Estimating stray load losses methods in induction machines

Ali Yazdani Baghmaleki [1,*]

[1] Department of Electrical Engineering, Shahed University of Tehran, Tehran, Tehran, Iran
E-mails: AliYazdani7799@gmail.com
* Corresponding Author

Abstract
Nowadays, with the increase in the cost of electric energy and on the other hand, the shortage of reserves and sources of energy supply, it is tried to design energy consuming systems in a way that their cost is optimized as much as possible. One of the methods that can lead to energy saving and optimization is the proper selection of high-efficiency consumer equipment and devices. In most countries, industries consume most of the electricity produced, and their electricity consumption is mainly done by electric motors. In recent years, new regulations on the efficiency of electric motors have been introduced around the world. One of the ways to reduce the energy consumption of motors is to lead the industry to use more efficient motors with higher efficiency. The correct determination of the total losses in the induction motor has an important contribution to the more accurate estimation of the efficiency of the induction motor, and by removing low-efficiency motors from the workplace cycle, costs and energy waste are greatly reduced. Stray load losses are the most unknown element in the power balance of induction machines, and since these losses are of great importance in determining the efficiency of the induction motor, in this report, all available methods for determining stray load losses are briefly introduced and discussed.

Keywords
Motor load losses‹Induction motor‹Harmonic.

روش های برآورد تلفات بار سرگردان در ماشین های القایی

علی یزدانی باغملکی[۱]
گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد تهران، تهران، ایران
ایمیل نویسندگان: AliYazdani7799@gmail.com

چکیده

امروزه با افزایش هزینه انرژی الکتریکی و از طرفی کمبود ذخایر و منابع تامین انرژی، سعی بر این است که حتی الامکان سیستم های مصرف کننده انرژی را به نوعی طراحی نمود که هزینه آنها بهینه گردد. یکی از روش هایی که می تواند منجر به صرفه جویی و بهینه سازی انرژی گردد، انتخاب مناسب تجهیزات و وسایل مصرف کننده با راندمان بالا می باشد. در اغلب کشورها، صنایع قسمت عمده برق تولیدی را مصرف می کنند و مصرف برق آنها نیز عمدتا توسط موتور های الکتریکی صورت می پذیرد. در سال های اخیر، مقررات جدیدی در مورد بهره وری از موتورهای الکتریکی در سراسر جهان معرفی شده است یکی از راه های کاهش در مصرف انرژی موتورها ، هدایت صنعت به استفاده از موتورهای کارآمدتر و با راندمان بالاتر است. تعیین صحیح تلفات کل در موتور القایی سهم مهمی در بیشتر شدن تخمین دقیق راندمان موتور القایی دارد و با حذف موتورهای کم بازده از چرخه محل کار ، هزینه ها و اتلاف انرژی تا حد زیادی کاهش می یابد. تلفات بار سرگردان ناشناخته ترین عنصر در تعادل قدرت ماشین های القایی هستند و از آنجایی که این تلفات اهمیت زیادی در تعیین بازده موتور القایی دارند ، در این گزارش، تمام روش های موجود برای تعیین تلفات بار سرگردان به طور خلاصه معرفی و مورد بحث قرار می گیرند.

کلمات کلیدی: تلفات بار،موتور القایی،هارمونیک

نام نویسنده مسئول: علی یزدانی باغملکی
ایمیل نویسنده مسئول: AliYazdani7799@gmail.com

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰
تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱

۱- مقدمه

بحران انرژی از مشکلات اساسی جهان امروز است . اکنون بشر نه تنها به خاطر هزینه بالا به دنبال صرفه جویی در مصرف انرژی است ، بلکه از نظر حفاظت از محیط زیست هم باید در کاهش مصرف انرژی بکوشد . برای این منظور در جستجوی روش هایی است که از نظر اقتصادی به صرفه باشند و سبب کاهش هزینه ها و کاهش آلودگی محیط زیست گردند. از نقطه تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه ها ، تا انتقال و توزیع آن ، مقداری از انرژی اولیه تلف می شود . در این بخشها سعی بر آن است که با طراحی و بهره برداری بهینه سیستم های تولید، انتقال و توزیع از میزان تلفات انرژی کاسته شود . اما حوزۀ مورد مطالعه در این گزارش مربوط به بعد از این بخش ها، یعنی نقطه نهایی مصرف می باشد [1-4].

