکز با گام کوتاه موجب کاهش سیم مسی استفاده شده، کاهش تلفات موتور و بهبود ریپل گشتاور شده است. در نتیجه سیم پیچی متحدالمرکز با گام کوتاه گزینه مناسب تری برای انتخاب خواهد بود.

گرفتن ضریب تراکم شیار استاتور، موجب کاهش شار مغناطیسی می شود. این عمل کاهش تلفات هسته، کاهش جریان در هر فاز و در نتیجه کاهش تلفات مسی استاتور را نتیجه می دهد [۱۴]. اما این اثر کاهش شار مغناطیسی باید به حدی باشد تا موجب کاهش شدید گشتاور خروجی نشود. در طراحی سیم پیچی سه فاز این نکته رعایت شده است.

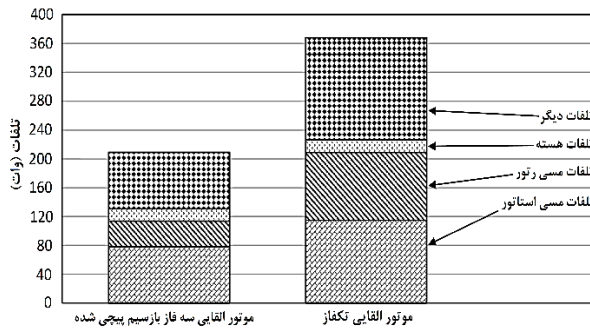
گشتاور خروجی برای موتور القایی تکفاز و موتور القایی سه فاز بازسیم پیچی شده در (شکل ۹) نشان داده شده است. متوسط گشتاور خروجی برای دو موتور در بار نامی ۳/۷۵ نیوتن متر است. در گشتاور موتور القایی تکفاز ریپل قابل ملاحظه ای مشاهده می شود. ریپل گشتاور با در نظر گرفتن رتور مورب شده، برای موتور القایی تکفاز و سه فاز به ترتیب ۰/۲۸۰٪ و ۰/۱۵٪ است.



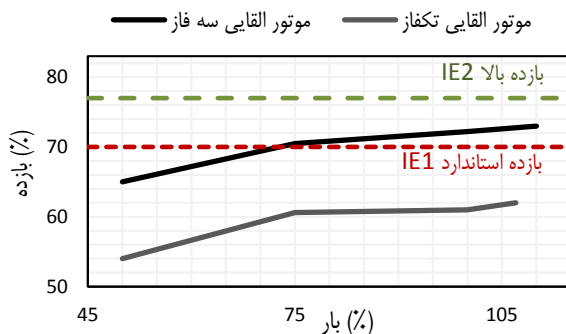
شکل (۷): توزیع خطوط شار و چگالی شار مغناطیسی موتور القایی تکفاز



شکل (۸): توزیع خطوط شار و چگالی شار مغناطیسی موتور القایی سه فاز بازسیم پیچی شده



شکل (۱۰): مقایسه تلفات موتور القای تک فاز و سه فاز



شکل (۱۱): منحنی بازده بر حسب بار

۶. تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی برای بهبود بازده موتورهای الکتریکی باید به گونه‌ای باشد تا تمام هزینه‌ها در چرخه عمر موتور، اعم از قیمت موتور، هزینه انرژی مصرفی، هزینه تعمیرات و نگهداری و ... را در نظر بگیرد. در پیاده‌سازی این روش، در مجموع با تعریف میزان صرفه‌جویی انرژی در چرخه عمر موتور، تمام دیدگاه‌ها و برنامه‌های بازده انرژی را پوشش می‌دهد [۲۲].

