

Evaluation and Comparison of the Three Phase Induction Motors In-service Efficiency Estimation

A. Mosllanejad^{*}, A. Ghaempanah

^{*} Assistant Professor, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received: 13/02/2021; Accepted: 04/09/2021)

Abstract

The standard methods for determining the efficiency of electric motors are divided into two distinct categories; direct and indirect methods. Usually, it is difficult to prepare all the necessary facilities and requirements for measuring the efficiency of in-service electric motors. In these circumstances, in-service efficiency estimation methods can be used. In these methods, the output power of the three-phase induction motors is estimated by measuring the electrical signals of the motor including current, voltage, and active power. Three-phase induction motor's in-service efficiency estimation methods are divided into four categories namely the slip method, current method, equivalent circuit method, and the air gap torque method. The two latter mentioned methods have enough accuracy in comparison with the standard methods. For efficiency estimation, there is a need to estimate some loss components using the standards or other suggestions made in the literature. In this article, the three-phase induction motors in-service efficiency estimation methods, and the loss components estimations based on the motor ratings, are compared and evaluated. Comparisons of these methods show that the equivalent circuit method gives a better estimation of the motor efficiency in different circumstances. At the end, some suggestions are provided for further research in this area.

Keywords: Three Phase Induction Motor, In-situ Efficiency Estimation, Air Gap Torque, Equivalent Circuit Method, Core Loss, Stray Loss, Friction and Windage Loss.

^{*} Corresponding author E-mail: A_mosallanejad@sbu.ac.ir

ارزیابی و مقایسه روش‌های تخمین بازده موتورهای سه‌فاز القایی در حین کار

علی مصلی نژاد^{۱*}، علیرضا قائم پناه^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶)

چکیده

روش‌های استاندارد برای اندازه‌گیری بازده موتورهای الکتریکی به دو روش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شود. تأمین شرایط و تجهیزات مورد نیاز این روش‌ها برای اندازه‌گیری بازده موتورهای الکتریکی در حین کار، معمولاً به سهولت میسر نیست. در این شرایط، برای اندازه‌گیری بازده موتورهای القایی سه‌فاز، از روش‌های تخمین بازده در حین کار این موتورها می‌توان استفاده نمود؛ به این صورت که با استفاده از اندازه‌گیری متغیرهای الکتریکی، شامل جریان، ولتاژ و توان ورودی موتور، توان خروجی موتور تخمین زده می‌شود. روش‌های تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار، به چهار دسته، شامل روش لغزش، روش جریان، روش مدار معادل الکتریکی و روش تخمین گشتاور فاصله هوایی تقسیم می‌شوند. در این بین، دو روش مدار معادل الکتریکی و تخمین گشتاور فاصله هوایی، دقت بیشتری برای محاسبه بازده موتورهای القایی سه‌فاز دارند. برای تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز توسط این روش‌ها، نیاز است که برخی اجزای تلفات در موتور، به کمک استانداردها و یا اطلاعات مقاله‌ها، تخمین زده شوند. در این مقاله، روش‌های تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار و همچنین، روش‌های تخمین اجزای تلفات موتور با هم مقایسه می‌شوند. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که روش مدار معادل الکتریکی، تقریب بهتری از بازده موتور القایی سه‌فاز به دست می‌دهد. در پایان نیز پیشنهادهایی برای انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: موتور القایی سه‌فاز، تخمین بازده در حین کار، گشتاور فاصله هوایی، مدار معادل الکتریکی، تلفات هسته، تلفات بار پراکنده، تلفات بادخوری و اصطکاک

[۳ و ۴] نشان می‌دهد که استاندارد IEEE 112-B نسبت به دیگر استانداردها، دقت بیشتری برای اندازه‌گیری بازده دارد. به‌طور کلی، این استانداردها، برای تعیین بازده موتورهای الکتریکی، از یکی از دو روش اندازه‌گیری مستقیم و یا روش اندازه‌گیری غیر مستقیم استفاده می‌کنند. در روش اندازه‌گیری مستقیم، برای محاسبه توان خروجی موتور، گشتاور و سرعت موتور توسط حسگرها اندازه‌گیری می‌شوند. در روش اندازه‌گیری غیر مستقیم، به جای اندازه‌گیری گشتاور و سرعت موتور، کل تلفات موتور الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود [۵]. شایان ذکر است که نتایج حاصل از اندازه‌گیری بازده، در روش‌های مستقیم و غیر مستقیم یکسان نیست؛ اختلاف مقدار اندازه‌گیری بازده توسط این دو روش، در موتورهای الکتریکی با توان بالا، کمتر است. همچنین، این اختلاف مقدار در این دو روش اندازه‌گیری بازده، به سرعت موتور نیز وابسته است؛ به این صورت که اختلاف مقدار اندازه‌گیری شده در موتورهای دو قطب بیشتر از موتورهای چهار قطب و در موتورهای چهار قطب بیشتر از موتورهای شش قطب است [۶].

برای اندازه‌گیری بازده موتورهای الکتریکی در هر دو روش اندازه‌گیری مستقیم و غیر مستقیم، بر اساس استانداردها، نیاز به

۱- مقدمه

موتورهای الکتریکی بیش از پنجاه درصد از انرژی الکتریکی تولید شده در دنیا را مصرف می‌کنند. در این بین، بیشترین تعداد از موتورهای الکتریکی نصب شده در بخش صنعت، از نوع موتورهای القایی سه‌فاز است [۱]. در نتیجه، می‌توان گفت که بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی مصرفی در بخش صنعت، مربوط به انرژی مصرفی موتورهای القایی سه‌فاز است. به همین دلیل، پایش بازده این موتورها (به ویژه در موقع نوسازی موتورها و یا در تصمیم‌گیری برای جایگزینی آن‌ها) از اهمیت زیادی برخوردار است.

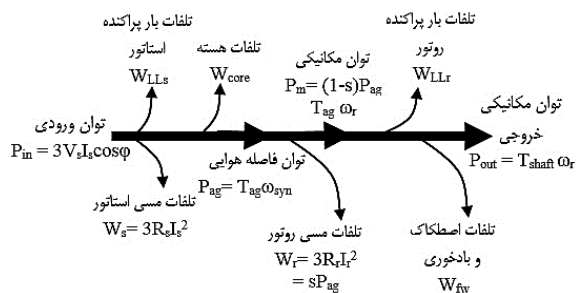
استانداردهای مختلفی برای اندازه‌گیری بازده موتورهای الکتریکی، در کشورهای مختلف دنیا وجود دارد که هر یک، روشی متفاوت را برای اندازه‌گیری بازده موتورهای الکتریکی توصیه می‌کنند؛ در نتیجه، این احتمال وجود دارد که موتورهای یکسان، تحت استانداردهای مختلف، به‌صورت متفاوت برچسب‌گذاری شوند [۲]. البته بررسی‌های انجام شده در مراجع

۲-۱- اجزای تلفات در موتورهای القایی سه‌فاز

اجزای تلفات در موتورهای القایی سه‌فاز و تعریف هر یک از آن‌ها، در نمودار توان که در شکل (۱) نشان داده شده، آورده شده است [۱۵]. با توجه به این نمودار، تلفات در موتورهای القایی سه‌فاز، دارای اجزای زیر است [۵]:

$$P_{loss} = P_{core} + P_{fw} + P_{stator} + P_{rotor} + P_{stray} \quad (3)$$

که در آن، P_{core} تلفات هسته موتور، P_{fw} تلفات اصطکاک و بادخوری،



شکل (۱): نمودار توان و اجزای تلفات در موتورهای سه‌فاز القایی [۱۵]

P_{stator} تلفات اهمی استاتور، P_{rotor} تلفات اهمی روتور و P_{stray} کل تلفات بار پراکنده موتور است. این تلفات توان، به دو دسته تلفات ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. مقدار تلفات ثابت، که شامل تلفات هسته و تلفات بادخوری و اصطکاک است، از بی‌باری تا بار کامل ثابت فرض می‌شود.

تلفات هسته متناسب با ولتاژ است و معمولاً آن را مقدار ثابتی از بی‌باری تا بار کامل (در ولتاژ ثابت) برای موتور فرض می‌کنند [۸]. نشان داده شده است که مقدار این تلفات به دمای هسته استاتور، بسیار وابسته است [۳]. اگر موتور با مبدل تغذیه شود، تلفات هسته در آن افزایش می‌یابد که این افزایش، به فرکانس کلیدزنی مبدل وابسته است؛ افزایش تلفات جریان گردابی، دلیل اصلی افزایش تلفات هسته است. مطالعات بر روی یک موتور ۲/۱ کیلوواتی که مبدل آن با فرکانس ۵ kHz کلیدزنی می‌شود، نشان می‌دهد که تلفات هسته در این موتور، نسبت به حالت تغذیه مستقیم از شبکه، ۵۰ درصد افزایش داشته است؛ بیشتر این افزایش تلفات، مربوط به هسته روتور است [۱۶]. تلفات بادخوری و اصطکاک، از نوع تلفات مکانیکی هستند. با توجه به تغییرات کم سرعت موتورهای القایی سه‌فاز، از بی‌باری تا بار کامل، معمولاً این تلفات را نیز در این موتورها، از نوع تلفات مقدار ثابت فرض می‌کنند. مقدار این تلفات، وابستگی زیادی به سامانه خنک‌کنندگی موتور دارد.

برخی مطالعات نشان می‌دهد که مجموع مقدار تلفات ثابت (تلفات هسته و تلفات بادخوری و اصطکاک) را می‌توان در حدود

بودن در شرایط مرجع آزمایشگاهی است. بنابراین، اگر موتور در محل کار نصب شده باشد، از این استانداردها برای اندازه‌گیری بازده موتور نمی‌توان استفاده کرد. به همین دلیل، مطالعات زیادی برای تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار، انجام شده است. این روش‌ها، بر اساس اطلاعات مورد نیاز برای تخمین بازده موتور، دارای دسته‌بندی‌های مختلف هستند [۷]. یکی از کاربردهای مهم اندازه‌گیری بازده موتورهای الکتریکی در حین کار، امکان‌سنجی و مطالعات فنی-اقتصادی جایگزینی موتورهای الکتریکی موجود در صنایع با موتورهای الکتریکی پر بازده است [۸].

در روش‌های تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار، تلاش می‌شود که گشتاور خروجی موتور، با استفاده از مدار معادل الکتریکی آن و یا سایر مدل‌های ریاضی موتور، تخمین زده شود. دقت تخمین بازده موتور با این روش‌ها، به دقت تجهیزات اندازه‌گیری و میزان درستی تخمین پارامترها و اجزای تلفات موتور وابسته است؛ نیاز است که خطای تجهیزات اندازه‌گیری به صورت نسبی کوچک باشد تا تخمین بازده، دقت قابل قبولی داشته باشد [۹ و ۱۰].

در این مقاله، روش‌های تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار، ارزیابی و مقایسه می‌شود. شایان ذکر است که در این مقاله، روش‌های الکتریکی تخمین بازده که دقت مناسبی دارند، ارزیابی می‌شوند و به روش‌هایی مانند روش‌های مراجع [۱۱-۱۳] که برای تخمین بازده از اندازه‌گیری ارتعاشات موتور در آن‌ها استفاده شده، پرداخته نشده است.

۲- بازده و تلفات در موتورهای القایی سه‌فاز

بازده موتورهای الکتریکی به یکی از دو صورت زیر محاسبه می‌شود [۵ و ۱۴]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (2)$$

که در آن، P_{in} توان ورودی، P_{loss} کل تلفات موتور و P_{out} توان خروجی موتور است. در روش‌های غیر مستقیم اندازه‌گیری بازده و یا روش‌های تخمین بازده موتورهای الکتریکی در حین کار، از رابطه دوم برای محاسبه بازده استفاده می‌شود. در این روش‌ها، تلفات در موتور الکتریکی، اندازه‌گیری، یا محاسبه و یا به کمک اطلاعات موجود، تخمین زده می‌شود. بنابراین، قبل از پرداختن به بحث تخمین بازده در موتورهای القایی سه‌فاز، شناخت اجزای تلفات در آن‌ها و طریقه محاسبه و یا تخمین اجزای تلفات در موتور، مهم است.

که در آن، $P_{SSL-rated}$ و I_{rated} به ترتیب، تلفات بار پراکنده و جریان موتور در حالت نامی است و I نیز جریان موتور در بار مورد نظر است.