در حال حاضر اکثر انرژی مصرفی در سطح جهان از منابع تجدید ناپذیر سوختهای فسیلی تامین می شود . این سوختها دارای قیمت بالا همراه با نوسان زیاد باشد . از سوی دیگر با افزایش جمعیت جهان و گسترش صنعت و فن آوری و استفاده روز افزون از ماشینها ، بشر با مشکلات زیست محیطی عدیده ناشی از مصرف بی رویه انرژی مواجه شده است . از اینرو صرفه جویی هر چه بیشتر در مصرف انرژی در دنیای امروز ضروری است [5-7].

۱-۱- اهمیت موضوع از دیدگاه منابع انرژی و محیط زیست

امروزه یکی از بزرگترین نگرانی های بشر این است که منابع اولیه انرژی به زودی پایان خواهد پذیرفت ؛ علاوه بر آن ، سالهای سال مصرف سوختهای فسیلی باعث اثرات زیانبار زیست محیطی گردیده است تا جایی که مدتهاست حتی نفس کشیدن هم برای بشر مشکل شده و روز به روز بدتر می شود . گرم شدن جو، ذوب شدن یخهای قطب ، بارش بارانهای اسیدی ، افزایش بیماریها و مرگ و میر ناشی از غلظت آلاینده ها و بسیاری از عوامل دیگر ، به خاطر مصرف بیش از اندازۀ سوختهای فسیلی در این سالها بوده است. یکی از راههایی که می تواند حداقل از سرعت سرسام آور کاهش ذخایر انرژی و افزایش روز افزون آلودگی محیط زیست بکاهد، استفاده بهینه از انرژی می باشد [8-10].

تولید وتهیه انرژی الکتریکی برای صنعت برق بسیار گران تمام می شود. از طرف دیگر با ورود صنایع جدید ، تقاضا برای انرژی بیشتر می گردد و صنعت برق را وادار به احداث نیروگاههای جدید می نماید . بنابراین صرفه جویی هر واحد انرژی الکتریکی هم در کوتاه مدت و هم در بلند مدت می تواند باعث کاهش هزینه های صنعت برق گردد.

۱-۲- تعریف تلفات موتور

در موتور ایده آل ، توان ورودی کاملاً مساوی با کار انجام شده یا توان خروجی است اما موتورهای واقعی مقداری از توان ورودی را تلف می کنند. در واقع تلفات قسمتی از توان دریافتی موتور است که به کار یا توان خروجی تبدیل نمی شود بنابراین تلفات موتور عبارت است از توان ورودی منهای توان خروجی [11-15].

۱-۳- تعریف راندمان

راندمان موتور ، حاصل نسبت خروجی مکانیکی موتور (توان ظاهر شده بر روی محور موتور) به ورودی الکتریکی آن می باشد. استانداردهای

متعدد و متفاوتی جهت آزمایش و تعیین بازدهی موتورهای القائی،توسط ارگانها و متخصصین کشورهای مختلف پیشنهاد شده اند.روش معمول برای آزمایش کارآیی و یا تعیین راندمان بار کامل یک موتورالقایی سه فاز، اعمال گشتاور بار کامل بر روی محور خروجی ماشین و محاسبه نسبت توان مکانیکی خروجی به توان الکتریکی ورودی است و معمولاً به درصد بیان می شود:

$$\eta \text{ راندمان } (\%) = \frac{Pin}{Pout} * ۱۰۰$$

در نگاه اول به این رابطه ، ممکن است بدست آوردن راندمان کار ساده ای به نظر برسد و گفته شود که فقط با اندازه گیری توان مکانیکی خروجی و بدست آوردن ورودی الکتریکی یک واتمتر ، میتوان مقادیر بدست آمده را در رابطه فوق قرار داده و راندمان را به سادگی بدست آورد. اما متاسفانه موارد فوق ،به ویژه تعیین خروجی مکانیکی، کارهای ساده و سرراستی نیستند. مخصوصا اندازه گیری تقریبی توان خروجی به خاطر ماهیت مکانیکی ، دشوار ، پیچیده ، دارای محاسبات متنوع می باشد. در حقیقت تعیین مستقیم راندمان موتور با استفاده از رابطهٔ قبل کار سختی خواهد بود . بنابراین به جای محاسبه نسبت خروجی به ورودی، اندازه گیری مستقیم تلفات انجام شده و سپس تلفات از توان ورودی کسر و با تقسیم باقیمانده بر توان ورودی راندمان محاسبه شود:

$$\eta \text{ راندمان } (\%) = \frac{Pin-Ploss}{Pin} * ۱۰۰$$

پس با بدست آوردن توان ورودی و تلفات می توان راندمان را به روش غیر مستقیم تعین نمود. هر چند که تعیین تلفات هم کار آسانی نیست .

ضرورت تعیین راندمان

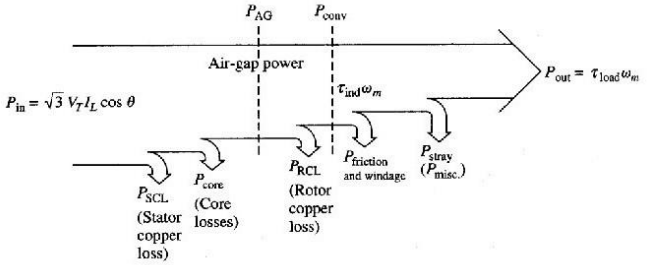
با تمام مشکلاتی که بر سر راه تعیین راندمان موتور الکتریکی وجود دارد، ممکن است گفته شود چه لزومی دارد که راندمان موتور تعیین شود؟ مگر بدون تعیین راندمان ، امکان بهینه سازی انرژی وجود ندارد ؟ در پاسخ باید گفت راندمان یا بازده ، درست مانند ملاک ، معیار، پیمانه، ترازو و یا ابزار سنجش برای تصمیم گیری در هر پروژه بهینه سازی است تا به وسیلهٔ آن بتوان تحلیلی از وضعیت موجود داشت و سپس میزان بهبودی و صرفه جویی انرژی قابل دستیابی از طریق طرح های جدید را برآورد نمود.

۲- ساختمان موتور القایی

ساختمان موتور القایی از دو جزء اصلی استاتور و رتور تشکیل گردیده است . هستهٔ استاتور از یک ساختار ورقه ورقه فولادی تشکیل می شود. سطح داخلی استاتور حاوی شیارهایی است که سیم پیچی سه فاز درون آن جاسازی می شود. هستهٔ رتور نیز از یک ساختار ورقه ورقه فولادی سوار شده بر روی یک محور، هادیها یا میله های قفس سنجابی و معمولاً یک فن تشکیل می شود.

شکل ۱. ساختار یک موتور القایی

۲-۱ انواع تلفات در موتورهای القایی



شکل ۲. انواع تلفات در موتورهای القایی

تلفات توان در موتورهای القایی می تواند به دو دستهٔ اصلی تقسیم شود:

الف) تلفات ثابت

ب) تلفات متغیر

هر کدام از این دو دسته تلفات شامل چندین جزء مختلف هستند که در ادامه آن ها را بیان می کنیم.

الف) تلفات ثابت

فرض می شود که تلفات ثابت در تمام شرایط بارگذاری موتور ، از بی باری تا بار کامل ، ثابت باشد. این فرض ، به طور کامل درست نیست اما تقریباً اینگونه است و با این تقریب ، خطای ناچیزی به وجود می آید. تلفات ثابت شامل تلفات هسته و تلفات مکانیکی (تلفات اصطکاک و باد) می باشند.

۱) تلفات هسته

تولید میدان مغناطیسی گردان در موتور القایی ، موجب می شود تا آرمیچر بچرخد. هنگامی که مولکول های فولاد، به وسیله جریان متناوب، در یک جهت مغناطیس می شوند، تلفات انرژی در فولاد به وجود می آید . این تلفات به صورت گرما ظاهر می شود و به ((تلفات هیسترزیس)) موسوم است . تلفات هیسترزیس با افزایش چگالی شار مغناطیسی (ناشی از افزایش جریان) و همچنین با افزایش فرکانس منبع ، افزایش می یابد.