۶-۱. تحلیل هزینه چرخه عمر (C_{LCC})

هزینه موتور در چرخه عمر آن (C_{LCC}) خیلی برای تحلیل اقتصادی مهم است و باید واضح و روشن باشد. هزینه اصلی سرمایه‌گذاری شامل خرید، نصب و راه‌اندازی و آزمایش تجهیزات و همچنین حفاظت و کنترل وسایل (I)، هزینه انرژی برق در چرخه عمر آن (E)، هزینه‌های باقی‌مانده که با مصرف تجهیزات پس از پایان عمر مفید آن خود را نشان می‌دهند (C_{Res})، هزینه جایگزینی بخشی از تجهیزات در چرخه عمر آن (C_{Repl}) و هزینه‌های اجرایی و تعمیر و نگهداری ($C_{O\&M}$) می‌باشد [۲۳]. رابطه هزینه موتور در چرخه عمر آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{LCC} = I + E + C_{Repl} + C_{O\&M} - C_{Res} \quad (۶)$$

هزینه انرژی برق (E) تابعی از بار ($L, p.u.$)، توان نامی (P_n, kW)،

جدول (۳): پارامترهای عملکردی موتور برای دو مدل سیم‌پیچی سه فاز

مشخصه	موتور القایی سه فاز سیم‌پیچی متحدالمرکز	موتور القایی سه فاز سیم‌پیچی زنجیری
دور در دقیقه (سرعت نامی)	۱۴۳۹	۱۴۳۸
(آمپر) جریان نامی	۵/۶۵	۵/۷۸
(اهم) مقاومت هر فاز	۰/۸	۰/۸۵
(نیوتن.متر) گشتاور نامی	۳/۷۵	۳/۷۵
گشتاور نامی/گشتاور راه‌اندازی	۱/۶	۱/۶
(وات) تلفات آهن	۱۷	۱۷/۳
(وات) تلفات مسی استاتور	۷۸/۷	۸۵/۲
(وات) تلفات مسی رتور	۳۵/۵	۳۶/۴
(وات) تلفات دیگر	۸۱	۸۴
بازده (%)	۷۲/۵	۷۱/۶
ضریب توان	۰/۷۴	۰/۷

مقایسه تلفات موتور القایی تک‌فاز و موتور سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده به صورت ستونی در (شکل ۱۰) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تلفات دیگر شامل تلفات اصطکاک و بادخوری و تلفات سرگردان موتور می‌باشد. معمولاً تلفات مسی استاتور بیشترین سهم تلفات را به خود اختصاص می‌دهد. کاهش مقاومت سیم‌پیچی استاتور موجب کاهش قابل قبولی در تلفات مسی استاتور می‌شود که در موتور مورد مطالعه این تلفات حدود ۳۲٪ کاهش پیدا کرده است. تلفات رتور نیز در موتور القایی سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده نسبت به موتور القایی تک‌فاز کاهش چشمگیری داشته است. به تعبیری لغزش بالا در موتور القایی تک‌فاز رابطه مستقیمی با مقاومت رتور دارد و به دنبال آن موجب افزایش تلفات رتور شده است.

برای بازده موتورهای ولتاژ پایین، موسسه بین‌المللی IEC^۱ استاندارد IEC/EN 60034-30 را در سال ۲۰۰۸ عرضه کرد و سال ۲۰۱۴ مدل تصحیح‌شده را با عنوان IEC/EN 60034-30-1 منتشر کرد که در آن کلاس‌های مختلف بازده را برای موتورهای تعریف کرده است [۲۱]. اولین کلاس بازده تحت عنوان بازده استاندارد (IE1) می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود، موتور القایی تک‌فاز هیچ یک از استانداردهای IEC را کسب نکرده است. اما همان‌طور که انتظار می‌رفت، موتور القایی سه‌فاز سیم‌پیچی متحدالمرکز توانسته کلاس بازده استاندارد را برای توان مشخص شده کسب کند که با توجه به کیفیت نامطلوب ورق استفاده‌شده در هسته استاتور و رتور، نتیجه قابل قبولی به دست آمده است.

