



Detecting Stator Core Interlaminar Insulation Failure in Three-phase Induction Motors

Bahram Nouri¹, Mansour Ojaghi*²

¹ Master's Graduate, Zanjan Electricity Distribution Company, Zanjan, Iran.

² Professor, Department of Electrical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 2025.03.12
Revised: 2025.07.07
Accepted: 2026.01.04

Keyword:
Online fault diagnosis
interlaminar insulation defect
laminated stator core
non-invasive method
three-phase induction motor

***Corresponding Author:**
Mansour Ojaghi
Email: mojaghi@znu.ac.ir

ABSTRACT

Fault occurrence in insulation coating of stator core lamina causes creating hot spot, growing the fault and expanding its area. Consequently, winding insulation breakdowns occur due to excessive temperature rise, which causes electrical machine to burnout. This paper aims to present a non-invasive method with online performing capability to detect the stator core interlaminar insulation fault in three-phase induction motors. Finite elements method is used to simulate the induction motor in healthy and faulty conditions. Then, frequency spectra of induced torque and stator current are compared in healthy and faulty conditions. The comparison shows creating or intensifying some harmonics due to the fault. Examining effects of the fault severity, motor load level and supply voltage unbalance on amplitudes of the harmonics, a specific harmonic next to 15th harmonic of the stator current is selected as the fault index. Occurring a rather weak fault, normalized amplitude of this harmonic rises from -88.11db to -55.57 db, and then, to -49.90 db by a small increase in the fault severity. From no-load to full-load, depending on the fault severity, amplitude of this harmonic may change up to 3.9 db. Stator voltages unbalance intensifies this harmonic in the healthy state, too, but not as much as its intensification due to the fault occurrence. Under fault condition, unbalance voltages effect on the amplitude of the selected harmonic is up to 2.5 db. Similar fault is created in a real induction motor and required tests are performed on it. The experimental test results approve the simulation results.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Three-phase induction motors (IMs) are the backbone of many industrial processes due to their simple structure, robustness, and low maintenance costs. These characteristics make them vital in various sectors, including manufacturing, energy, and transportation. Despite their reliability, these machines are not immune to internal faults, particularly in the stator core. Over time, various stresses such as thermal cycles, mechanical vibrations, and electrical transients can degrade insulation materials, leading to insulation-related failures. One of the most critical and less detectable faults is Interlaminar Insulation Defect (IID), which occurs when the insulation coating between laminated sheets of the stator core deteriorates. This defect leads to localized eddy currents, hot spots, insulation degradation, and ultimately machine failure. Traditional offline detection methods (such as the Electromagnetic Core Imperfection Detector - ELCID) require rotor removal and specialized sensors, making them impractical for continuous condition monitoring. Additionally, these techniques demand significant downtime and expert intervention, making them unsuitable for real-time fault detection. In this paper, a noninvasive, online detection method is proposed, based on analyzing the frequency spectra of stator currents and induced torque. This approach requires only terminal voltage and current measurements, making it both practical and cost-effective for real-world deployment. The ability to detect faults at an early stage without interrupting normal operation is a key advantage of this method, allowing for timely maintenance and reducing the risk of catastrophic failures.

Methodology

A 1.1 kW three-phase squirrel cage induction motor is modeled using the Finite Element Method (FEM) in ANSYS Electronics. The healthy motor and motors with simulated IID faults of varying severities (defect diameters) are analyzed. The numerical model considers the actual material properties, winding configurations, and operational conditions to ensure accurate representation of the fault characteristics. Figure 1 shows the 2D finite element mesh of the motor under different conditions.

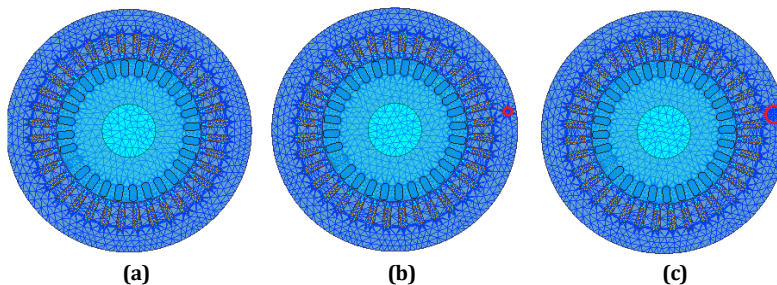


Figure 1. Two-dimensional meshing of the motor structure for simulation in: a) Healthy motor; b) Faulty motor with an IID cylinder of 6.5 mm diameter; c) Faulty motor with an IID cylinder of 10 mm diameter

The effect of IID is investigated by comparing induced torque spectra and stator current spectra. The IID fault disturbs the magnetic flux distribution, introducing new harmonics and modifying the amplitude of existing harmonics. These disturbances alter the motor's

electromechanical behavior which makes them detectable through spectral analysis. The methodology covers:

- Identifying harmonics linked directly to IID.
- Studying how harmonic amplitudes vary with fault severity, load level, and supply voltage imbalance.
- Selecting the most stable harmonic as the primary diagnostic index for IID detection.