همچنین میدان مغناطیسی متناوب ، ولتاژهای کوچکی در هسته فولادی ایجاد می کند که موجب گردش جریانهای تصادفی در فولاد می گردد. این جریان ها که موسوم به جریانهای گردابی هستند باعث ایجاد تلفات توان می شوند که به صورت گرما ظاهر می شود و به ((تلفات جریان گردابی یا فوکو)) موسوم است . تلفات فوکو نیز با افزایش چگالی شار و فرکانس افزایش می یابد . تلفات هیسترزیس و تلفات فوکو ، معمولاً تحت عبارت ((تلفات آهنی)) یا ((تلفات هسته)) با یکدیگر ادغام می شوند.

تلفات هسته با تغییر جریان بارگذاری ، تغییرات سرعت و سایر شرایط عملکرد موتور تغییر می کند . ولی استانداردهای تعیین تلفات ، فرض می کنند که تلفات هسته در تمام رنج بارگذاری موتور، ثابت است و نادرستی نتایج این فرض به حساب تلفات بار سرگردان گذاشته می شود.

۲) تلفات مکانیکی

مقداری از انرژی دریافتی توسط موتور ، برای غلبه بر اصطکاک بلبرینگ ها و اصطکاک بخش‌های متحرک (مخصوصاً پره های فن) با هوا ، مصرف می شود. این تلفات ، موسوم به ((تلفات مکانیکی)) هستند و فرض می شود که از بی باری تا بار کامل ، ثابت باشند و در اینجا نیز هرگونه عدم صحت ناشی از این فرض ، به حساب تلفات بار سرگردان گذاشته می شود.

ب) تلفات متغیر

تلفات متغیر ، متناسب با بار گذاری روی موتور افزایش می یابد و تقریباً متناسب با مربع جریان بارگذاری موتور می باشد. این تلفات ، در درجهٔ اول شامل تلفات اهمی در سیم پیچی‌های استاتور و رتور و در درجهٔ دوم شامل تلفات بار سرگردان می باشد.

۱) تلفات سیم پیچی

ولتاژ اعمالی به موتور ، جریان را در سیم پیچی های موتور جاری می سازد. در موتور القایی سه فاز ، ولتاژ مستقیماً به استاتور یا سیم پیچی اولیه اعمال می شود و جریان القایی در رتور یا سیم پیچی ثانویه جاری می گردد. سیم پیچی ثانویه یک موتور قفس سنجابی از میله های مسی یا آلومینیومی تشکیل می شود که درون شیارهای رتور قرار گرفته اند و از دو سمت توسط حلقه های انتهایی به هم متصل گردیده اند . به هر صورت ، به علت عبور جریان از سیم پیچی ها مقداری از الکتریسیته به صورت گرما در مقاومت های استاتور و رتور تلف می شود. این تلفات به ((تلفات سیم پیچی یا تلفات اهمی)) موسوم می باشد و فرض می شود که با مربع جریان بار گذاری تغییر کند. این فرض بطور کامل درست نیست زیرا مقدار مقاومت موثر سیم پیچی ها ثابت نبوده و به دما ، بار ، اثر پوستی جریان متناوب ، اثرات مغناطیسی ، تقسیم نامساوی جریان در میان هادیها و عوامل مشابه بستگی دارد . خطای ناشی از این فرض نیز به حساب تلفات بار سرگردان گذاشته می شود.

۲) تلفات بار سرگردان

همانطور که در قسمت های قبل گفته شد ، فرض می شود که چندین نمونه از تلفات، در تمام رنج بارداری موتور ، ثابت باشند ولی آنها عملاً تا اندازه ای با بار تغییر می کنند . جریان هادی ها ، به خاطر تأثیر پوستی و هندسهٔ هادی، تا اندازه ای به طور نامساوی تقسیم خواهد شد . همچنین، همانطور که جریان افزایش می یابد ،دمای هادی نیز افزایش خواهد یافت که باعث افزایش مقاومت هادی و بنابراین افزایش تلفات هادی خواهد شد. علاوه بر این ، از آنجایی که شار مغناطیسی با جریان بار گذاری افزایش می یابد ، تلفات هسته نیز زیاد می شود . تمام این تلفات جزئی از هر دو منبع شناخته شده و ناشناخته ، با یکدیگر از قماش دانسته می شوند. این تلفات با عنوان ((تلفات بار سرگردان)) نامگذاری می شوند. در فصل بعد به طور کامل به این تلفات می پردازیم و روش های تعیین این تلفات را معرفی کرده و با یکدیگر مقایسه می کنیم.