^۲ Life-cycle Cost

^۱ International Electrotechnical Commission

$$AES = P_n \cdot L \cdot H \cdot \left[\frac{1}{\eta_{old}} - \frac{1}{\eta_{new}} \right] \times 100 \quad (8)$$

صرفه‌جویی مالی سالانه که از رابطه (۸) به دست می‌آید، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$AES \cdot C = \text{صرفه جویی مالی سالانه} \quad (9)$$

بازگشت سرمایه در سال، برای راهبردهای مختلف صرفه‌جویی انرژی می‌تواند به صورت رابطه (۱۰) به دست آید.

$$\text{دوره بازگشت سرمایه} = \frac{\text{هزینه افزایشی}}{\text{صرفه جویی مالی سالانه}} \quad (10)$$

همان‌طور که در بخش چهارم بیان شد، ۱/۴۲ کیلوگرم مس در فرایند بازسیم‌پیچی سه‌فاز به کار رفته است. هزینه بازسیم‌پیچی با نرخ ارز آزاد حدود ۲۵\$ به دست آمد. موتور القایی تک‌فاز که بازسیم‌پیچی سه‌فاز شده، در کولرهای آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در دو سرعت تند و کند کار می‌کند. برای آنکه بتوان سرعت را در موتور سه‌فاز بازسیم‌پیچی کنترل کرد، اینورتر کنترل سرعت گزینه مناسبی خواهد بود. اینورترهای کمتر از یک کیلووات در بازار به علت داشتن ویژگی‌های اضافی و غیرضروری قیمت بالایی دارند. از آنجایی که موتور بازسیم‌پیچی شده در سطح ولتاژ ۱۱۰ ولت کار می‌کند، می‌توان یک اینورتر کنترل سرعت به روش v/f طراحی کرد که هزینه تمام‌شده آن پایین باشد. از این‌رو، در تحلیل اقتصادی هزینه ناشی از اینورتر کنترل سرعت را لحاظ کرده و به‌طور متوسط ۳۵\$ در نظر گرفته شده است، که در مجموع هزینه افزایشی ناشی از جایگزینی موتور سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده با موتور تک‌فاز ۶۰\$ به دست می‌آید. برای جایگزینی موتور القایی تک‌فاز مورد مطالعه با دو موتور القایی سه‌فاز، نیاز به اطلاعات اولیه جهت تخمین دوره بازگشت سرمایه است که در جدول (۴) موجود است. هزینه افزایشی شامل هزینه اولیه موتور و اینورتر کنترل دور می‌باشد.

جدول (۴): مشخصات موتور القایی تک‌فاز

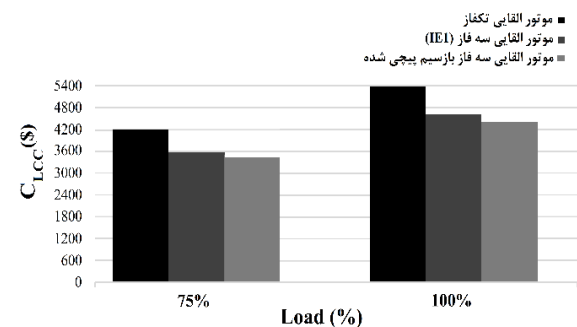
نوع موتور	سه فاز بازسیم‌پیچی شده	سه فاز (IE1)
هزینه اولیه موتور (US\$)	۲۵	۸۰
هزینه افزایشی (US\$)	۶۰	۱۱۵

صرفه‌جویی انرژی، صرفه‌جویی مالی و دوره بازگشت سرمایه با استفاده از معادلات (۵، ۶ و ۷) محاسبه شده و نتایج در جدول (۵) و (۶) ارائه شده است. افزایش بار موتور موجب افزایش صرفه‌جویی در انرژی می‌شود که این مورد کاملاً مشهود است. مشخص شد که دوره بازگشت سرمایه در موتور بازسیم‌پیچی شده در بار کامل و ۷۵٪ بار به ترتیب ۱ و ۱/۲ سال است که این دلیل قانع‌کننده‌ای مبنی بر اقتصادی بودن این روش است. از