مقادیر پیش‌فرض برای تلفات بار پراکنده در استاندارد IEC 60034-2-1، در ویرایش‌های قبلی برابر با ۰/۵ درصد توان نامی ورودی موتور (در شرایط نامی) فرض شده بود [۲۲]، اما در آخرین ویرایش آن که مربوط به سال ۲۰۱۴ میلادی است، پیشنهاد شده است که مقدار آن، از جدول (۲) تخمین زده شود. در این استاندارد، بر خلاف استاندارد IEEE 112، تلفات بار پراکنده بر حسب درصدی از توان نامی ورودی موتور ذکر شده است. در شرایط غیر نامی نیز رابطه تخمین این تلفات، به صورت زیر تغییر داده شده است [۲۳]:

جدول (۱): تلفات بار پراکنده در استاندارد IEEE 112 [۲۱]

توان نامی (کیلو وات)	تلفات بار پراکنده بر حسب درصد از توان نامی خروجی
۰/۷۵-۹۰	۱/۸
۹۱-۳۷۵	۱/۵
۳۷۶-۱۸۵۰	۱/۲
بیش از ۱۸۵۱	۰/۹

جدول (۲): تلفات بار پراکنده در استاندارد IEC 60034-2-1 [۲۳]

توان نامی (کیلو وات)	تلفات بار پراکنده بر حسب درصد از توان نامی ورودی
کمتر از ۱	۰/۰۲۵
۱-۱۰,۰۰۰	$0.025 - 0.005 \times \log_{10} P_{out}$
بیش از ۱۰,۰۰۰	۰/۰۰۵

$$P_{SSL} = P_{SSL-rated} \frac{I^2 - I_0^2}{I_{rated}^2} \quad (۵)$$

که در آن، I و I_0 به ترتیب، جریان موتور در بار مورد نظر و جریان موتور در بی‌باری است.

تلفات بار پراکنده در ۸۱۷ موتور القایی سه‌فاز ۵۰ و ۶۰ هرتز، در بازه توانی ۰/۷۵ تا ۳۷۵ کیلووات در مرجع [۲۲] بررسی شده است. نتایج اندازه‌گیری تلفات بار پراکنده در این موتورها نشان می‌دهد که به‌صورت متوسط، مقدار این تلفات برابر ۱/۳ درصد توان ورودی آن‌ها است. فعالیت مشابهی در مرجع [۱۹] بر روی ۹۹۸ موتور القایی سه‌فاز، در بازه توانی ۱ تا ۲۵۰ اسب بخار، ۶۰ هرتز و با تعداد ۲، ۴، ۶ و ۸ قطب انجام شده است. بررسی‌های انجام شده در این مرجع نیز نشان می‌دهد که متوسط مقدار تلفات بار پراکنده در این موتورها، برابر ۱/۲ درصد توان ورودی موتور است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیری پیشنهادی

۳/۵ درصد توان ورودی نامی موتور در نظر گرفت [۱۸]. برای محاسبه تلفات بادخوری و اصطکاک، روابط زیر نیز پیشنهاد شده است [۱۷]:

$$1- \text{اگر موتور دو قطب باشد، } P_{fw} = 2.5 \times P_{in-fl}/100$$

$$2- \text{اگر موتور چهار قطب باشد، } P_{fw} = 1.2 \times P_{in-fl}/100$$

$$3- \text{اگر موتور شش قطب باشد، } P_{fw} = 1.0 \times P_{in-fl}/100$$

که در آن‌ها، P_{in-fl} توان ورودی نامی موتور است.

در بین تلفات متغیر، تلفات اهمی استاتور و روتور، با مشخص بودن جریان آن‌ها، به سادگی محاسبه می‌شود. در مقابل، تلفات بار پراکنده ماهیت پیچیده‌ای دارد و مقدار آن، وابستگی زیادی به ابعاد، ساختار و هندسه موتور دارد. در استانداردها، پنج روش مختلف برای اندازه‌گیری تلفات بار پراکنده پیشنهاد شده است که بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این پنج روش، دارای تفاوت‌های معناداری است [۱۸]. یکی از دلایل اصلی تفاوت مقدار اندازه‌گیری شده بازده موتور، با استفاده از استانداردهای مختلف، تفاوت در مقدار تخمینی برای تلفات بار پراکنده است [۱۹]. مقدار این تلفات، با تغییر بار و فرکانس درایو موتور تغییر می‌کند و رابطه خطی با مربع گشتاور موتور دارد [۲۰].

۲-۲- تلفات بار پراکنده

تلفات بار پراکنده، شامل تلفات‌هایی است که در چهار دسته تلفات دیگر قرار نمی‌گیرند. این دسته از تلفات، ناشی از هارمونیک‌های فضایی استاتور و روتور و شار پراکنده در انتهای سیم‌پیچی است. اجزای تلفات بار پراکنده در سه دسته زیر، قابل تقسیم است [۴]:

- تلفات ناشی از شار نوسانی در دندانه‌های استاتور و روتور؛

- تلفات در سطح روتور به خاطر هارمونیک‌های فضایی استاتور و تلفات در سطح استاتور به خاطر هارمونیک‌های فضایی روتور؛

- تلفات مقاومتی در قفسه روتور، ناشی از جریان القاء شده از هارمونیک‌های شار مغناطیسی.

تلفات بار پراکنده برای شرایط نامی موتورهای القایی سه‌فاز، زمانی که اطلاعاتی در مورد آن‌ها وجود نداشته باشد، بر اساس استاندارد IEEE 112، از جدول (۱) تخمین زده می‌شود. در شرایط غیر نامی، مقدار آن (P_{SSL}) را به‌صورت زیر می‌توان محاسبه کرد [۲۱]:

$$P_{SSL} = P_{SSL-rated} \frac{I^2}{I_{rated}^2} \quad (۴)$$

تلفات بار پراکنده است. مقدار این مقاومت، با استفاده از دو آزمون بی‌باری و آزمون بار کامل و جداسازی تلفات در موتور القایی سه‌فاز، محاسبه می‌شود. بررسی‌های انجام شده بر روی ۶ نمونه موتور الکتریکی در بازه توانی ۴ تا ۱۸ کیلووات، نشان می‌دهد که مقدار به‌دست آمده از این مدل برای تلفات بار پراکنده، با فاصله زیادی، بیشتر از تلفات اندازه‌گیری شده توسط روش‌های استاندارد است. همچنین، در مرجع [۲۸] نیز نشان داده شده است که مقدار تلفات بار پراکنده و به‌تبع آن، مقدار مقاومت معادل تلفات بار پراکنده، با تغییر دامنه ولتاژ تغذیه، تغییرات قابل توجهی دارد.

۲-۳- روش‌های تخمین بازده موتور در حین کار

چندین روش برای اندازه‌گیری بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار، پیشنهاد شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از [۳۱]-[۲۹]:

- ۱- روش لغزش؛
- ۲- روش جریان؛
- ۳- روش مدار معادل الکتریکی؛
- ۴- روش گشتاور فاصله هوایی.

در روش لغزش، فرض می‌شود که نسبت توان خروجی موتور به توان نامی، برابر نسبت لغزش موتور به لغزش نامی آن است. به‌صورت مشابه، در روش جریان فرض می‌شود که نسبت توان خروجی موتور به توان نامی آن، برابر نسبت جریان موتور به جریان نامی آن است. به این ترتیب، با اندازه‌گیری لغزش و یا جریان موتور، توان خروجی آن تخمین زده می‌شود. توان ورودی نیز به کمک تجهیزات اندازه‌گیری الکتریکی، اندازه گرفته می‌شود و بازده موتور به کمک رابطه (۱) محاسبه می‌شود. این دو روش، دقت پایینی برای تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز، به خصوص در بارهای کم، دارند [۳۲-۳۴]. البته بررسی انجام شده در مرجع [۳۵] نیز نشان می‌دهد که استفاده از روش لغزش، در محدوده کوچک تغییرات سرعت، می‌تواند تخمین خوبی از گشتاور و توان خروجی موتور ارائه کند.

با دانستن پارامترهای مدار معادل الکتریکی یک موتور القایی سه‌فاز، بازده آن را در بارهای مختلف، می‌توان محاسبه کرد. البته این اطلاعات از طرف سازندگان موتورهای الکتریکی ارائه نمی‌شود و نیاز است که این پارامترها، شامل مقاومت‌های استاتور و روتور (ارجاع شده به سمت استاتور)، اندوکتانس‌های پراکندگی استاتور و روتور (ارجاع شده به سمت استاتور)، اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی و مقاومت مدل‌کننده تلفات هسته استاتور و روتور، تخمین زده شود. روش‌های مطرح شده در استانداردها برای محاسبه پارامترهای مدار معادل الکتریکی موتورهای القایی

در استاندارد IEC 60034-2-1 تقریب خوبی برای تلفات بار پراکنده ارائه نمی‌کند؛ زیرا در بیشتر موتورهای الکتریکی آزمایش شده، تلفات بار پراکنده، خارج از محدوده اعلامی در این استاندارد است.

بررسی‌های انجام شده در مرجع [۲۴] نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌فرض برای تلفات بار پراکنده در استاندارد IEEE 112، مناسب برای تخمین تلفات بار پراکنده در توان‌های پایین (کمتر از ۵۰ کیلووات) است. همچنین، این مقادیر پیش‌فرض در استاندارد IEC 60034-2-1 برای تخمین تلفات بار پراکنده در توان‌های بالاتر مناسب است. در مرجع [۲۵] نیز نشان داده شده که استفاده از فرمول پیشنهادی استاندارد IEC برای محاسبه تلفات بار پراکنده در توان‌های بیش از ۴۰ اسب بخار، تقریب بهتری از مقدار این تلفات به‌دست می‌دهد. برای توان‌های کمتر، استفاده از استاندارد IEEE 112 توصیه شده است. این مقایسه‌ها، بر اساس متوسط مقادیر تلفات بار پراکنده اندازه‌گیری شده در موتورها (بر اساس روش‌های استاندارد) است.

در مرجع [۲۴] عنوان شده است که با توجه به اینکه تلفات بار پراکنده در اثر تغییرات ولتاژ و نامتعادلی آن تغییر می‌کند، بهتر است رابطه تخمینی برای این تلفات بر اساس توان ورودی نامی باشد. بر اساس این استدلال و همچنین برای اندازه‌گیری تلفات بار پراکنده در چندین موتور، رابطه زیر برای تخمین تلفات بار پراکنده (در شرایط نامی موتور) پیشنهاد شده است:

$$P_{SSL} = 0.011P_{in} \quad (6)$$

که در آن، P_{in} توان ورودی نامی موتور است.

در مرجع [۲۶]، به جای استفاده از جدول‌های پیشنهادی در استانداردها، برای تخمین تلفات بار پراکنده، از یک مقاومت مدل‌کننده تلفات بار پراکنده که به‌صورت سری با مقاومت روتور قرار می‌گیرد، استفاده شده است. مقدار این مقاومت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{st} = 0.018r_2(1 - s_{sf}) / s_{sf} \quad (7)$$

که در آن، r_{st} مقاومت مدل‌کننده تلفات بار پراکنده، r_2 مقاومت روتور و s_{sf} لغزش موتور در بار کامل است.

برخی مطالعات نشان می‌دهد که تلفات مقاومتی در قفسه روتور که ناشی از هارمونیک‌های شار مغناطیسی است، مهم‌ترین جزء را در تلفات بار پراکنده دارد. تحلیل انجام شده در مرجع [۲۷] نشان می‌دهد که این جزء تلفات را به‌صورت یک مقاومت اضافی که سری با مقاومت استاتور است، می‌توان مدل کرد. درحقیقت، این مقاومت برابر یا متناسب با شیب تعریف شده در استانداردها، برای هموارسازی اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری

استفاده شود. شایان ذکر است که سرعت نامی که بر روی پلاک موتور درج می‌شود، بر اساس استانداردها، تا ۲۰ درصد می‌تواند تغییر نماید. بنابراین، استفاده از این سرعت برای تخمین بازده موتور، می‌تواند باعث ایجاد خطای زیاد در محاسبه بازده شود. به همین دلیل، نیاز است که در هر مرحله، سرعت موتور اندازه‌گیری و یا تخمین زده شود [۴۱].

یکی از پر استفاده‌ترین راه‌های برای تخمین سرعت موتور، استفاده از هارمونیک‌های باند جانبی، مربوط به عیب خروج از مرکز در طیف فرکانسی جریان موتور است؛ به دلیل تلورانس‌های ساختی در موتورهای الکتریکی، فاصله هوایی موتور کاملاً یکنواخت نیست. این مسئله باعث می‌شود که هارمونیک‌های باند جانبی این عیب، همواره در طیف فرکانسی جریان موتور وجود داشته باشد و به کمک آن می‌توان لغزش و سرعت موتور را محاسبه کرد [۹ و ۴۲]. فرکانس این هارمونیک‌های باند جانبی در طیف فرکانسی جریان موتور، عبارتند از [۴۳]:

$$f = \left(1 \mp \frac{s}{P}\right) f_s \quad (۸)$$

که در آن، f_s فرکانس اصلی تغذیه موتور، s لغزش و P تعداد جفت قطب‌های موتور است. در بررسی‌ها، خطای این روش محاسبه سرعت موتور، کمتر از ۰/۰۷ درصد برای یک موتور ۳ اسب بخار و کمتر از ۰/۰۲ درصد برای یک موتور ۱۰ اسب بخار برآورد شده است.