۲-۳- تعریف تلفات بار سرگردان

تفاوت بین تلفات کل توان در موتور القایی در شرایط بار و تلفات تعیین شده با روش تلفات تفکیک شده به عنوان تلفات بار سرگردان (Stray Load Losses) در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر تلفات بار سرگردان به منابع تلفات ماشین القایی اشاره دارد که در محاسبات معمولی تلفات مسی استاتور و روتور، تلفات هسته و یا تلفات اصطکاک و باد محاسبه نمی شود.

همانطور که گفته شد از میان تلفات ماشین القایی ، کمترین تحلیل در مورد تلفات بار سرگردان (SLL) انجام شده است و با توجه به مقدار معنی دار آن ، برآورد این تلفات نقش بسزایی در تعیین هرچه دقیق تر راندمان ماشین های الکتریکی القایی دارد

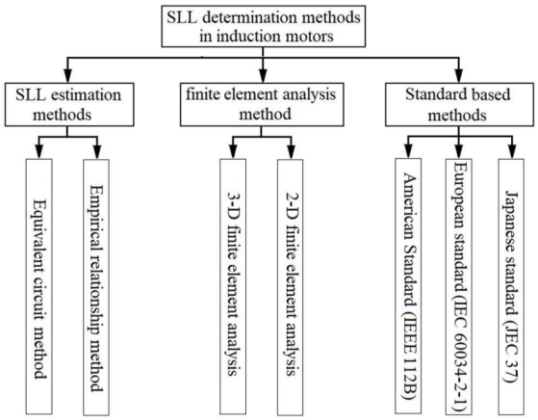
منشأ فیزیکی

با توجه به مطالعاتی که تاکنون انجام شده است ، به طور کلی موارد زیر منشأ فیزیکی SLL در موتور القایی می باشد :

- شکاف های استاتور و روتور که باعث تلفات جریان گردابی در مس استاتور و روتور به دلیل شار نشتی شکاف می شوند.
- تلفات در انتهای سازه به دلیل شار نشتی در انتها.
- محدودیت های خواص مغناطیسی مواد آهن در استاتور و روتور که منجر به اشباع تحت بار می شود.
- هارمونیک زمانی که موتور توسط یک درایو با مبدل تغذیه می شود.

۳- روش های برآورد

با توجه به مطالعات انجام شده در مورد تلفات بار سرگردان ، روش های تعیین آن در موتور های القایی را می توان به طورکلی به چهار دسته طبقه بندی کرد. هر کدام از این روش ها فرآیند خاصی را ارائه می دهند و دارای درجات مختلف دقت است که در ادامه به بررسی آن ها می پردازیم.



شکل ۳. روش های برآورد

۳-۱ تعیین SLL با استفاده از استانداردها

در استانداردهای مختلف، فرآیند اندازه گیری و مقدار توصیه شده برای SLL در موتورهای القایی متفاوت است ، مهمترین استانداردهای تعیین SLLموتورهای القایی عبارت اند از :

- استاندارد آمریکایی (IEEE 112B)
- استاندارد اروپا (IEC 60034-2-1)
- استاندارد ژاپنی (JEC 37)

در استاندارد IEEE 112B ، اگر اندازه گیری نباشد ممکن است، مقدار SLL یک درصد ثابت از توان نامی موتور در نظر گرفته شود

مطابق استانداردها، فوق مقادیر SLL در استاندارد IEEE 112B برحسب قدرت نامی موتور بدست می آید. اما برخلاف استاندارد IEEE 112B، استاندارد IEC 60034-2-1 مقدار SLL را ۰.۵٪ از قدرت نامی موتور در نظر می گیرد و این درصد برای رنج های مختلف توان نامی موتور یکسان است و در استاندارد ژاپنی JEC 37 ، مقدار SLL صفر در نظر گرفته می شود.