کارکرد سالانه ($H, h/year$)، بازده متناسب با بار ($\eta, p.u.$) و تعرفه برق ($C, US\$/kwh$) می‌باشد که رابطه آن به صورت زیر خواهد بود:

$$E = \frac{P_n \cdot L \cdot C \cdot H}{\eta(L)} \quad (7)$$

با محاسبه و تخمین پارامترهای رابطه (۶)، می‌توان هزینه‌های یک موتور را در چرخه عمر آن به دست آورد. از آنجایی که در ایران به هر کیلووات ساعت برق یارانه تعلق می‌گیرد، لذا قیمت برق واقعی نیست. از این‌رو محاسبات بر اساس تعرفه برق در آمریکا که هر کیلووات ساعت آن ۰/۱۳ دلار است، در نظر گرفته شد. همچنین افزایش نرخ برق بر اساس تورم سالانه به‌طور متوسط حدود ۲٪ خواهد بود. با توجه به اینکه موتور مورد مطالعه در کولرهای آبی و در فصل گرم سال استفاده می‌شود، لذا مدت زمان کارکرد موتور به‌طور متوسط ۳۰۰۰ ساعت در نظر گرفته شده است. همچنین چرخه عمر موتورهای القایی با توان کمتر از یک کیلووات طبق مقاله [۲۴]، ۱۰ سال فرض شده است. شکل (۱۲) هزینه چرخه عمر در حالت بار کامل و ۰/۷۵ بار کامل برای موتور مورد مطالعه و موتور سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده و یک موتور القایی سه‌فاز با استاندارد IE1 از شرکت TEC را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین هزینه صرف شده برای موتور مورد مطالعه است و با اختلاف کم نسبت به موتور شرکت TEC، موتور بازسیم‌پیچی شده کمترین هزینه را طی این مدت صرف کرده است. البته باید دقت داشت موتورهای تک‌فاز بازده پایین و هزینه تعمیرات نگهداری بالاتری نسبت به موتورهای القایی سه‌فاز دارند و همین امر موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی موتور در سال می‌شود.



شکل (۱۲): مقایسه هزینه چرخه عمر سه موتور

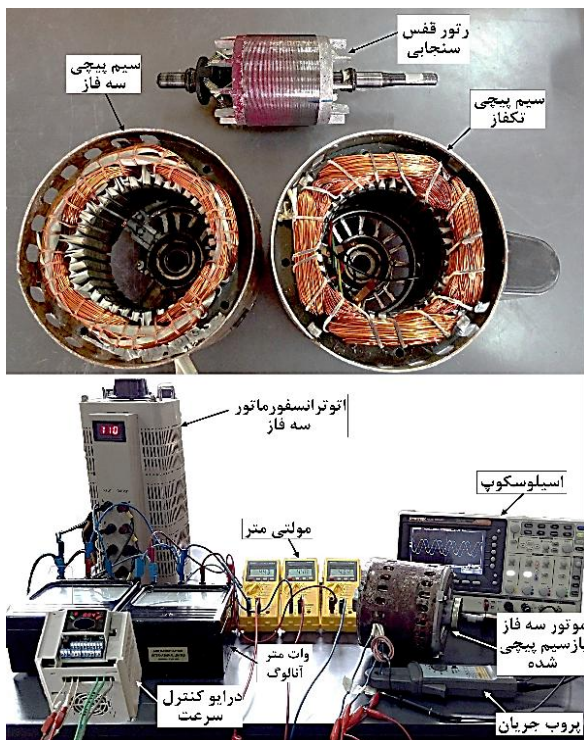
۶-۲. صرفه‌جویی سالانه انرژی^۱

صرفه‌جویی سالانه انرژی (AES) بابت جایگزینی موتور موجود با موتورهای پربازده یا جایگزینی با موتورهای بازسیم‌پیچی شده، می‌تواند از رابطه زیر به دست آید [۲۵]:

¹ Annual Energy Saving

القایی تک فاز سوخته پیاده شده که مشابه موتور القایی تک فاز سالم است. برای اندازه گیری و نمایش جریان فازها در اسیلوسکوپ، از پروب جریان استفاده شده است و در رنج ۵۰ میلی ولت بر آمپر تنظیم شده است. همچنین پروب ولتاژ در رنج ۱۰ برابر قرار داده شد.