محاسبه سرعت موتور (n) با استفاده از رابطه زیر نیز ممکن است [۳۵ و ۴۴]:

$$n = 60(f_{sh} \pm f_1) / Z_2 \quad (۹)$$

که در آن، f_{sh} هارمونیک شیار روتور، Z_2 تعداد شیارهای روتور و f_1 فرکانس اصلی منبع تغذیه است. هارمونیک شیار، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_{sh} = f_1 Z_2 (1-s) / p \pm f_1 \quad (۱۰)$$

که در آن، p تعداد جفت قطب‌های موتور است. اگر n_1 و n_2 سرعت موتور در بی‌باری و بار نامی موتور و f_{sh1} و f_{sh2} هارمونیک‌های شیار در این دو حالت باشد، خواهید داشت:

$$n_1 / n_2 = (f_{sh1} \pm f_1) / (f_{sh2} \pm f_1) \quad (۱۱)$$

در این رابطه، دو مجهول وجود دارد که برای تعیین آن‌ها، از طیف هارمونیکی جریان موتور و مقایسه هارمونیک‌های آن‌ها در دو حالت بار کامل و بی‌باری استفاده می‌شود [۴۵].

سه‌فاز که بر اساس آزمایش بی‌باری و آزمایش روتور قفل شده انجام می‌شود، برای موتورهای الکتریکی که در زیر بار هستند، مناسب نیست؛ زیرا لازم است که فعالیت عادی موتور متوقف شود و شرایط مورد نیاز استانداردها برای انجام این آزمون‌ها، فراهم شود.

در روش‌های تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز، به کمک تخمین پارامترهای مدار معادل، الگوریتم تخمین بازده به این صورت است که ابتدا متغیرهای الکتریکی موتور، شامل جریان استاتور، ولتاژ استاتور، توان و ضریب توان موتور (و در برخی موارد سرعت موتور) ثبت می‌شود. این متغیرها با استفاده از عناصر مدار معادل موتور القایی سه‌فاز، به‌صورت پارامتری، محاسبه می‌شود. اکنون دستگاهی از چند معادله و چند مجهول وجود دارد که البته، تعداد مجهول‌ها بیشتر از تعداد پارامترهای معلوم است. برای رسیدن به جواب درست مسئله، لازم است که با مجموعه‌ای از فرض‌های کمکی، مانند انتخاب نسبت راکتانس پراکندگی استاتور به روتور، اندازه‌گیری مقاومت استاتور، اندازه‌گیری و یا تخمین دما، اندازه‌گیری و یا تخمین سرعت و تخمین تلفات بار پراکنده و تلفات ثابت، با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، پارامترهای مدار معادل موتور تخمین زده شده و بازده موتور محاسبه شود [۲۶، ۳۶ و ۳۷].

یکی دیگر از روش‌های تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار که دقت نسبتاً قابل قبولی دارد، روش تخمین گشتاور فاصله هوایی است. در این روش، گشتاور فاصله هوایی موتور، به کمک اندازه‌گیری متغیرهای الکتریکی آن (جریان و ولتاژ فازها) و استفاده از مدل‌های ریاضی موتور، محاسبه می‌شود [۳۱].

در هر دو روش مدار معادل الکتریکی و تخمین گشتاور فاصله هوایی، نیاز است که تلفات بار پراکنده و تلفات بادخوری و اصطکاک، با استفاده از استانداردها و یا تجربه‌های قبلی تخمین زده شود. به همین دلیل، در این روش‌ها عملاً از رابطه (۲) برای محاسبه بازده استفاده می‌شود.

در روش‌های تخمین بازده موتور در حین کار، مقاومت استاتور جزء اطلاعات از پیش دانسته برای تخمین بازده موتور فرض شده است؛ به عبارتی، یا از طریق اندازه‌گیری به‌دست آمده است و یا با استفاده از روش‌های تخمین مقاومت استاتور، مشابه [۳۰، ۳۸-۴۰]، تخمین زده می‌شود. همچنین، سرعت موتور نیز جزء مقادیر معلوم مسئله است و برای اندازه‌گیری آن، می‌توان از انکدر و یا تاکومتر نوری متصل به شفت موتور استفاده کرد. در مواردی که امکان استفاده از این تجهیزات ممکن نیست، لازم است تا از روش‌های بدون حسگر، برای تخمین سرعت موتور

است. برای حل معادلات فوق، به دلیل زیاد بودن متغیرهای مجهول مسئله نسبت به اطلاعات معلوم آن، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حل آن استفاده می‌شود [۲۶ و ۵۲]؛ در بیشتر مقاله‌ها، مانند [۵۳ و ۵۴]، برای حل این مسئله، از الگوریتم‌های ژنتیک استفاده کرده‌اند. روش‌های دیگر نیز، مانند الگوریتم‌های غذاییابی باکتری‌ها [۵۷-۵۵] و بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۵۸] نیز برای تخمین مقدار این عناصر، مورد استفاده قرار گرفته است.

در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، برای حل مسئله فوق، چندین دسته از پاسخ‌های ممکن مسئله به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. در هر مرحله، با هدف کمینه کردن تابع‌های خطا، این دسته از پاسخ‌های ممکن، به‌روزرسانی می‌شوند و در نهایت، آن دسته‌ای که تابع خطا را کمینه می‌کند، به‌عنوان پاسخ نهایی مسئله، انتخاب می‌شود [۵۲]. به این ترتیب، می‌توان گفت که هر چه بازه جستجو برای تعیین هر یک از پارامترهای مدار معادل محدودتر باشد، امکان رسیدن سریع‌تر به پاسخ مناسب برای این مسئله، بیشتر است. بنابراین، در مرجع [۵۰] به کمک پایگاه داده‌ای، شامل اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی مجموعه بزرگی از موتورهای القایی سه‌فاز (در بازه توانی ۱ تا ۵۰۰ اسب بخار)، برای هر یک از پارامترهای مدار معادل موتور، بازه جستجوی محدودی، به شرح زیر، پیشنهاد شده است:

الف) مقاومت روتور (R_2) به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_2 = \frac{sP_{ag}}{3I_2^2} \quad (14)$$

که در آن، P_{ag} توان فاصله هوایی، s لغزش موتور و I_2 جریان روتور است. جریان روتور، با توجه به مدار معادل موتور القایی سه‌فاز، برابر است با:

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2} = I_1 \sqrt{1 - (I_0/I_1)^2} \quad (15)$$

که در آن، I_0 و I_1 به ترتیب، جریان فاز استاتور و جریان بی‌باری فاز موتور است. محدوده تغییرات نسبت جریان بی‌باری به جریان بار کامل (I_0/I_1)، بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در پایگاه داده ذکر شده در بالا، مطابق با اطلاعات جدول (۳) است. به کمک این نسبت جریان‌ها و با فرض برابری توان نامی خروجی با توان فاصله هوایی موتور، مقدار حداقل و حداکثر مقاومت روتور (بازه جستجو توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی) مشخص می‌شود.

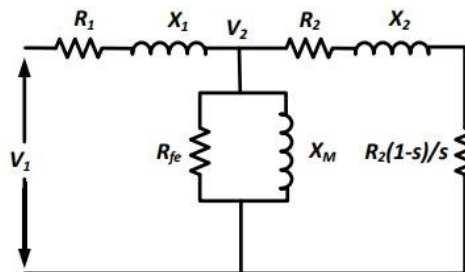
ب) تلفات هسته استاتور در بررسی‌های انجام شده، حداکثر برابر شش درصد توان نامی ورودی موتور ($P_{in, Rated}$) تخمین زده

روش‌های دیگری نیز برای تخمین سرعت موتورهای القایی سه‌فاز وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از محاسبه امیدانس مدار معادل موتور اشاره کرد [۴۶].

۳- روش مدار معادل الکتریکی

در استاندارد IEC 60034-2-1، استفاده از مدار معادل الکتریکی موتور القایی سه‌فاز برای محاسبه بازده آن، در مواقعی که امکان آزمون موتور با بار وجود ندارد، توصیه شده است. استفاده از این روش، نیاز به مشخص بودن اطلاعات طراحی، شامل نسبت اندوکتانس پراکنندگی استاتور به اندوکتانس پراکنندگی روتور، اندوکتانس پراکنندگی استاتور و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی موتور است. با داشتن این اطلاعات و به کمک آزمون‌های پیشنهادی در استاندارد، پارامترهای مدار معادل موتور محاسبه می‌شود [۲۳]. در صورت نبودن پارامترهای طراحی، از راه‌حل‌های دیگر، مانند استفاده از الگوریتم ژنتیک، یا روش کمینه کردن مربعات خطا و غیره، برای محاسبه و یا تخمین پارامترهای مدار معادل موتور القایی سه‌فاز، می‌توان استفاده کرد [۴۷-۴۹].

برای اندازه‌گیری بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار نیز می‌توان با تخمین پارامترهای مدار معادل آن، بازده موتور را محاسبه کرد. برای این کار، جریان استاتور (I_s)، ولتاژ فاز استاتور



شکل (۲): مدار معادل معمول هر فاز موتور سه‌فاز القایی [۵۰]

(V_s) و توان ورودی موتور اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، سرعت موتور و مقاومت استاتور اندازه‌گیری و یا تخمین زده می‌شود. سپس، متغیرهای الکتریکی موتور، به صورت تابعی از عناصر مدار معادل آن، محاسبه می‌شوند [۵۱]:

$$\begin{cases} I_s = V_s * f_1(R_1, R_2, R_{fe}, X_1, X_2, X_m) \\ I_m = V_s * f_2(R_1, R_2, R_{fe}, X_1, X_2, X_m) \\ I_r = V_s * f_3(R_1, R_2, R_{fe}, X_1, X_2, X_m) \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{in} = 3R_1 I_s^2 + 3R_{fe} I_m^2 + 3\text{real}(Z_2) I_r^2 + P_{fw} + P_{stny} \quad (13)$$

که در آن، I_r و I_m به ترتیب جریان شاخه مغناطیس‌کنندگی و جریان شاخه روتور است. Z_2 نیز امیدانس معادل شاخه روتور است. سایر پارامترهای معادلات فوق، در شکل (۲) تعریف شده

مانند مراجع [۲۶، ۵۳ و ۵۵]، که از مقاومت سری با مقاومت روتور، برای تخمین تلفات بار پراکنده استفاده کرده‌اند، از مدارهای معادل نشان داده شده در شکل (۳) نیز استفاده شده است. در این شکل، R_2 مقاومت فاز روتور، $r_2(s-1)/s$ نشان دهنده توان خروجی موتور، R_{st} مقاومت مدل کننده تلفات بار پراکنده و r'_m (یا r_m) مقاومت مدل کننده تلفات هسته است.

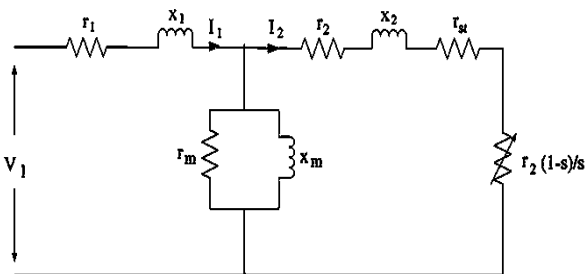
مدار معادل ساده شده موتورهای القایی سه‌فاز که در شکل (۴) نشان داده شده است، نیز برای محاسبه بازده به کار می‌رود. بررسی‌های انجام شده بر روی یک نمونه موتور ۱/۱ کیلووات نشان می‌دهد که خطای تخمین بازده با استفاده از این مدار معادل و در بار نامی، تقریباً برابر یک درصد است [۶۰]. شایان ذکر است که در حالتی که روتور موتور القایی سه‌فاز، با شیارهای عمیق و یا با دو قفسه سنجانی است، مدار معادل هر فاز موتور، کمی متفاوت می‌شود [۶۱ و ۶۲] که بعداً به آن اشاره خواهد شد. تخمین بازده این نوع موتورهای القایی سه‌فاز، با استفاده از مدار معادل، کمتر در مقاله‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

گشتاور شفت و توان خروجی موتور، با استفاده از این مدارهای معادل، برابر است با [۶۳]:

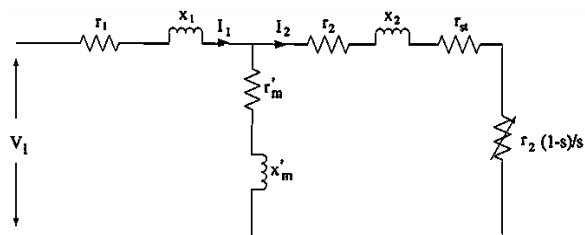
$$T = \frac{3|I_2|^2 r_2}{\omega_s s} \quad (20)$$

$$P_{out} = \frac{TN}{5252} - P_{fw} - P_{stray} \quad (21)$$

که در آن، ω_s سرعت سنکرون و s لغزش سرعت موتور است. N سرعت موتور (بر حسب دور در دقیقه)، P_{fw} تلفات اصطکاک و بادخوری و P_{stray} تلفات بار پراکنده است.