لازم به ذکر است که در روش های فوق اثر شرایط عملیاتی در SLL در نظر گرفته نمی شود و تفاوت در مقدار SLL در استانداردهای مختلف باعث شده

است که مقدار بدست آمده برای راندمان موتور القایی توسط استانداردهای مختلف متفاوت باشند نتایج حاصل از مقایسه های انجام شده نشان می دهد که استاندارد IEEE 112B دقت بیشتری نسبت به سایر استانداردها دارد و مرجع مناسب تری برای تعیین SLL نسبت به دیگر استاندارد ها است.

۴- روش تحلیل اجزاء محدود 2D و 3D

علاوه بر استانداردهای موجود ، محققان مدل هایی نیز با استفاده از تحلیل المان محدود برای تعیین SLL معرفی کرده اند. در روش تحلیل اجزاء محدود دو بعدی و سه بعدی، با وارد کردن کلیه اطلاعات موتور در نرم افزار مربوطه و ایجاد مدل های دو بعدی یا سه بعدی، مقادیر SLL و تلفات هسته محاسبه می شود.

طبق مقایسه های انجام شده مقادیر به دست آمده است برای SLL در روش تحلیل اجزاء محدود با روش استاندارد IEEE 112B تقریباً یکسان است.

یکی از موانع اصلی در استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل اجزاء محدود برای تعیین SLL در موتور از قبل نصب شده، عدم دسترسی به اطلاعات مواد و جزئیات هندسی موتور است. بنابراین، تجزیه و تحلیل اجزای محدود برای تعیین SLL موتورهای القایی در حال کار قابل اجرا نیست.

۴-۱- روش روابط تجربی

در این روش آزمایشاتی بر روی یک تعداد زیادی موتورهای القایی با توان و کاربرد متفاوت انجام شده است و نتایج حاصل از این آزمایشات، روابط تجربی است که برای تعیین SLL به دست آمده است. در یکی از موارد با انجام آزمایش های گسترده بر روی ۱۸۲ موتورهای القایی با توان های مختلف، فرمولی برای تعیین SLL پیشنهاد شده است که از تخمین SLL نسبت به روش های مبتنی بر استاندارد دقیق تر است :

$$P_{SLL} = 0.011 P_{in}$$

یکی از اشکالات تعیین SLL با استفاده از رابطه این است که مقدار SLL تنها وابسته به توان ورودی است، در حالی که SLL به اندازه موتور و ترکیب شیار-قطب نیز بستگی دارد. در یکی دیگر از مطالعات انجام شده برای تخمین بازده موتور القایی، از روش گشتاور فاصله هوایی استفاده شده است و یک رابطه تجربی جدید برای محاسبه SLL استفاده شده است :

$$P_{SLL} = P_{in} \times \left[0.025 - 0.005 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{1KW} \right) \right]$$

Pout توان نامی خروجی است و Pin توان ورودی نامی است.

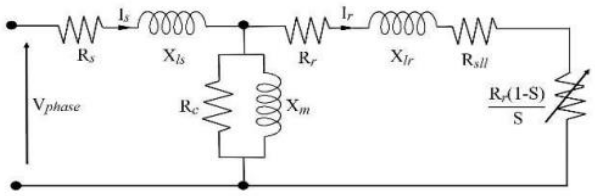
یکی از محدودیت های اصلی استفاده از روش روابط تجربی این است که نمی توان آنها را برای موتورهایی با توان مشابه اما ساختارهای هندسی متفاوت استفاده کرد، چراکه دو موتور با توان خروجی یکسانی اما ساختار هندسی متفاوت ، شار نشتی آنها متفاوتی دارند که این منجر به مقادیر مختلف برای SLL می شود در حالی که استفاده از روابط فوق ما را به مقادیر یکسان برای تلفات بار سرگردان این دو موتور می رساند.