شکل (۱۴) جریان استاتور برای موتور القایی تک فاز و سه فاز را در بی باری نشان می دهد. مقدار مؤثر جریان اندازه گیری شده برای موتور القایی تک فاز و سه فاز موتور القایی سه فاز بازسیم پیچی شده به ترتیب ۴ و ۴/۶ آمپر به دست آمده است که با خطای در حدود ۶٪ نسبت به مقدار شبیه سازی شده، دقت قابل قبولی دارد. همچنین اعوجاج هارمونیک و محتوای هارمونیک نسبت به هارمونیک پایه برای جریان فاز موتور سه فاز بازسیم پیچی شده و جریان سیم پیچی اصلی موتور القایی تک فاز در جدول (۷) خلاصه شده است. همان طور که مشاهده می شود، دامنه هارمونیک های جریان در موتور سه فاز بازسیم پیچی شده نسبت به موتور تک فاز کمتر است، به طوری که محتوای هارمونیک پنجم در موتور سه فاز حدود ۱/۶٪ نسبت به موتور تک فاز کاهش پیدا کرده است. همچنین اعوجاج هارمونیک در موتور سه فاز حدود ۴/۴٪ نسبت به موتور تک فاز کمتر شده که تأییدی بر نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در شکل (۱۴) می باشد.



شکل (۱۳): نمایی از دو موتور القایی تک فاز و سه فاز بازسیم پیچی شده و چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی

مقایسه دو جدول می توان دریافت دوره بازگشت سرمایه با افزایش بار، کاهش پیدا می کند. افزایش هزینه اولیه موتور بابت جایگزینی با موتور سابق، یکی از دلایلی است که موجب افزایش دوره بازگشت سرمایه در موتور القایی سه فاز (IE1) شده است.

جدول (۵): مقایسه صرفه جویی انرژی و مالی و دوره بازگشت سرمایه در ۷۵٪ بار

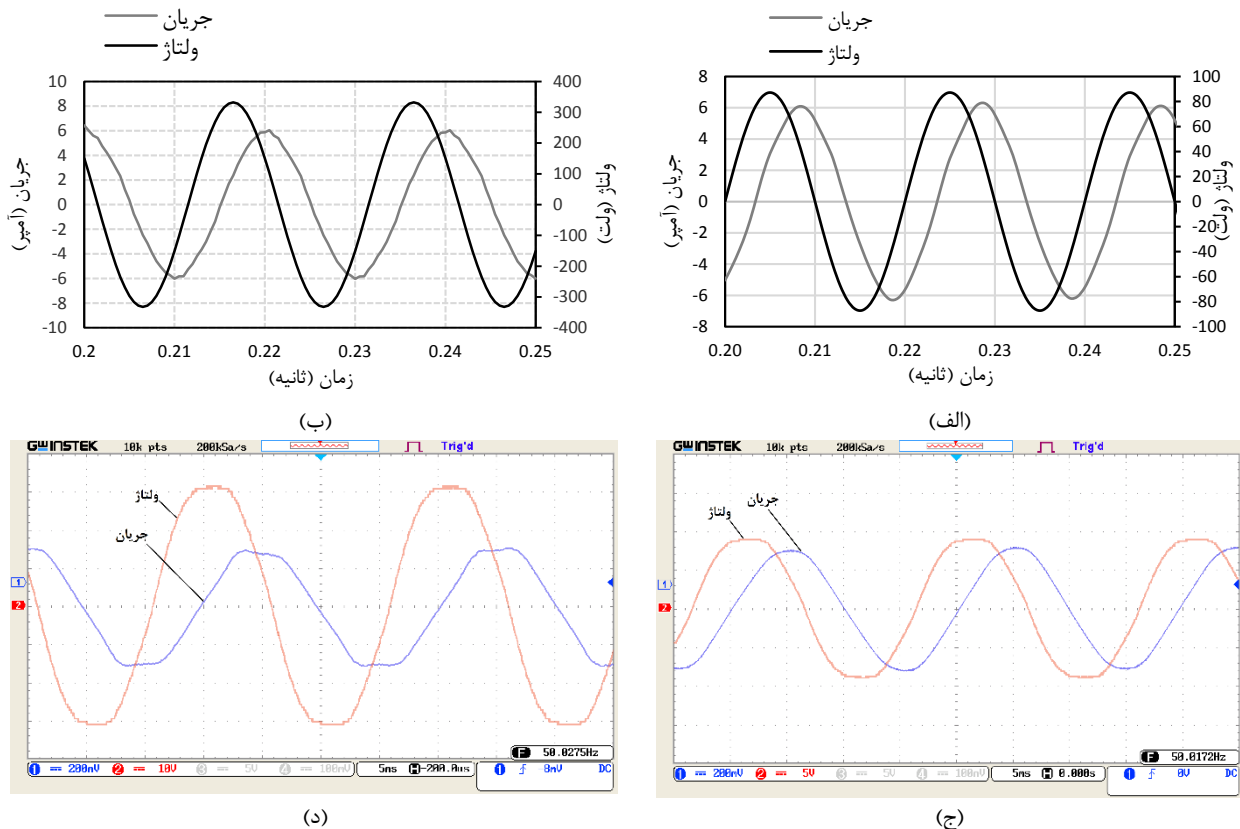
بار ۷۵٪		
۳۰۰۰ ساعت کارکرد		
دوره بازگشت سرمایه (year)	صرفه جویی مالی (US\$)	صرفه جویی انرژی (kwh/year)
۱/۲	۵۱/۷۱	۳۹۷/۷۷
۲/۴	۴۸/۴۱	۳۷۲/۴۱