(الف)



(ب)

شکل (۳): مدارهای معادل یک فاز موتور سه‌فاز القایی [۲۶]

شده است. به این ترتیب، بازه پیشنهادی برای جستجوی مقاومت معادل تلفات هسته به صورت زیر است:

$$R_{fe} = (0.6 \dots 1.1) \frac{3V_1^2}{0.06 \times P_{in, Rated}} \quad (16)$$

ج) برای انتخاب نسبت اندوکتانس‌های پراکندگی، از تخمین گشتاور بیشینه موتور استفاده می‌شود. با صرف نظر کردن از شاخه موازی در مدار معادل موتور القایی سه‌فاز، گشتاور بیشینه موتور (T_{max}) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{max} = \frac{3V_1^2}{2\omega_s (R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2})} \quad (17)$$

در استاندارد NEMA MG1-2003 حداقل گشتاور بیشینه برای طراحی‌های مختلف موتور القایی سه‌فاز مشخص شده است. به کمک این استاندارد و انتخاب نسبت X_1/X_2 بر اساس کلاس طراحی موتور، مقدار بیشینه X_1 محاسبه می‌شود. پیشنهاد شده است که مقدار حداقل X_1 نصف مقدار بیشینه انتخاب شود. نسبت X_1/X_2 را به کمک جدول (۴)، می‌توان انتخاب کرد [۵۹].

د) حداکثر مقدار مجاز راکتانس مغناطیس کنندگی ($X_{m, Max}$) و حداقل مقدار آن ($X_{m, Min}$)، به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$X_{m, Max} = \frac{R_{fe, Max}}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

جدول (۳): محدوده نسبت جریان بی‌باری به جریان بار کامل [۵۰]

توان نامی (اسب بخار)	نسبت جریان بی‌باری به جریان نامی موتور (%)
۱-۷/۵	۳۵-۸۰
۱۰-۵۰	۲۰-۴۵
۶۰-۵۰۰	۱۵-۴۵

جدول (۴): نسبت X_1/X_2 بر اساس کلاس طراحی موتور [۵۹]

نسبت X_1/X_2	کلاس طراحی
۱/۰۰	A
۰/۶۷	B
۰/۴۳	C
۱/۰۰	D
۱/۰۰	روتور سیم‌پیچی

$$X_{m, Min} = \frac{V_1}{0.8I_1} \quad (19)$$

۳-۱- تخمین بازده موتور با ولتاژ تغذیه متعادل

در شرایطی که ولتاژ تغذیه موتور القایی سه‌فاز متقارن است، بیشتر از مدار معادل نشان داده شده در شکل (۲) برای تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز استفاده می‌شود. در برخی مراجع،

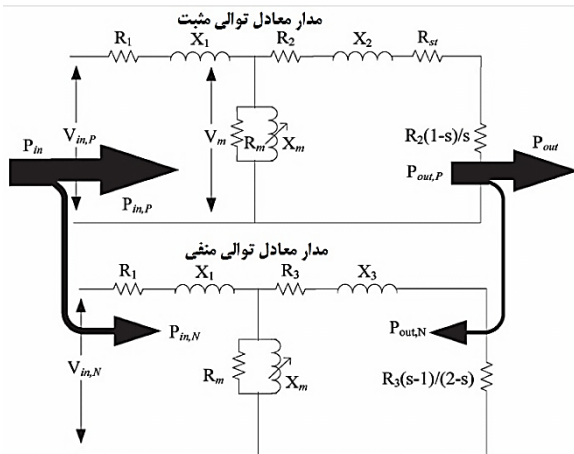
در مرجع [۶۵]، ضمن محاسبه پارامترهای مدار معادل، تلاش شده است که دمای موتور نیز تخمین زده شود و اثر آن بر مقاومت استاتور، لحاظ شود. دمای موتور، با تغییر بار آن، تغییر می‌کند؛ با دانستن میزان افزایش مجاز دمای موتور (خبیز مجاز دما)، می‌توان تغییرات دمای آن را، به‌صورت زیر، به تلفات موتور، ارتباط داد:

$$\Delta T = K_{th} \cdot P_{L,Est} \quad (۲۳)$$

$$P_{L,Est} = P_{L,P,Est} + P_{L,N,Est} \quad (۲۴)$$

$$T = \Delta T + T_a \quad (۲۵)$$

که در آن، $P_{L,Est}$ ، $P_{L,P,Est}$ و $P_{L,N,Est}$ ، به ترتیب، مقدار تخمینی کل تلفات موتور، تلفات مدار معادل مؤلفه مثبت و تلفات مدار معادل مؤلفه منفی است. ΔT افزایش دمای موتور و T_a دمای محیط است. همچنین، K_{th} ضریب حرارتی است. این پارامتر نیز به پارامترهای مجهول ماشین (که به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی مسئله محاسبه می‌شوند) اضافه می‌شود.



شکل (۵): مدار معادل مؤلفه مثبت و مؤلفه منفی یک فاز موتور سه‌فاز القایی [۶۸]

در مرجع [۱۷]، برای تخمین بازده موتور القایی سه‌فاز در شرایط نامتعادلی ولتاژ تغذیه، علاوه بر مدارهای معادل توالی‌های مثبت و منفی مؤلفه اصلی ولتاژ، مدار معادل هارمونیک‌های بالاتر نیز در محاسبات بازده موتور، لحاظ شده است. در این روش، بازده موتور به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{P_{cov}^+ + P_{cov}^- + \sum_{i=2}^k P_i}{P_{in,fl}} \times 100 \quad (۲۶)$$

که در آن، P_{cov}^+ توان توالی مثبت مؤلفه اصلی، P_{cov}^- توان توالی منفی مؤلفه اصلی و P_i توان هارمونیک‌ها است. مدارهای معادل استفاده شده برای محاسبه توان هر یک از این اجزاء، در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل، روابط زیر بین

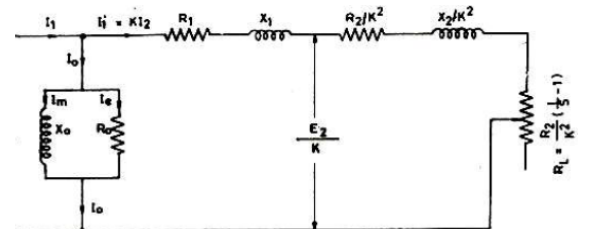
در [۵۱، ۶۴] نشان داده شده است که در تخمین بازده موتور توسط روش مدار معادل الکتریکی، تلفات هسته به درستی تخمین زده نمی‌شود که دلیل آن، کوچک بودن جریان مقاومت معادل تلفات هسته، نسبت به جریان موتور است. همچنین، در مرجع [۶۴] نیز نشان داده شده است که هر چند کلاس طراحی موتور در انتخاب نسبت بین رآکتانس پراکندگی استاتور به رآکتانس موتور تأثیر دارد، اما تأثیر این انتخاب بر مقدار تخمینی بازده، به ویژه در بارهای زیاد، قابل توجه نیست.

۳-۲- تخمین بازده موتور با ولتاژ تغذیه نامتعادل

در حالتی که ولتاژ تغذیه موتور نامتعادل و یا هارمونیک باشد نیز می‌توان به کمک تخمین عناصر مدارهای معادل مؤلفه مثبت، منفی و یا مؤلفه‌های هارمونیک، بازده موتور القایی سه‌فاز را تخمین زد. مدارهای معادل موتور، در حالت نامتعادلی ولتاژ، در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل، R_1 مقاومت استاتور، X_1 اندوکتانس پراکندگی استاتور، R_2 مقاومت مؤلفه مثبت روتور، X_2 اندوکتانس پراکندگی مؤلفه مثبت روتور، R_3 مقاومت مؤلفه منفی روتور، X_3 اندوکتانس پراکندگی مؤلفه منفی روتور، X_m اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی و R_m مقاومت مدل‌کننده تلفات هسته است. مقاومت R_{st} نیز مدل‌کننده تلفات بار پراکنده است. در شرایط نامتعادلی ولتاژ، بازده موتور (با توجه به شکل (۵)) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۶۵]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{|P_{out,P}| - |P_{out,N}| - P_{fw}}{|P_{in,P}| + |P_{in,N}|} \quad (۲۲)$$

که در آن، $P_{in,P}$ ، $P_{in,N}$ ، $P_{out,P}$ ، $P_{out,N}$ و P_{fw} به ترتیب عبارتند از: توان خروجی توالی مثبت، توان خروجی توالی منفی، توان ورودی توالی مثبت و توان ورودی توالی منفی. همچنین، P_{fw} توان بادخوری و اصطکاک است. اگر مؤلفه‌های مثبت و منفی جریان استاتور و



شکل (۴): مدار معادل ساده شده موتور سه‌فاز القایی [۶۰]

توان حقیقی موتور، پس از اندازه‌گیری آن‌ها، استخراج شود، در هر نقطه کاری موتور، چهار مقدار معلوم و ۸ مجهول دارید. مجهول‌ها که عناصر مدارهای معادل مؤلفه مثبت و منفی هستند، به کمک روش‌ها بهینه‌سازی، مانند الگوریتم ژنتیک، محاسبه می‌شود [۶۵-۶۷].

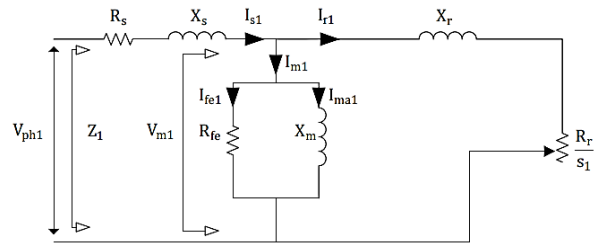
مقدار لغزش‌های سرعت موتور، برقرار است:

$$s_2 = 2 - s_1 \quad (27)$$

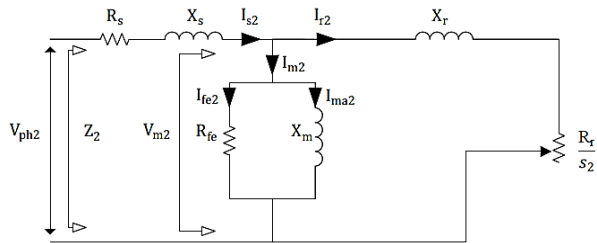
$$s_k^+ = (1 - k) + ks_1 \quad (28)$$

$$s_k^- = (1 + k) - ks_1 \quad (29)$$

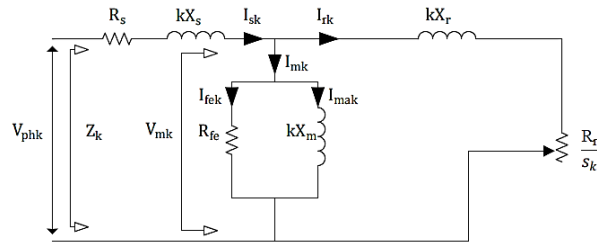
که در آن، s_1 لغزش مؤلفه مثبت، s_2 لغزش مؤلفه منفی، s_k^+ و s_k^- لغزش مؤلفه‌های مثبت و منفی هارمونیک‌ها هستند.



(الف)



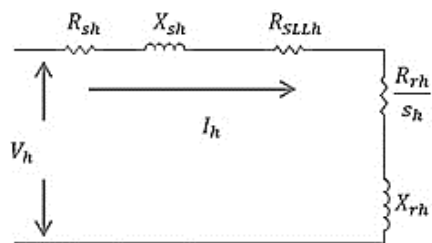
(ب)



(ج)

شکل (۶): مدارهای معادل موتور القایی سه‌فاز با ولتاژ تغذیه نامتعادل:

(الف) توالی مثبت، (ب) توالی منفی و (ج) هارمونیک‌ها [۱۷]



شکل (۷): مدار معادل هارمونیک موتور سه‌فاز القایی [۶۹]

در مراجع [۶۹ و ۷۰] از مدار معادل ساده‌تری که در شکل (۷) نشان داده شده است، برای بررسی اثر هارمونیک‌ها در مقدار بازده موتور القایی سه‌فاز، در شرایط نامتعادلی ولتاژ و یا تغذیه با اینورتر، استفاده شده است. اندیس h نشان دهنده هارمونیک شماره h ولتاژ تغذیه موتور است. تلفات مسی استاتور (P_{stator})، با

صرف نظر از اثر پوستی در هادی‌های آن، برابر است با:

$$P_{stator} = mR_s (I_s^2 + I_n^2) \quad (30)$$

که در آن، m تعداد فازهای استاتور و I_s جریان مؤلفه اصلی است. مقدار مؤثر مؤلفه‌های هارمونیک است و برابر است با:

$$I_n = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (31)$$

که در آن I_h جریان هارمونیک h است.

مقاومت روتور و اندوکتانس پراکنده روتور، تغییرات زیادی با هارمونیک‌ها دارند و نیاز است به‌صورت جداگانه محاسبه شوند. تغییرات مقاومت استاتور، مقاومت معادل تلفات بار پراکنده و راکتانس پراکنده استاتور در مدار معادل هارمونیک را به‌صورت زیر می‌توان تخمین زد [۷۰]:

$$R_{Sh} = R_s \quad (32)$$

$$R_{SSLh} = h^{0.8} R_{SSL1} \quad (33)$$

$$X_{Sh} = hX_s \quad (34)$$

که در آن، R_s و X_s مقاومت و اندوکتانس پراکنده مدار معادل برای مؤلفه اصلی است. R_{SSL1} و R_{SSLh} نیز به ترتیب، مقاومت معادل تلفات بار پراکنده مؤلفه اصلی و هارمونیک h است.