Figure 2 illustrates the magnetic flux distribution in healthy and faulty motors and shows how the presence of IID disrupts the flux path, increasing leakage flux and creating abnormal local heating.

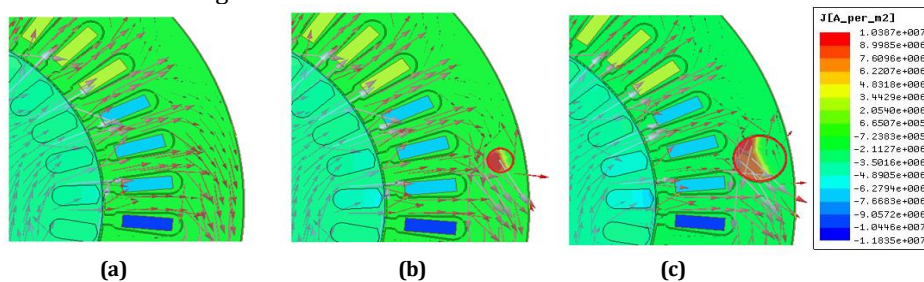


Figure 2 - Distribution of current density and magnetic field lines in the motor: a) Healthy, b) Faulty motor with an IID cylinder of 6.5 mm diameter; c) Faulty motor with an IID cylinder of 10 mm diameter.

Results and discussion

Simulation results clearly indicate that IID creates distinct spectral harmonics in both induced torque and stator currents. The spectral analysis allows for precise identification of fault-related harmonics, providing a robust foundation for condition monitoring. Key observations include:

- Specific harmonics, such as the third harmonic in stator current and the sixteenth harmonic in induced torque, show strong correlation with fault presence and severity.
- The spectral changes become more pronounced as the fault grows, providing a progressive index for fault.
- Effects of load variation show that certain harmonics are relatively load-independent, making them robust diagnostic features.
- The effect of unbalanced supply voltages is also studied, ensuring that the selected harmonics are not overly sensitive to supply disturbances.

Experimental validation was conducted on a real motor with an artificially induced IID. Figure 3 and Figure 4 depict the spectral analysis of the induced torque and stator currents, respectively. The experimental results confirm the reliability of the proposed diagnostic method, showing strong agreement with simulation results. This validation enhances the credibility of the method and proves its robustness under real-world industrial conditions.

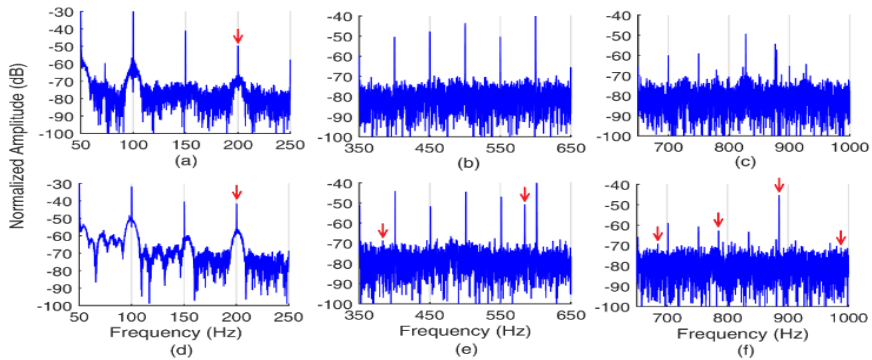


Figure 3. Normalized frequency spectrum of the induced torque under a load torque of 4.5 N.m in: a, b, c) Healthy motor; d, e, f) motor with IID fault at a diameter of 6.5 mm- Experimental results.

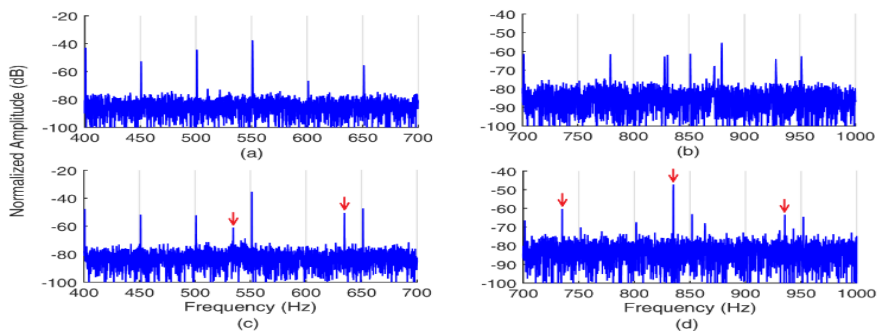


Figure 4. Normalized stator current spectrum under a load torque of 4.5 Nm in: a, b) Healthy motor; c, d) Motor with IID fault at a diameter of 6.5 mm- Experimental results.