جدول (۶): مقایسه صرفه جویی انرژی و مالی و دوره بازگشت سرمایه در بار کامل

بار ۱۰۰٪		
۳۰۰۰ ساعت کارکرد		
دوره بازگشت سرمایه (year)	صرفه جویی مالی (US\$)	صرفه جویی انرژی (kwh/year)
۱	۶۰/۶۷	۴۶۶/۶۷
۲	۵۶/۳۹	۴۳۳/۸

۷. نتایج آزمایشگاهی

پس از بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی، در این بخش با ترتیب دادن یک مجموعه آزمایشگاهی، جریان های دریافتی توسط موتور در حالت بی باری اندازه گیری شده و با مقادیر متناظر حاصل از شبیه سازی مقایسه می گردد. مقدار مؤثر جریان شبیه سازی شده برای موتور القایی تک فاز و موتور القایی سه فاز به ترتیب حدود ۴ و ۴/۳ آمپر می باشد. نمایی از سیم پیچی موتور القایی تک فاز و سیم پیچی سه فاز اجرا شده و چیدمان آزمایشگاهی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. سیم پیچی سه فاز روی استاتوری از موتور



شکل (۱۴): شکل موج‌های جریان و ولتاژ دو موتور در حالت بی باری (الف) نتایج شبیه‌سازی شده برای موتور القایی تک‌فاز (ب) نتایج شبیه‌سازی شده برای موتور القایی سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده (ج) نتایج اندازه‌گیری شده برای موتور القایی تک‌فاز (د) نتایج اندازه‌گیری شده برای موتور القایی سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده

جدول (۷): مقایسه اعوجاج هارمونیک و نسبت مؤلفه‌های هارمونیک به هارمونیک اصلی برای جریان دو موتور القایی تک‌فاز و سه‌فاز

اعوجاج هارمونیک (%)	مرتب‌ه هارمونیک (%)									جریان فاز
	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۵/۶۴	۰/۴۳	۰/۲۸	۱/۵۱	۰/۳۲	۳/۹۹	۰/۳۹	۲/۴۶	۲/۴۷	۱۰۰	سیم‌پیچی اصلی (تک‌فاز)
۱/۳	۰/۴۵	۰/۱۶	۰/۵	۰/۲۳	۲/۴	۰/۲	۱/۳	۱/۶	۱۰۰	سیم‌پیچی فاز a (سه‌فاز)