۳-۳- تخمین بازده موتور به کمک آزمایش بی‌باری

گاهی، موتور در حین کار نیست، ولی توان نامی آن بالاتر از ظرفیت تجهیزات اندازه‌گیری گشتاور موجود در آزمایشگاه، برای اندازه‌گیری بازده است. در این شرایط، از روش‌های استاندارد غیر مستقیم، برای اندازه‌گیری بازده موتور استفاده می‌شود. در این روش‌ها، پارامترهای موتور بر اساس آزمون‌های بی‌باری و روتور قفل شده مشخص می‌شود [۲۱ و ۲۳]. یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر صحت تخمین بازده توسط این روش‌ها، تخمین یا اصلاح پارامترهای موتور، در شرایط نامی و در حالت تعادل دمایی موتور است. به همین دلیل، نیاز است که دمای نامی موتور مشخص باشد؛ از طریق اندازه‌گیری دما، پس از قرار دادن موتور در شرایط بار نامی و به مدت زمان نسبتاً طولانی (۲ تا ۸ ساعت)، دمای نامی موتور به‌دست می‌آید [۷۱]. در مراجع [۷۱ و ۷۲] روشی برای تخمین دمای نامی موتور پیشنهاد شده است که فقط به آزمون بار نامی، به مدت ۳۰ دقیقه نیاز دارد. با خطی کردن و برون‌یابی منحنی تغییرات سرعت موتور با دما در مدت زمان ۳۰ دقیقه، دمای نامی موتور با استفاده از سرعت نامی آن (درج شده بر پلاک موتور) به‌دست می‌آید.

مقدار X_1 که از این روش به دست می آید، برابر با راکتانس استاتور، در زمانی است که موتور در بی باری و با ولتاژ نامی تغذیه می شود. همچنین، راکتانس معادل از دید ورودی مدار معادل موتور ($X_{in,Rated}$)، در حالت تغذیه با ولتاژ نامی، برابر است با:

$$X_{M,Rated} = X_{in,Rated} - X_1 \quad (۴۷)$$

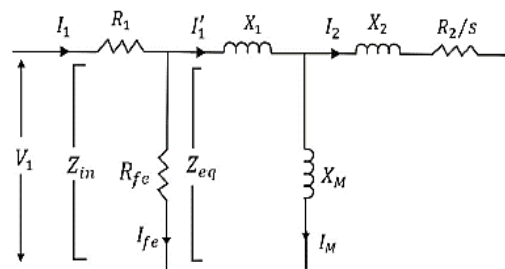
در مرجع [۲۵] روش مشابهی برای محاسبه بازده موتور القایی سه فاز به کار گرفته شده است، با این تفاوت که آزمایش بی باری در چند نقطه (حداقل ۵ نقطه)، شامل ولتاژ نامی یا نزدیک به ولتاژ نامی و به صورت کاهشی، تا ولتاژی که در مقادیر کمتر از آن، جریان موتور افزایش می یابد، انجام می شود. با حذف تلفات مسی از مقدار توان ورودی موتور و استفاده از خطی کردن این اطلاعات، تلفات بی باری و اصطکاک محاسبه می شود. بیشینه راکتانس ($X_{in,Max}$) و کمینه راکتانس ($X_{in,Min}$) موتور نیز از رسم نمودار راکتانس مدار معادل بر حسب ولتاژ فاز موتور، استخراج و راکتانس های X_1 و X_m محاسبه می شود.

در مراجع [۷۴ و ۷۵] با فرض اینکه زمان راه اندازی موتور در ولتاژ کاهش یافته، به قدر کافی زیاد است که بتوان در مقاطع زمانی کوتاه مدت، سرعت موتور را ثابت فرض کرد، استفاده از مدار معادل نشان داده شده در شکل (۸) (به جای انجام آزمایش امیدانس) پیشنهاد شده است. برای ساده شدن محاسبات، موقعیت مقاومت مدل کننده تلفات هسته در استاتور، به صورت نشان داده شده در این شکل، تغییر کرده است. امیدانس ورودی این مدار در یک نقطه کاری، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Z_{in}(s) = R(s) + jX(s) \quad (۴۸)$$

$$R(s) = R_1 + \left(\frac{R_{fe} R_{eq}^2 + R_{eq} R_{fe}^2 + R_{fe} X_{eq}^2}{(R_{fe} + R_{eq})^2 + X_{eq}^2} \right) \quad (۴۹)$$

$$X(s) = \left(\frac{R_{fe} X_{eq}^2}{(R_{fe} + R_{eq})^2 + X_{eq}^2} \right) \quad (۵۰)$$



شکل (۸): مدل ماشین القایی در راه اندازی با ولتاژ کم [۷۵]

در مرجع [۷۳] پیشنهاد شده است که به جای انجام آزمایش استاندارد امیدانس (بر اساس اطلاعات به دست آمده از آزمایش روتور قفل شده)، ولتاژ موتور به مقداری کاهش یابد که لغزش موتور در حالت بی باری، برابر لغزش موتور در توان نامی موتور شود. با استفاده از اطلاعات این آزمایش و محاسبه های تکراری زیر، پارامترهای موتور محاسبه می شود. روش تکراری به این صورت است که اگر راکتانس معادل از دید ورودی مدار معادل موتور القایی سه فاز با $X_{in,Min}$ نمایش داده شود، خواهید داشت:

$$X_1 = X \frac{(X_1/X_2)}{1 + (X_1/X_2)} \quad (۳۵)$$

که در آن، $X = X_{in,Min} = X_1 + X_2$ است. نسبت X_1/X_2 نیز با توجه به کلاس طراحی ماشین تعیین می شود. سایر پارامترهای ماشین، در هر تکرار، با استفاده از روابط زیر، محاسبه می شود:

$$X_m = X_{in,Max} - X_1 \quad (۳۶)$$

$$\theta_1 = -\arccos\left(\frac{P_m}{3V_1 I_1}\right) \quad (۳۷)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{-I_1(R_1 \sin \theta_1 + X_1 \cos \theta_1)}{V_1 - I_1(R_1 \cos \theta_1 - X_1 \sin \theta_1)}\right) \quad (۳۸)$$

$$V_2^2 = [V_1 - I_1(R_1 \cos \theta_1 - X_1 \sin \theta_1)]^2 + [I_1(R_1 \sin \theta_1 + X_1 \cos \theta_1)]^2 \quad (۳۹)$$

$$I_M = \frac{V_2}{X_M} \quad (۴۰)$$

$$R_C = \frac{V_2^2}{P_C/3} \quad (۴۱)$$

$$I_C = \frac{V_2}{R_C} \quad (۴۲)$$

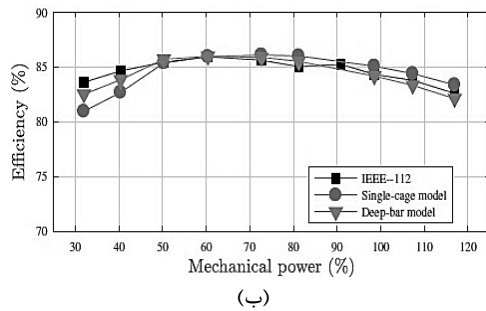
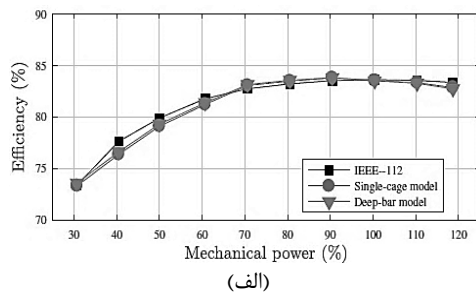
$$I_2^2 = [I_1 \cos \theta_1 - I_M \sin \theta_2 - I_C \cos \theta_2]^2 + [I_1 \sin \theta_1 + I_M \cos \theta_2 - I_C \sin \theta_2]^2 \quad (۴۳)$$

$$X_2 = \frac{-V_1 I_1 \sin \theta_1 - I_1^2 X_1 - I_M^2 X_M}{I_2^2} \quad (۴۴)$$

$$X = X_1 + X_2 \quad (۴۵)$$

که در آن، $X_{in,Max}$ بیشترین مقدار راکتانس دیده شده از دید ورودی مدار معادل موتور و در ولتاژ نامی است. این تکرارها، تا رسیدن به یک مقدار پایدار برای X_1 و X_2 ادامه می یابد. در ادامه، مقاومت روتور به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R_2 = s \sqrt{\left(\frac{V_2}{I_2}\right)^2 - X_2^2} \quad (۴۶)$$



شکل (۱۰): مقایسه محاسبه بازده موتورهای در نامتعادلی ولتاژ ۲٪ (الف) کلاس طراحی A و (ب) کلاس طراحی B [۶۲]

۴- روش تخمین گشتاور فاصله هوایی

استفاده از روش مدار معادل برای محاسبه بازده موتورهای القایی سه‌فاز، سابقه بیشتری از روش گشتاور فاصله هوایی دارد. از جمله عیب‌های این روش این است که در شرایط نامتعادلی ولتاژ، محاسبات مربوط به پارامترهای مدار معادل پیچیده است. همچنین، در این شرایط، امپدانس توالی منفی موتور، به دلیل تأثیر پذیرفتن از مقدار اشباع دندانه‌های استاتور، مقدار ثابتی نیست و با تغییر بار موتور، مقدار این امپدانس نیز تغییر می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تلفات بی‌باری موتور در شرایط نامتعادلی ولتاژ، شامل تمامی اجزای تلفات توالی منفی نمی‌شود؛ این مسئله، علاوه بر پیچیدگی محاسبات، دقت تخمین بازده را کاهش می‌دهد. در روش تخمین گشتاور فاصله هوایی این پیچیدگی‌ها در محاسبات وجود ندارد و به دلیل این که گشتاور فاصله هوایی بعد از تلفات استاتور محاسبه می‌شود، می‌تواند تلفات‌های اضافی ناشی از نامتعادلی ولتاژ را به خوبی در محاسبات لحاظ نماید [۷۶]. البته بررسی‌های انجام شده در مراجع [۷۷ و ۷۸] نشان می‌دهد که تخمین بازده توسط روش گشتاور فاصله هوایی، در شرایط نامتعادلی ولتاژ (تا حداکثر ۵٪)، تا ۲/۵٪ کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده بازده توسط روش مستقیم است.

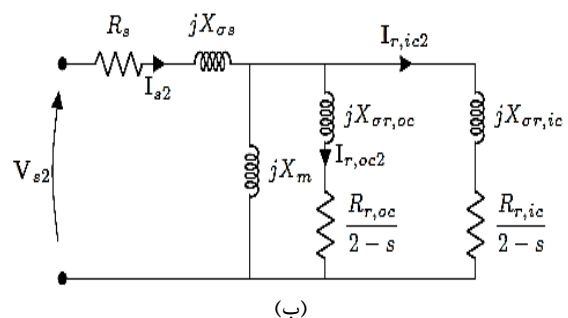
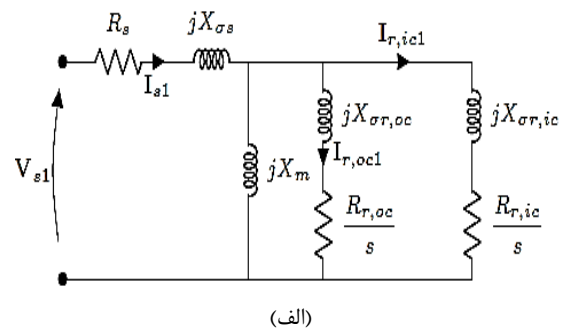
اندازه‌گیری‌های لازم و اجزای توان و تلفات در موتورهای القایی سه‌فاز، در روش محاسبه بازده بر اساس تخمین گشتاور فاصله هوایی، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. بازده موتور در

$$R_{eq} = \frac{X_M^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_M)^2} \quad (51)$$

$$X_{eq} = X_1 + \frac{X_M \left(\left(\frac{R_2}{s} \right) + X_2 (X_2 + X_M) \right)}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_M)^2} \quad (52)$$

این محاسبات در زمان‌های مختلف تکرار می‌شود و در نتیجه می‌توان نموداری از امپدانس مدار بر حسب لغزش موتور رسم کرد. عناصر مدار معادل، توسط روش کمینه‌سازی مربعات خطا و یا با کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند.

در مرجع [۶۲] مدار معادل نشان داده شده در شکل (۹) برای تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز قفسه‌سنجایی، با شیارهای عمیق در روتور، پیشنهاد شده است. عناصر این مدارهای معادل، با استفاده از روش تخمین پارامترها در راه‌اندازی موتور، محاسبه شده است. نتایج محاسبات که در شکل (۱۰) رسم شده است، نشان می‌دهد که در حالت وجود نامتعادلی در ولتاژ، محاسبه بازده موتور با طراحی کلاس B (شیار عمیق) با استفاده از مدارهای معادل شکل (۹)، به نتایج اندازه‌گیری بازده بر اساس استاندارد IEEE 112، نزدیک‌تر از حالتی است بازده این موتور، از مدار معادل معمول موتور القایی سه‌فاز محاسبه می‌شود.