۴-۲- روش مدار معادل

در سال های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه های مختلف تعیین پارامترهای مدار معادل موتور القایی و افزایش دقت این روش ها برای تعیین SLL انجام شده است. هنگامی که تعیین SLL برای تخمین راندمان موتور تحت بارهای اندازه گیری نشده مورد نیاز است ، استفاده از روش مدار معادل بسیار مفید است.

همانطور که میدانیم پارامترهای مدار معادل یک موتورالقایی را با انجام آزمایشات مختلف مثل سرعت سنکرون، رتور قفل شده و آزمایش DC میتوانیم تعیین کنیم اما به طور معمول با استفاده از الگوریتم های ریاضی مختلف و هوشمند به صورت آنلاین یا آفلاین تخمین زده می شود. بر اساس تخمین پارامترهای مدار معادل، مقدار SLL موتور القایی را می توان در هر نقطه از عملکرد موتور تعیین کرد و از این رو ، می توان راندمان بهینه موتور القایی در هر نقطه عملکرد آن تخمین زد.

در یکی از مطالعات انجام شده برای تخمین بازده موتورهای القایی با استفاده از الگوریتم های هوشمند، از یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تعیین پارامترهای ناشناخته مدار معادل و تعیین SLL استفاده می شود. مدار معادل پیشنهاد شده برای تعیین SLL یک موتور القایی سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است :



شکل۴. مدار معادل

همانطور که مشاهده می شود برای در نظر گرفتن SLL ، یک مقاومت اضافی به صورت سری با اندوکتانس نشتی روتور در مدار معادل اضافه شده است (Rsll) که مقدار آن با استفاده از رابطه زیر بدست می آید :

$$R_{sll} = 0.018\, R_r (1 - S_{fl}) / S_{fl}$$

در یکی دیگر از مطالعات انجام شده یک روش اقتصادی برای تعیین SLL و تخمین بازده موتور القایی بدون نیاز برای اندازه گیری توان خروجی پیشنهاد شده است که Rsll در مدار معادل مورد استفاده در این کار با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$R_{sll} = 0.018\, R_r (1 - S_{fl}) / S_{fl}$$

که در این رابطه k ضریبی است در بازه $0.002 < k < 0.018$

روش مدار معادل محدودیت های روش های قبل را ندارد و با توجه به دقت بالای این روش، استفاده از آن برای تعیین تلفات بار سرگردان بسیار مفید خواهد بود.

جدول ۱. مقایسه روش های تعیین SLL

روش	مزایا	معایب
روش مبتنی بر استاندارد	- استفاده آسان برای تعیین SLL. - استانداردهای مختلفی برای تمامی محدوده های قدرت موتور موجود است.	- تفاوت در مقدار تعیین شده برای SLL، برای استانداردهای مختلف - تفاوت شرایط کار موتور با شرایط استاندارد، استفاده از آن را محدود می کند.
روش تحلیل المان محدود ۲ بعدی و ۳ بعدی	- روش نسبتا ساده است. - مقدار بدست آمده برای SLL از دقت بالایی برخوردار است.	- نیاز به اطلاعات کامل در مورد هندسه و مواد موتور - به اطلاعات کامل لمینیت موتور نیاز دارد. - برای موتورهای از قبل نصب شده تقریبا غیر قابل استفاده است و فقط در مرحله طراحی موتور مناسب است.
روش رابطه تجربی	- دقت روش خوب است. - تحقیقات کافی در مورد این روش موجود است.	- این روش برای موتورهای با قدرت یکسان اما ساختار هندسی متفاوت قابل استفاده نیست.
روش مدار معادل	- دقت روش عالی است. - تحقیقات کافی در مورد این روش موجود است. - مناسب برای موتورهای از قبل نصب شده و مرحله طراحی موتور.	- نیاز به اندازه گیری مقاومت استاتور.