۸. نتیجه‌گیری

موتور سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده حدود ۵۰۰ گرم نسبت به موتور تک‌فاز کاهش پیدا کرده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بازسیم‌پیچی موتور کم‌بازده، مقرون‌به‌صرفه‌تر از خرید و جایگزینی با موتوری در همان کلاس بازده IE1 است که در تحلیل اقتصادی دوره بازگشت سرمایه بر اساس قیمت واقعی برق حدود یک سال به‌دست آمد. جهت راستی‌آزمایی، نتایج آزمایشگاهی نیز با نتایج شبیه‌سازی مقایسه و بررسی شده و خطای ناشی از اندازه‌گیری حدود ۶٪ مشاهده شد که صحت نتایج شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. همچنین اعوجاج هارمونیک جریان برای موتور القایی تک‌فاز و سه‌فاز بازسیم‌پیچی شده به ترتیب ۵/۶۴٪ و ۱/۳٪ به‌دست آمده است.

توجیه فنی و اقتصادی برای جایگزینی موتورهای توان پایین با موتورهای بازسیم‌پیچی شده در این مقاله ارائه شده است. این مقاله جایگزینی موتور کم‌بازده را با موتور بازسیم‌پیچی شده در کلاس استاندارد IE1 مقایسه کرده است. در نتایج شبیه‌سازی با مقایسه دو سیم‌پیچی پیشنهادی، بهترین عملکرد برای موتور با سیم‌پیچی متحدالمرکز و بازده ۷۲/۵٪ به‌دست آمد. بازده موتور بازسیم‌پیچی شده حدود ۱۲/۵٪ نسبت به موتور القایی تک‌فاز بهبود پیدا کرده و مشمول استاندارد IE1 شده است. کاهش چشمگیر گشتاور ضربانی و بهبود ضریب توان نیز از دیگر نتایج موتور بازسیم‌پیچی شده است. همچنین حجم مس به‌کاررفته در