شکل (۹): مدار معادل موتورهای با شیار عمیق: (الف) توالی مثبت و (ب) توالی منفی [۶۲]

$$\psi_b = \int (v_b - R_s i_b) dt \quad (58)$$

$$\psi_c = \int (v_c - R_s i_c) dt \quad (59)$$

البته روابط فوق، به صورت ترکیبی هم می تواند مورد استفاده قرار بگیرد [۷۹]:

$$T_{ag} = \frac{p}{2\sqrt{3}} \left\{ \begin{aligned} & (i_A - i_B) \cdot \int [v_{CA} - r(i_C - i_A)] dt \\ & - (i_C - i_A) \cdot \int [v_{AB} - r(i_A - i_B)] dt \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

که در آن، p تعداد قطب‌ها، i_A و i_B و i_C جریان‌های خط استاتور، v_{CA} و ولتاژهای خط استاتور و r مقاومت یک فاز استاتور است. این رابطه برای سیم‌بندی‌های ستاره و مثلث و حالتی که موتور به شبکه متصل است و یا با اینورتر تغذیه می‌شود، قابل استفاده است. البته خطی بودن مدار مغناطیسی موتور، از پیش‌فرض‌های استفاده از این رابطه است. بنابراین، اثر اشباع در اندوکتانس‌های خودی و متقابل و نامتعدالی در آن‌ها (در اثر عواملی مانند اندوکتانس پراکنده و اشباع محلی)، منابع خطا در تخمین گشتاور، در این روش هستند [۸۱].

با فرض قابل نظر بودن جریان‌ها و ولتاژهای توالی صفر، گشتاور فاصله هوایی و توان ورودی، از رابطه‌های زیر نیز قابل محاسبه است [۸۲]:

$$T_{ag} = \frac{\sqrt{3}p}{6} \{ i_a - i_b \} \cdot \int [v_{ca} + r_s(2i_a + i_b)] dt \quad (61)$$

$$+ (2i_a + i_b) \cdot \int [v_{ab} - r_s(i_a - i_b)] dt$$

$$P_{in} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_{ca} (i_a + i_b) - v_{ab} i_b \quad (62)$$

که در آن، v_a ، v_b و v_c ولتاژ فازها و i_a ، i_b و i_c جریان فازهای استاتور هستند.

گشتاور فاصله هوایی، با استفاده از جریان‌ها و ولتاژها در فضای دو محوری dq (فضای پارک)، نیز قابل محاسبه است [۸۳ و ۸۴]:

$$T_{ag} = \frac{3P}{4} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (63)$$

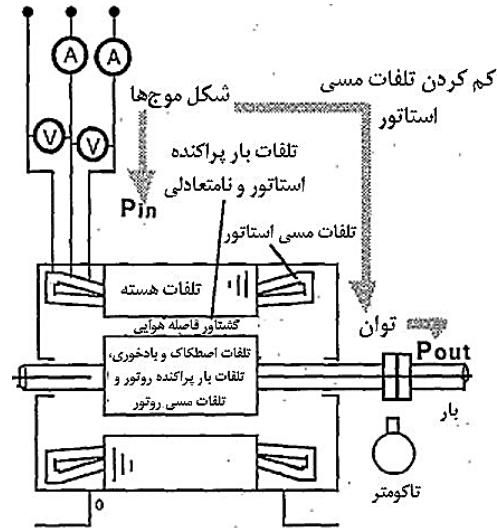
در این رابطه، i_{qs} و i_{ds} جریان موتور در راستای دو محور d و q است. همچنین، ψ_{ds} و ψ_{qs} نیز شار دربرگیرنده سیم‌پیچی فازها در راستای این دو محور است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\psi_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (64)$$

$$\psi_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (65)$$

این روش، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷۹ و ۸۰]:

$$\eta = \frac{T_{ag} \frac{2\pi(rpm)}{60} - T_{ag,nl} \frac{2\pi(rpm)}{60} - P_{stray}}{P_{in}} \quad (53)$$



شکل (۱۱): نحوه اندازه‌گیری‌ها و اجزای توان و تلفات در روش تخمین گشتاور فاصله هوایی [۷۹]

که در آن، rpm سرعت موتور بر حسب دور در دقیقه و P_{stray} تلفات بار پراکنده است، T_{ag} و $T_{ag,nl}$ به ترتیب، گشتاور فاصله هوایی در بار مورد نظر و گشتاور فاصله هوایی در بی‌باری است. رابطه زیر برای محاسبه بازده، معادل با رابطه (۵۳) است [۶۸]:

$$\eta = \frac{T_{ag} \omega_m - P_{core} - P_{fw} - P_{stray}}{P_{in}} \quad (54)$$

که در آن، P_{core} و P_{fw} به ترتیب، تلفات هسته و تلفات بادخوری و اصطکاک است، ω_m سرعت موتور بر حسب رادیان بر ثانیه و P_{in} نیز توان ورودی موتور است که به این صورت محاسبه می‌شود:

$$P_{in} = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt \quad (55)$$

که در آن، v_a ، v_b و v_c ولتاژ فازها و i_a ، i_b و i_c جریان فازهای استاتور هستند. گشتاور فاصله هوایی، به این صورت محاسبه می‌شود [۸۱]:

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} [i_a (\psi_c - \psi_b) + i_b (\psi_a - \psi_c) + i_c (\psi_b - \psi_a)] \quad (56)$$

که در آن، p تعداد قطب‌های موتور است، ψ_a ، ψ_b و ψ_c نیز شار دربرگیرنده سیم‌پیچی‌های سه فاز استاتور هستند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\psi_a = \int (v_a - R_s i_a) dt \quad (57)$$

در روابط فوق مشاهده می‌شود که برای محاسبه گشتاور فاصله هوایی، به داشتن مقدار مقاومت هر فاز استاتور نیاز است. در صورت نبودن امکان اندازه‌گیری آن، می‌توان با استفاده از اطلاعات پلاک موتور و کمک گرفتن از محاسبه گشتاور فاصله هوایی، مقدار آن را تخمین زد؛ به این صورت که در شرایط نامی عملکرد موتور، ابتدا یک مقدار اولیه برای مقاومت استاتور فرض می‌شود، سپس گشتاور فاصله هوایی موتور محاسبه می‌شود. مقدار محاسبه شده گشتاور با مقدار نامی گشتاور موتور مقایسه می‌شود. این محاسبات تکرار می‌شود تا این که گشتاور محاسبه شده به مقدار گشتاور نامی موتور همگرا شود. لازم به ذکر است، از آنجایی که گشتاور فاصله هوایی با گشتاور موتور مقایسه می‌شود و اختلاف آن‌ها فقط با تغییر مقاومت استاتور پوشش داده می‌شود، مقدار تلفات مقاومتی استاتور که از این روش به دست می‌آید، شامل تلفات نامی مکانیکی موتور نیز می‌شود [۴۵، ۸۵ و ۸۷].

شایان ذکر است که یکی از منابع مهم خطا در محاسبه بازده موتور، تخمین اجزای تلفات در موتور است؛ روش تخمین تلفات بار پراکنده و تلفات بادخوری و اصطکاک، در بخش‌های قبلی، بر اساس مقاله‌ها این حوزه، بررسی شده است. اما در این مقاله‌ها، رابطه‌ای برای تخمین تلفات هسته، بر اساس مشخصات نامی موتور ارائه نشده است. مقدار این تلفات در روش مدار معادل محاسبه می‌شود، ولی در روش گشتاور فاصله هوایی، راهی برای تخمین آن نیست. برای حل این مشکل، در مرجع [۱۵] فرض شده است که مجموع تلفات ثابت موتور القایی سه‌فاز (تلفات هسته و تلفات بادخوری و اصطکاک) ۳/۵ درصد توان نامی ورودی است. قابل توجه است که این فرض باعث می‌شود که در شرایط نامتعادلی ولتاژ و یا افزایش کاهش ولتاژ تغذیه موتور، مقدار خطای تخمین بازده موتور در روش گشتاور فاصله هوایی (به ویژه در بارهای کم)، قابل توجه باشد [۶۸].

۵- مقایسه روش‌های تخمین بازده در حین کار

تلفات در موتورهای الکتریکی به دو دسته تلفات ثابت و تلفات متغیر با بار تقسیم می‌شوند. در جدول (۵)، تلفات موتورهای القایی سه‌فاز، غیر از تلفات‌های اهمی، با هم مقایسه شده‌اند. در این زمینه، توجه به چند نکته ضروری است.

به جای استفاده از روابط انتگرالی برای محاسبه توان مصرفی و گشتاور فاصله هوایی در موتور القایی سه‌فاز، از روابط فیزیوری نیز می‌توان استفاده کرد. در شرایط تعادل ولتاژ و نبودن هارمونیک‌ها، این روابط به صورت زیر است [۸۵ و ۸۶]:

$$T_{ag} = \frac{1}{\omega_e} \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left[V_{as} I_{as} \cos(\varphi_v - \varphi_i) - r_s I_s^2 \right] \quad (۶۶)$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} V_{as} I_{as} \cos(\varphi_v - \varphi_i) \quad (۶۷)$$

که در آن‌ها، V_{as} و I_{as} دامنه ولتاژ و جریان یک فاز، ω_e و به ترتیب، تعداد قطب‌های موتور و سرعت سنکرون موتور است. همچنین، r_s مقاومت یک فاز استاتور و φ_i و φ_v به ترتیب، زاویه فاز ولتاژ استاتور و جریان استاتور است. در شرایط نامتعادلی ولتاژ تغذیه موتور، روابط فوق به شکل زیر اصلاح می‌شوند [۸۵]:

$$T_{ag} = \frac{1}{\omega_e} \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left\{ \left[\operatorname{Re}(V_{sp} I_{sp}^*) - r_s I_{sp}^2 \right] + \left[\operatorname{Re}(V_{sn} I_{sn}^*) - r_s I_{sn}^2 \right] \right\} \quad (۶۸)$$

که در آن، V_{sp} و I_{sp} فیزورهای توالی مثبت و V_{sn} و I_{sn} فیزورهای توالی منفی ولتاژ و جریان استاتور هستند. همچنین، I_{sp} و I_{sn} به ترتیب، دامنه توالی مثبت و منفی جریان استاتور هستند. علامت "*" نشان دهنده مزدوج فیزور است. در صورتی که امپدانس‌های مثبت (Z_{sp}) و منفی (Z_{sn}) موتور مشخص باشند، گشتاور فاصله هوایی، بر اساس جریان و ولتاژ یک فاز، از رابطه زیر نیز قابل محاسبه است:

$$T_{ag} = \frac{1}{\omega_e} \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left\{ \left[\operatorname{Re}(Z_{sp}) - r_s \right] \left| \frac{V_{as} - Z_{sn} I_{as}}{Z_{sp} - Z_{sn}} \right|^2 + \left[\operatorname{Re}(Z_{sn}) - r_s \right] \left| \frac{-V_{as} + Z_{sp} I_{as}}{Z_{sp} - Z_{sn}} \right|^2 \right\} \quad (۶۹)$$

پس از محاسبه گشتاور فاصله هوایی (T_{ag}) توسط یکی از روش‌های فوق، گشتاور خروجی موتور (T_{shaft}) با استفاده از رابطه زیر، محاسبه می‌شود [۸۲]:

$$T_{shaft} = T_{ag} - \frac{P_{fw}}{\omega_r} - \frac{P_{stray}}{\omega_r} \quad (۷۰)$$

که در آن، P_{fw} و P_{stray} به ترتیب تلفات بادخوری و اصطکاک و تلفات بار پراکنده روتور است.

جدول (۵): تلفات غیر اهمی در موتورهای القایی سه فاز

نوع تلفات	طریقه محاسبه	توضیحات
هسته (ثابت)	-	- در روش مدار معادل، جزء مجهولات مسئله است که محاسبه می‌شود. - در روش گشتاور فاصله هوایی، به عنوان بخشی از تلفات ثابت است که این تلفات ۳/۵ درصد توان نامی ورودی فرض می‌شود.
بار پراکنده (در شرایط نامی)	استاندارد IEEE 112	برای موتورهای الکتریکی با توان کمتر از ۵۰ کیلووات
	استاندارد IEC 60034-2-1	برای موتورهای الکتریکی با توان بیش از ۵۰ کیلووات
	$0.11 \times P_{in}$	مقدار متوسط برای تمامی توان‌ها
بادخوری و اصطکاک (ثابت)	مقاومت در مدار روتور	در روش مدار معادل
	$0.25 \times P_{in}$	موتور ۲ قطب
	$0.12 \times P_{in}$	موتور ۴ قطب
	$0.10 \times P_{in}$	موتور ۶ قطب

استفاده از روش مدار معادل الکتریکی، تقریب بهتری از بازده موتور در شرایط مختلف کاری آن، به دست می‌دهد. هر چند، به نظر می‌رسد که حجم محاسبات آن در شرایط نامتعادلی ولتاژ و وجود هارمونیک‌ها در ولتاژ تغذیه، بیشتر و پیچیده‌تر از روش تخمین گشتاور فاصله هوایی است. حجم مقاله‌ها منتشر شده در زمینه تخمین بازده موتور در حین کار، با استفاده از این دو روش نیز مؤید این جمع‌بندی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار، ارزیابی و با هم مقایسه شد. دو روش مهم پیشنهاد شده در مقاله‌ها برای تخمین بازده در حین کار، عبارتند از: روش مدار معادل و روش گشتاور فاصله هوایی. این روش‌ها از نظر طریقه محاسبه بازده موتور، بسیار شبیه روش‌های غیر مستقیم اندازه‌گیری بازده در استانداردها هستند. به همین دلیل، دقت روش‌های تخمین بازده در حین کار، به توان نامی موتور و سرعت آن وابسته است؛ هر چه توان موتور بیشتر و سرعت نامی آن کمتر باشد، مقدار بازده تخمین زده شده توسط این روش‌ها، به مقدار حاصل از اندازه‌گیری با استفاده از روش‌های استاندارد، نزدیک‌تر است. همچنین، میزان بازده تخمینی در بارهای کم، معمولاً بیشتر از آن چیزی است که از روش اندازه‌گیری مستقیم به دست می‌آید. یکی از مهم‌ترین دلایل این مسئله، فرضیات مربوط به مقدار اجزای تلفات در موتور الکتریکی است.