۵- نتایج

- ❖ در تعیین تلفات بار سرگردان با استفاده از استانداردها، علیرغم سادگی، این واقعیت وجود دارد که مقدار SLL در استانداردهای مختلف متفاوت است.
- ❖ روش رابطه تجربی با وجود سادگی و دقت بالا در تعیین SLL ، برای موتورهایی با قدرت برابر اما ساختار هندسی متفاوت قابل استفاده نیست.
- ❖ استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، به دلیل نیاز به جزئیات کامل موتور محدود است.
- ❖ با توجه به نکات گفته شده روش مدار معادل محدودیت های کمتری دارد و علاوه برآن از آنجایی که این روش از دقت بالایی برخوردار است برای تعیین تلفات بار سرگردان در ماشین های القایی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

۶- پیشنهادات

- ❖ علاوه بر تعیین SLL برای تخمین بازده موتورهای در حال کار، می بایست از آن برای فاز طراحی نیز استفاده کرد.
- ❖ در تعیین تلفات بار سرگردان ماشین های القایی، تاثیر شرایط کار موتور باید در نظر گرفته شود.
- ❖ لزوم جایگزین کردن موتور های پربازده (با توجه به نرخ خوب بازگشت سرمایه آن ها) در صنعت برق برای صرفه جویی در مصرف انرژی

مراجع

[1] E. Roshandel, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, A. Yazdani, and G. M. Shafiullah, “Losses in Efficiency Maps of Electric Vehicles: An Overview,” Energies, vol. 14, no. 22, 2021.

[2] Mohammadi F, Mohammadi-Ivatloo B, Gharehpetian GB, Ali MH, Wei W, Erdinç O, Shirkhani M. Robust control strategies for microgrids: A review. IEEE Systems Journal. 2021 Jun 8.

[3] Iranmehr H, Aazami R, Tavoosi J, Shirkhani M, Azizi AR, Mohammadzadeh A, Mosavi AH, Guo W. Modeling the price of emergency power transmission lines in the reserve market due to the influence of renewable energies. Frontiers in Energy Research. 2022 Jan 13;9:792418.

[4] Tavoosi J, Shirkhani M, Azizi A. Control engineering solutions during epidemics: A review. International Journal of Modelling, Identification and Control. 2021;39(2):97-106.

[5] Danyali S, Aghaei O, Shirkhani M, Aazami R, Tavoosi J, Mohammadzadeh A, Mosavi A. A New Model Predictive Control Method for Buck-Boost Inverter-Based Photovoltaic Systems. Sustainability. 2022 Sep 19;14(18):11731.

[6] I. Boldea, Induction machines handbook: steady state modeling and performance, 3rd ed., Boca Raton, USA: CRC Press, June. 2020.

[7] H. Zhao, P. Li, G. Chen, Y. Wang, Y. Zhan, G. Xu, and X. Liu, “Nonintrusive efficiency estimation for large power and high voltage induction motors,” IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1-5 Oct. 2017.

[8] Geravandi, M. "Stray Load Losses Determination Methods of Induction Motors-A Review", Department of electrical engineering University of Razi Kermanshah, Iran, 2022.

[9] Tavoosi J, Shirkhani M, Azizi A, Din SU, Mohammadzadeh A, Mobayen S. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique. Electric Power Systems Research. 2022 Sep 1;210:108073.

[10] Rotating Electrical Machines - Part2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for traction vehicles), IEC Std 60034-2-1, Sep. 2007.

[11] J. Cheaytani, A. Benabou, A. Tounzi, M. Dessoude, L. Chevallier, and T. Henneron, “End-region leakage fluxes and losses analysis of cage

induction motors using 3-D finite-element method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March. 2015.

[12] B. Herndler, P. Barendse, and M. A. Khan, "Considerations for improving the non-intrusive efficiency estimation of induction machines using the air gap torque method," 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, ON, Canada, 15-18 May 2011.

[13] P. Pillay, V. Levin, P. Otaduy, and J. Kueck, "In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 13, no. 4, pp. 326-333, Dec 1998.

[14] El Ouanjli N, Derouich A, El Ghzizal A, Motahhir S, Chebabhi A, El Mourabit Y, Taoussi M. Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review. Protection and Control of Modern Power Systems. 2019 Dec;4(1):1-2.

[15] دانیالی, شیرخانی, دادوند, شکربیگی, امیرمحمد. ارائه و بررسی یک مبدل DC-DC افزاینده با ورودی از سیستم خورشیدی. روش‌های محاسباتی در علوم مهندسی. ۲۰۲۳ Aug 19.