۸. مراجع

- [13] C. Wenping and K. J. Bradley, "Assessing the impacts of rewind and repeated rewinds on induction motors: is an opportunity for Re-designing the machine being wasted?," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 4, pp. 958-964, 2006/07 2006.
- [14] F. J. Ferreira and A. T. De Almeida, "Induction motor downsizing as a low-cost strategy to save energy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 24, pp. 117-131, 2012.
- [15] N. Bianchi, S. Bolognani, M. D. Pre, and G. Grezzani, "Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 42 ,no. 4, pp. 997-1006, 2006.
- [16] K. Komezha and M. Dems, "Finite-element and analytical calculations of no-load core losses in energy-saving induction motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 2934-2946, 2012.
- [17] D. D'Aguzzo, F. Marignetti, and F. Fagnoli, "Single-Phase Motors for Household Applications," in *Electric Machines for Smart Grids Applications-Design, Simulation and Control*: IntechOpen, 2018.
- [18] D. P. Kothari and I. Nagrath, *Electric machines*. Tata McGraw-Hill Education, 2004.
- [19] T.-H. Liu, "A maximum torque control with a controlled capacitor for a single-phase induction motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, no. 1, pp. 17-24, 1995.
- [20] C. Mademlis, I. Kioskeridis, and T. Theodoulidis, "Optimization of single-phase induction Motors-part I: maximum energy efficiency control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 187-195, 2005.
- [21] A. T. De Almeida, F. J. Ferreira, and J. A. Fong, "Standards for efficiency of electric motors," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 12-19, 2011.
- [22] S. K. Fuller and S. R. Petersen, "Life-cycle costing manual for the Federal Energy Management Program. 1995 edition. Handbook," 1996.
- [23] C. T. de Castro Andrade and R. S. T. Pontes, "Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors," *Energy Policy*, vol. 106, pp. 315-325, 2017.
- [24] J. C. Andreas, "Energy-efficient electric motors: selection and application," 1982.
- [25] M. G. Kahrisangi, A. H. Isfahani, S. Vaez-Zadeh, and M. R. Sebdani, "Line-start permanent magnet synchronous motors versus induction motors: A comparative study," *Frontiers of electrical and electronic Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 459-466, 2012.
- [1] F. J. Ferreira, B. Leprettre, and A. T. De Almeida, "Comparison of protection requirements in IE2-, IE3-, and IE4-class motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 4, pp. 3603-3610, 2016.
- [2] X. Wang, H. Zhong, Y. Yang, and X. Mu, "Study of a novel energy efficient single-phase induction motor with three series-connected windings and two capacitors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 433-440, 2010.
- [3] S. Vaez-Zadeh and H. Langari, "High average-low pulsating torque operation of single phase induction motors," in *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, 2000, vol. 3, pp. 1513-1518: IEEE.
- [4] M. Dems, K. Komezha, and H. G. Rodríguez, "Methods for increasing the efficiency of an asynchronous motor with increased speed fed from the PWM inverter," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, no. Preprint, pp. 1-11, 2018.
- [5] J. C. Hirzel, "Impact of rewinding on motor efficiency," in *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1994., Conference Record of 1994 Annual*, 1994, pp. 104-107: IEEE.
- [6] M. Dems and K. Komezha, "The influence of electrical sheet on the core losses at no-load and full-load of small power induction motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2433-2442, 2017.
- [7] D. C. Montgomery, "The motor rewind issue-a new look," *IEEE transactions on Industry Applications*, no. 5, pp. 1330-1336, 1984.
- [8] S. S. OFA, "United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment," 2002.
- [9] H. Penrose and B. Bauer, "Time savings and energy efficiency through alternate electric motor rewind methods," in *Proceedings: Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1995*, pp. 457-460: IEEE.
- [10] H. W. Penrose, "Anatomy of an energy efficient electric motor rewind," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 13, no. 1, pp. 14-19, 1997.
- [11] V. Aguiar, R. Pontes, and F. Ferreira, "Technical and Economic Evaluation of Efficiency Improvement after Rewinding in Low-Power Induction Motors: A Brazilian Case," *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1701, 2018.
- [12] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "Simple and Accurate Algorithm for Small-and Medium-Sized Three-Phase IM Efficiency Estimation Based on No-Load Tests," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 5812-5821, 2018.

Technical and Economical Assessment of the Efficiency Improvement of Induction Motors after Rewinding

H. R. Akbari¹, S. M. Mirimani^{2*}, J. Adabi Firouzjaee³

Electrical and Computer Engineering Department, Babol Noshirvani

University of Technology, Babol, Iran

(Received: 26/08/2019; Accepted: 26/11/2019)

Abstract

Increasing the motor efficiency has a significant effect on the energy consumption. By calculating the annual energy consumption of a motor, the effect of increasing the efficiency on energy savings can be estimated. One of the most effective and inexpensive ways to increase the energy efficiency is rewinding or redesigning the stator winding. Reducing energy consumption and the cost savings obtained by rewinding motors can attract the investors' attention. In this paper, a single-phase induction motor with 0.75 horsepower, has been rewound for three-phase operation, and electromagnetic analysis has been performed using the finite element method by the Flux software and its operation characteristics have been analyzed. Economic analysis has been carried out by calculating operating costs, payback period and annual energy savings. According to the results, the efficiency of the three-phase rewinded motor compared with the single-phase induction motor, has increased by about 12.5%, and the payback period based on 13 cents per kilowatt-hour is approximately one year. Based on this comparison, replacing a single-phase induction motor with a three-phase rewinded motor in the standard efficiency (IE1) is more economical than replacing it with a motor in this class of efficiency and the achieved cost saving, in full load is about 61\$. For validation, the experimental results were compared with the simulation results and a measurement error of about 6% was observed.

Keywords: Energy Saving, Efficiency, Rewinding

* Corresponding author E-mail: mehdimirimani@gmail.com