۱- این مقدارهای تخمینی، برای حالتی است که موتور با منبع سینوسی تغذیه می‌شود. در حالت‌هایی که موتور با مبدل PWM تغذیه می‌شود، نیاز به در نظر گرفتن اثر هارمونیک‌های فرکانس بالا، در تلفات موتور است که نیاز به بررسی‌های جداگانه دارد.

۲- با توجه به بررسی‌های انجام شده، به نظر می‌رسد که برای تخمین تلفات بار پراکنده، استفاده از مقاومت سری در مدار روتور و یا استفاده از رابطه $0.11 \times P_{in}$ ، تقریب بهتری از تلفات بار پراکنده به دست می‌دهد.

۳- ثابت فرض کردن مقدار مجموع تلفات، تلفات هسته و تلفات بادخوری و اصطکاک، باعث ایجاد خطا در تخمین بازده، به ویژه در بارهای کم، می‌شود.

۴- دما اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی اجزای تلفات موتور دارد و نیاز به اندازه‌گیری و یا تخمین آن، در حین محاسبه بازده است.

در جدول (۵) دیده می‌شود که تلفات هسته نیاز به بررسی‌های بیشتر برای تخمین مقدار آن، به کمک مقادیر نامی موتور دارد؛ اگر چه این تلفات به عنوان یکی از مجهولات در روش مدار معادل محاسبه می‌شود، اما مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مقدار تخمینی آن، توسط این روش نیز دقیق نیست و با اندازه‌گیری‌ها اختلاف قابل توجهی دارد.

اطلاعات مقایسه‌ای دو روش مهم تخمین بازده موتور، در جدول (۶)، به صورت خلاصه آورده شده است. با توجه به اطلاعات این جدول، می‌توان نتیجه گرفت که تخمین بازده موتور با

جدول (۶): مقایسه روش‌های تخمین بازده در حین کار

پارامتر/شرایط	روش مدار معادل	گشتاور فاصله هوایی
روش محاسبه بازده	استفاده از مدار معادل و تخمین پارامترها با کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی	محاسبه گشتاور فاصله هوایی موتور با استفاده از روابط انتگرالی
نامتعادلی ولتاژ تغذیه	به کمک مدار معادل توالی منفی، اثر آن لحاظ می‌شود.	در روابط محاسبه گشتاور، اثر آن لحاظ می‌شود.
هارمونیکی‌های ولتاژ تغذیه	به کمک مدار معادل هارمونیکی، اثر آن لحاظ می‌شود.	در روابط محاسبه گشتاور، اثر آن لحاظ می‌شود.
اشباع مدار مغناطیسی	در تخمین مقدار عناصر مدارهای معادل، اثر اشباع دیده می‌شود. در مدار مؤلفه منفی، خطای محاسباتی ایجاد می‌کند.	اشباع منبع ایجاد خطا در تخمین گشتاور فاصله هوایی است.
تلفات ثابت	تلفات هسته تخمین زده می‌شود (غیر دقیق). تلفات بادخوری و اصطکاک به کمک روابط تخمینی بر اساس توان نامی موتور، تخمین زده می‌شود.	مجموع تلفات ثابت، برابر $3/5$ درصد توان نامی موتور در نظر گرفته می‌شود.
تلفات مسی	تلفات مسی روتور و استاتور در مدار معادل محاسبه می‌شود.	نیازی به محاسبه جداگانه تلفات مسی نیست.
تلفات بار پراکنده	به صورت مقاومت در مدار روتور و یا تخمین بر اساس $0/11$ مقدار توان نامی ورودی، یا استانداردها محاسبه می‌شود.	به کمک تخمین بر اساس $0/11$ مقدار توان نامی ورودی، یا استانداردها محاسبه می‌شود.
منابع اصلی خطا در محاسبه بازده	- لحاظ کردن اثر دمای نقطه تعادل موتور بر مقاومت استاتور و سرعت نامی موتور - تخمین درست از تلفات هسته - پیاده‌سازی نادرست الگوریتم‌های بهینه‌سازی	- لحاظ کردن اثر دمای نقطه تعادل موتور بر مقاومت استاتور و سرعت نامی موتور - تخمین درست از تلفات ثابت (به ویژه تلفات هسته) - افزایش تجمعی خطا در محاسبات انتگرالی گشتاور

برای تخمین در حین کار بازده موتورهای القایی سه‌فاز نشان می‌دهد که روش مدار معادل، تخمین بهتری از بازده موتور، در شرایط مختلف کاری آن، به دست می‌دهد.

با توجه به ارزیابی و مقایسه انجام شده در مورد روش‌های تخمین تلفات در موتورهای القایی سه‌فاز، پیشنهادهای زیر نیز برای فعالیت‌های پژوهشی بیشتر در زمینه تخمین بازده موتورهای القایی سه‌فاز در حین کار، ارائه می‌شود:

۱- تخمینی از تلفات هسته بر اساس مقادیر نامی موتور، برای افزایش دقت تخمین بازده آن، ارائه شود.

۲- در شرایطی که موتور با مبدل تغذیه می‌شود، به داشتن تخمینی از تلفات بار پراکنده، تلفات هسته، تلفات بادخوری و اصطکاک، بر اساس مقادیر نامی موتور و فرکانس کلیدزنی مبدل، نیاز است.

۳- راهکاری برای به دست آوردن تخمین بهتری از مقدار تلفات ثابت در روش گشتاور فاصله هوایی، به ویژه تخمین تلفات هسته موتور، پیشنهاد شود.

تلفات در موتورهای القایی سه‌فاز، به دو دسته تقسیم شده است که عبارتند از: تلفات ثابت (شامل تلفات هسته و تلفات بادخوری و اصطکاک) و تلفات متغیر با بار (شامل تلفات اهمی و تلفات بار پراکنده). در این مقاله، روش‌های پیشنهادی در استانداردها و مقاله‌ها، برای تخمین تلفات بادخوری و اصطکاک و تلفات بار پراکنده نیز ارزیابی شد؛ این نتیجه به دست آمد که نیاز به رابطه‌ای برای تخمین تلفات هسته بر حسب مقادیر نامی موتور وجود دارد و کار پژوهشی بیشتری در این زمینه لازم است.

مقاومت استاتور و سرعت موتور، دو ورودی لازم برای روش‌های تخمین بازده موتور در حین کار هستند که بهتر است اندازه‌گیری شوند. این پارامترها از دمای کاری موتور تأثیر زیادی می‌پذیرند. نکته دیگر این است که سرعت نامی موتور که بر اساس استانداردها بر روی پلاک موتور درج می‌شود، دقت زیادی ندارد. در نتیجه، تخمین‌های بازده و یا مقاومت استاتور که بر اساس اعتماد به این مقدار انجام می‌شود، می‌تواند دچار خطای زیادی باشد؛ در صورت استفاده، به تحلیل حساسیت نیاز است.

مقایسه بین روش مدار معادل و روش گشتاور فاصله هوایی

۷- مراجع

- [13] J. César da Silva, T. Leite de Vasconcelos Lima, J.A. de Lucena Júnior, G. Jordão Lyra, F. Vidal Souto, H. de Souza Pimentel, F. Antônio Belo, A. Cavalcante Lima Filho, "Non-Invasive Method for In-Service Induction Motor Efficiency Estimation Based on Sound Acquisition," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3757, 2020.
- [14] H. Akbari Resketi, S. M. Mirimani, and J. Adabi Firouzjaee, "Technical and Economical Assessment of the Efficiency Improvement of Induction Motors after Rewinding," *Scientific Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 8, pp. 17-26, 2020 (In Persian).
- [15] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "A Nonintrusive and In-service Motor-efficiency Estimation Method Using Air-gap Torque with Considerations of Condition Monitoring," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, pp. 1666-1674, 2008.
- [16] T. Green, C. Hernandez-Aramburo, and A. Smith, "Losses in Gridand Inverter Supplied Induction Machine Drives," *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 150, pp. 712-724, 2003.
- [17] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "A Novel in Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-phase Induction Motors Operating with Distorted Unbalanced Voltages," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 5338-5347, 2017.
- [18] M. H. Aoukadi and A. Binder, "When Loads Stray: Evaluation of Different Measurement Methods to Determine Stray Load Losses in Induction Machines," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, pp. 21-30, 2008.
- [19] E. B. Agamloh, "An Evaluation of Induction Machine Stray Load Loss from Collated Test Results," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 2311-2318, 2010.
- [20] A. Nagorny, A. K. Wallace, and A. Jouanne, "Stray Load Loss Efficiency Connections," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 10, pp. 62-69, 2004.
- [21] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, *IEEE Std. 112-2017*, 2017.
- [22] A. De Almeida, F. J. Ferreira, J. F. Busch, and P. Angers, "Comparative Analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 Efficiency Testing Standards Using Stray Load Losses in Low-voltage Three-phase, Cage Induction Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 608-614, 2002.
- [23] Rotating Electrical Machines—Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery From Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles), Edition IIEC 60034-2-1, 2014.
- [24] P. Pillay, M. Al-Badri, P. Angers, and C. Desai, "A New Stray-load loss Formula for Small and Medium-sized Induction Motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, pp. 1221-1227, 2016.
- [25] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "A Novel Algorithm for Estimating Refurbished Three-phase
- [1] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-driven Systems," IEA report, 2011.
- [2] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and A. Pastorelli, "Induction Motor Efficiency Measurements in Accordance to IEEE 112-B, IEC 34-2 and JEC 37 International Standards," In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*, vol. 3, pp. 1599-1605, 2003.
- [3] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and M. Pastorelli, "International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: A Critical Analysis of the Stray-load Loss Determination," In *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, IEEE*, vol. 2, pp. 841-848, 2003.
- [4] B. Renier, K. Hameyer, and R. Belmans, "Comparison of Standards for Determining Efficiency of Three Phase Induction Motors," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 14, pp. 512-517, 1999.
- [5] E. B. Agamloh, "A Comparison of Direct and Indirect Measurement of Induction Motor Efficiency," In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 36-42, 2009.
- [6] E. B. Agamloh, "Induction Motor Efficiency," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, no. 6, pp. 20-28, 2011.
- [7] A. Wallace, A. Von Jouanne, E. Wiedenbrug, J. Douglass, C. Wohlgemuth, and G. Wainwright, "A Laboratory Assessment of In-service Motor Efficiency Testing Methods," In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, pp. WC1/7.1-WC1/7.3, 1997.
- [8] J. Kueck, "Development of a Method for Estimating Motor Efficiency and Analyzing Motor Condition," In *Conference Record of 1998 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No. 98CH36219)*, IEEE, pp. 67-72, 1998.
- [9] B. Lu, D. B. Durocher, and P. Stemper, "Online and Nonintrusive Continuous Motor Energy and Condition Monitoring in Process Industries," In *Conference Record of 2008 54th Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, IEEE*, pp. 18-26, 2008.
- [10] B. Herndler, P. Barendse, and M. Khan, "Error Analysis of Efficiency Estimation Methods for Induction Motors," In *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1498-1503, 2011.
- [11] V. Dlamini, R. Naidoo, and M. Manyage, "A Non-intrusive Compensated Slip Method for Motor Efficiency Estimation Using Vibration Signature Analysis," In *IEEE Africon'11*, pp. 1-6, 2011.
- [12] T. Doget, E. Etien, L. Rambault, and S. Cauet, "A PLL-Based Online Estimation of Induction Motor Consumption Without Electrical Measurement," *Electronics*, vol. 8, p. 469, 2019.

- Motor,” In IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077), vol. 1, pp. 392-397, 2000.
- [37] T. Phumiphak and C. Chat-Uthai, “An Economical Method for Induction Motor Field Efficiency Estimation for Use in On-site Energy Audit and Management,” In International Conference on Power System Technology, IEEE, vol. 2, pp. 1250-1254, 2004.
- [38] R. Marino, S. Peresada, and P. Tomei, “On-line Stator and Rotor Resistance Estimation for Induction Motors,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 8, pp. 570-579, 2000.
- [39] M. Raina and H. A. Toliyat, “Parameter Estimation of Induction Motors-A Review and Status Report,” In IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 37243), vol. 2, pp. 1327-1332, 2001.
- [40] E. Ghosh, F. Ahmed, M. M. Sangdehi, and N. C. Kar, “Temperature Influenced Online Stator Resistance Estimation Using an Improved Swarm Intelligence Technique for Induction Machine,” In IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1-6, 2015.
- [41] C.P. Salomon, W.C. Santana, L.E. da Silva, E.L. Bonaldi, L.E. de Oliveira, J.G. da Silva, G. Lambert-Torres, A.R. Donadon, “An Air-gap Torque Based Method for Efficiency Evaluation Using PSO to Estimate a New Concept of Stator Resistance Including the Losses Effect,” In *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 212-217, 2013.
- [42] A. Wallace and E. Widenbrug, “Motor efficiency Determination: From Testing Laboratory to Plant Installation,” In Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No. 99CH36338), IEEE, pp. 190-195, 1999.
- [43] A. G. Siraki, C. Gajjar, M. A. Khan, P. Barendse, and P. Pillay, “An Algorithm for Nonintrusive in Situ Efficiency Estimation of Induction Machines Operating with Unbalanced Supply Conditions,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, pp. 1890-1900, 2012.
- [44] H. Zhao, P. Li, G. Chen, Y. Wang, Y. Zhan, G. Xu, X. Liu, “Nonintrusive Efficiency Estimation for Large Power and High Voltage Induction Motors,” In IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 786-793, 2017.
- [45] L.E. da Silva, A.D. Cortez, C.P. Salomon, W.C. Santana, G. Lambert-Torres, E.L. Bonaldi, L.E. de Oliveira, J.G. da Silva, “Differential Evolution Based Air-Gap Torque Method Approach for Induction Motor Efficiency Estimation,” In 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), IEEE, pp. 1-6, 2015.
- [46] A. Singhal, A. Garg, S. Murthy, and V. Sandeep, “Online Parameter Determination and Performance Induction Motors Efficiency Using Only No-load Tests,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, pp. 615-625, 2014.
- [26] 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, pp. 326-333, 1998.
- [27] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, and M. Lazzari, “Induction Motor Equivalent Circuit Including the Stray Load Losses in the Machine Power Balance,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, pp. 796-803, 2008.
- [28] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, and M. Lazzari, “Impact of the Supply Voltage on the Stray-load Losses in Induction Motors,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, pp. 1374-1380, 2010.
- [29] J. S. Hsu, J. D. Kueck, M. Olszewski, D. A. Casada, P. J. Otaduy, and L. M. Tolbert, “Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods,” In IAS'96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, vol. 1, pp. 703-712, 1996.
- [30] [30] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “A Survey of Efficiency Estimation Methods of In-service Induction Motors with Considerations of Condition Monitoring Requirements,” In IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, pp. 1365-1372, 2005.
- [31] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “A Survey of Efficiency-estimation Methods for In-service Induction Motors,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, pp. 924-933, 2006.
- [32] J. R. Holmquist, J. A. Rooks, and M. E. Richter, “Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, pp. 242-248, 2004.
- [33] D. Sebastian, V. Manjusha, and R. Anto, “Energy Management of Induction Motors Using Non-intrusive Methods,” In International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), IEEE, pp. 767-772, 2013.
- [34] V. Dlamini, R. Bansal, and R. Naidoo, “An Improved Motor Replacement Strategy Using Non-intrusive Motor Efficiency Estimation,” In International Conference on the Eleventh industrial and Commercial Use of Energy, IEEE, pp. 1-8, 2014.
- [35] W. L. Silva, A. M. N. Lima, and A. Oliveira, “A Method for Measuring Torque of Squirrel-cage Induction Motors Without any Mechanical Sensor,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, pp. 1223-1231, 2014.
- [36] A. Charette, J. Xu, A. Ba-Razzouk, P. Pillay, and V. Rajagopalan, “The Use of the Genetic Algorithm for In-situ Efficiency Measurement of an induction

- Circuit Parameters of Three Phase Induction Motor Using Particle Swarm Optimization," In IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), pp. 1-5, 2016.
- [59] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "A Novel Full-load Efficiency Estimation Technique for induction Motors Operating with Unbalanced Voltages," In IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp. 35-40, 2015.
- [60] A. Mamizadeh and I. Iskender, "Designing of Induction Motor Efficiency Monitoring System without Using Torque Meter and Speed Sensor," In International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), IEEE, pp. 330-335 2017.
- [61] M. Torrent, "Estimation of Equivalent Circuits for Induction Motors in Steady State Including Mechanical and Stray Load Losses," European Transactions on Electrical Power, vol. 22, pp. 989-1015, 2012.
- [62] J. Rengifo, E. Albanex, J. Benzaquen, A. Bueno, and J. Aller, "Full-load Range In-situ Efficiency Estimation Method for Induction Motors Using Only a direct Start-up," In XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), IEEE, pp. 1213-1219 2018.
- [63] Y. El-Ibiary, "An Accurate Low-cost Method for Determining Electric Motors' Efficiency for the Purpose of Plant Energy Management," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, pp. 1205-1210, 2003.
- [64] C. S. Gajjar, J. M. Kinyua, M. A. Khan, and P. S. Barendse, "Analysis of a Nonintrusive Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Compared to the IEEE 112B and IEC 34-2-1 Standards," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, pp. 4541-4553, 2015.
- [65] A. G. Siraki and P. Pillay, "An in Situ Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Working with Unbalanced Supplies," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, pp. 85-95, 2011.
- [66] J. R. Gomez, E. C. Quispe, M. A. de Armas, and P. R. Viego, "Estimation of Induction Motor Efficiency In-situ under Unbalanced Voltages Using Genetic Algorithms," In 18th International Conference on Electrical Machines, IEEE, pp. 1-4, 2008.
- [67] M. Aminu, P. Barendse, and A. Khan, "A Simplified Equivalent Circuit Method for Induction Machine Nonintrusive Field Efficiency Estimation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, pp. 7301-7311, 2019.
- [68] A. G. Siraki and P. Pillay, "Comparison of Two Methods for Full-load in Situ Induction Motor Efficiency Estimation from Field Testing in the Presence of Over/Undervoltages and Unbalanced Supplies," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, pp. 1911-1921, 2012.
- Analysis of Three Phase Induction Motor Using Virtual Instrumentation," In IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), pp. 1-6, 2012.
- [47] A. N. Lima, C. B. Jacobina, and E. B. de Souza Filho, "Nonlinear Parameter Estimation of Steady-state Induction Machine Models," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, pp. 390-397, 1997.
- [48] P. Pillay, R. Nolan, and T. Haque, "Application of Genetic Algorithms to Motor Parameter Determination for Transient Torque Calculations," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, pp. 1273-1282, 1997.
- [49] H. A. Toliyat, E. Levi, and M. Raina, "A Review of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, pp. 271-283, 2003.
- [50] M. G. Bijan, M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "Induction Machine Parameter Range Constraints in Genetic Algorithm Based Efficiency Estimation Techniques," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, pp. 4186-4197, 2018.
- [51] B. Lu, W. Cao, I. French, K. J. Bradley, and T. G. Habetler, "Non-intrusive Efficiency Determination of In-service Induction Motors Using Genetic Algorithm and Air-gap Torque Methods," in IEEE Industry Applications Annual Meeting, pp. 1186-1192, 2007.
- [52] R. R. Bishop and G. G. Richards, "Identifying Induction Machine Parameters Using a Genetic Optimization Algorithm," In IEEE Proceedings on Southeastcon, pp. 476-479, 1990.
- [53] M. Çunkaş and T. Sağ, "Efficiency Determination of Induction Motors Using Multi-objective Evolutionary Algorithms," Advances in Engineering Software, vol. 41, pp. 255-261, 2010.
- [54] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "A Novel in Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-phase IM Using GA, IEEE Method F1 Calculations, and Pretested Motor Data," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, pp. 1092-1102, 2015.
- [55] V. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, and S. Subramanian, "Non-intrusive Efficiency Estimation Method for Energy Auditing and Management of In-service Induction Motor Using Bacterial Foraging Algorithm," IET Electric Power Applications, vol. 4, pp. 579-590, 2010.
- [56] V. S. Santos, P. V. Felipe, and J. G. Sarduy, "Bacterial Foraging Algorithm Application for Induction Motor Field Efficiency Estimation under Unbalanced Voltages," Measurement, vol. 46, pp. 2232-2237, 2013.
- [57] V. S. Santos, P. R. V. Felipe, J. R. G. Sarduy, N. A. Lemozy, A. Jurado, and E. C. Quispe, "Procedure for Determining Induction Motor Efficiency Working under Distorted Grid Voltages," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, pp. 331-339, 2014.
- [58] D. Bhowmick, M. Manna, and S. K. Chowdhury, "Online Estimation and Analysis of Equivalent

- vol. 11, pp. 489-494, 1996.
- [80] Y. Li and H. Yu, "Energy Management for Induction Motors Based on Nonintrusive Efficiency Estimation," In International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, pp. 1763-1766, 2007.
- [81] J. Hsu, H. Woodson, and W. Weldon, "Possible Errors in Measurement of Air-gap Torque Pulsations of Induction Motors," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 7, pp. 202-208, 1992.
- [82] M. M. Stopa, M. A. Saldanha, A.-S. A. Luiz, L. M. R. Baccarini, and G. A. Lacerda, "A Simple Torque Estimator for In-service Efficiency Determination of Induction Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, pp. 4967-4976, 2018.
- [83] F. V. de Carvalho, J. Pinto, L. B. da Silva, B. K. Bose, and G. L. Torres, "A DSP Based Torque Meter for Induction Motors," in IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2003.
- [84] C.P. Salomon, W.C. Santana, L.E. da Silva, E.L. Bonaldi, L.E. de Oliveira, J.G. da Silva, G. Lambert-Torres, A.R. Donadon, "A Stator Flux Synthesis Approach for Torque Estimation of Induction Motors Using a Modified Stator Resistance Considering the Losses Effect," In *International Electric Machines & Drives Conference*, IEEE, pp. 1369-1375, 2013.
- [85] C.P. Salomon, W.C. Sant'Ana, L.E. da Silva, G. Lambert-Torres, E.L. Bonaldi, L.E. de Oliveira, J.G. da Silva, "Induction Motor Efficiency Evaluation Using a New Concept of Stator Resistance," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, pp. 2908-2917, 2015.
- [86] M. M. Stopa, M. R. Resende, A.-S. A. Luiz, J. C. G. Justino, G. G. Rodrigues, and B. J. Cardoso Filho, "A Simple Torque Estimator for In-service Efficiency Determination of Inverter-fed Induction Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, pp. 2087-2096, 2020.
- [87] C. P. Salomon, W. C. Sant'Ana, G. Lambert-Torres, L. E. Borges da Silva, E. L. Bonaldi, and L. E. d. L. De Oliveira, "Comparison among Methods for Induction Motor Low-intrusive Efficiency Evaluation Including a New AGT Approach with a Modified Stator Resistance," *Energies*, vol. 11, pp. 691, 2018.
- [69] M. Chirindo, M. A. Khan, and P. S. Barendse, "Considerations for Nonintrusive Efficiency Estimation of Inverter-fed Induction Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, pp. 741-749, 2015.
- [70] P. G. Cummings, "Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-cage Motors," IEEE Transactions on industry applications, vol. 63, pp. 1121-1126, 1986.
- [71] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, "Induction Machine Rapid Performance Test," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, pp. 4685-4691, 2019.
- [72] M. G. Bijan and P. Pillay, "Efficiency Estimation of the Induction Machine by Particle Swarm Optimization Using Rapid Test Data with Range Constraints," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, pp. 5883-5894, 2019.
- [73] A. G. Siraki, P. Pillay, and P. Angers, "Full load Efficiency Estimation of Refurbished Induction Machines from No-load Testing," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 28, pp. 317-326, 2013.
- [74] W.-M. Lin, T.-J. Su, and R.-C. Wu, "Parameter Identification of Induction Machine with a Starting No-load Low-voltage Test," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, pp. 352-360, 2012.
- [75] M. Aminu, P. Barendse, and A. Khan, "Efficiency Estimation of Induction Machines Using Nonintrusive No-load Low Voltage Test," in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3171-3178, 2017.
- [76] J. S. Hsu and B. P. Scoggins, "Field Test of Motor Efficiency and load Changes Through Air-gap Torque," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, pp. 477-483, 1995.
- [77] B. L. Herndler, "Non-intrusive Efficiency Estimation of Induction Machines," University of Cape Town, 2010.
- [78] B. Herndler, P. Barendse, and M. Khan, "Considerations for Improving the Non-intrusive Efficiency Estimation of Induction Machines Using the Air Gap Torque Method," In IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp. 1516-1521, 2011.
- [79] J. S. Hsu and P. L. Sorenson, "Field Assessment of Induction Motor Efficiency Through Air-gap Torque," IEEE Transactions on Energy Conversion,