Conclusion

This paper presents a comprehensive non-invasive online fault detection method for identifying IIDs in three-phase induction motors. By leveraging the natural electromechanical response of the motor to internal faults (reflected in its current and torque spectra), this approach eliminates the need for invasive sensors or rotor disassembly. The key contributions of this work are:

- Identification of reliable harmonic indicators for IID.
- Demonstration of direct correlation between harmonic amplitudes and fault severity.
- Validation under varying load and voltage imbalance conditions, ensuring real-world applicability.
- Successful experimental validation, bridging the gap between simulation and practice.

The proposed method provides a cost-effective, sensor-free solution for continuous condition monitoring in critical industrial machinery. Its simplicity and effectiveness make it an ideal candidate for smart predictive maintenance systems in modern industrial environments.



تشخیص خطای عایق میان لایه ورقه‌های هسته استاتور در موتورهای القایی سه فاز

بهرام نوری^۱، منصور اوجاچی^{۲*}

- ۱- کارشناسی ارشد، شرکت توزیع نیروی برق، زنجان، ایران.
- ۲- استاد، گروه مهندسی برق، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴ کلید واژگان: تشخیص خطای برخط خطای عایق میان لایه‌ای هسته استاتور موقر روش غیرتهاجمی موتور القایی سه فاز	وقوع خطا در پوشش عایقی ورقه‌های هسته استاتور باعث ایجاد نقطه داغ و رشد و گسترش محدوده خطا می‌شود. با ادامه این روند، به دلیل افزایش بیش‌ازحد دما، عایق سیم‌پیچ دچار شکست شده و سبب سوختن ماشین الکتریکی می‌گردد. هدف این مقاله ارائه روشی غیرتهاجمی با قابلیت اجرا بصورت آنلاین برای تشخیص خطای عایق میان لایه‌ای هسته استاتور در موتورهای القایی سه‌فاز است. از روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی موتور القایی در حالت‌های سالم و خطا استفاده می‌شود. سپس، طیف‌های فرکانسی گشتاور القایی و جریان استاتور در شرایط سالم و خطا مقایسه می‌شوند. نتایج مقایسه حاکی از پدید آمدن یا تقویت دامنه بعضی هارمونیک در اثر بروز خطا است. با بررسی میزان تأثیر شدت خطا، سطح بار موتور و ولتاژ تغذیه نامتعادل بر دامنه هارمونیک‌های مزبور، هارمونیک خاصی در مجاورت هارمونیک ۱۵ جریان استاتور به عنوان شاخص خطا انتخاب می‌شود. با وقوع خطای نسبتاً ضعیف، دامنه نرمالیزه این هارمونیک از ۸۸/۱۱- به ۵۷/۵۵- دسیبل رشد پیدا کرده و با کمی افزایش شدت خطا به ۴۹/۹۰- دسیبل می‌رسد. از بی‌باری تا بار کامل، بسته به شدت خطا، دامنه این هارمونیک حداکثر ۳/۹ دسیبل تغییر می‌کند. نامتعادل شدن ولتاژهای سه‌فاز استاتور هم موجب تقویت دامنه این هارمونیک در حالت سالم می‌شود ولی در حد تقویت ناشی از بروز خطا نیست. در شرایط خطا میزان تأثیر نامتعادلی ولتاژهای سه‌فاز بر دامنه هارمونیک منتخب در حد ۲/۵ دسیبل است. خطای مشابه در یک موتور القایی واقعی ایجاد شده و آزمایش‌های لازم روی آن انجام می‌پذیرد. نتایج آزمایشگاهی حاصله نتایج شبیه‌سازی را تأیید می‌نماید.

*نویسنده مسئول: منصور اوجاچی
پست الکترونیکی:
mojaghi@znu.ac.ir



۱. مقدمه

موتورهای القایی سه فاز به دلیل مزایایی که دارند به طور گسترده در صنایع مختلف بکار می‌روند. اگرچه این نوع موتورها بسیار مقاوم بوده و قابلیت اطمینان بالایی دارند، اما وقوع خطا در آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. برخی خطاها در صورت بروز و پیشرفت، آسیب‌های جدی به موتور وارد کرده و منجر به توقف کار موتور و خط تولید می‌شوند که ضرر مالی زیادی به صنایع وارد می‌سازد [۱-۲]. خطاهای موتور القایی در سه دسته کلی زیر جای می‌گیرند [۳]:

- خطاهای استاتور شامل خطاهای سیم‌پیچ و هسته آن
 - خطاهای روتور شامل شکستگی میله و حلقه انتهایی آن
 - خطاهای مکانیکی شامل خطاهای یاتاقان و ناهم‌محوری و ...
- حدود ۴۰-۵۰ درصد از عیوب موتور القایی مربوط به خطاهای یاتاقان و ۳۰-۴۰ درصد آن‌ها مربوط به خطاهای استاتور می‌شود [۴].

تشخیص خطاها در مراحل اولیه امری بسیار ضروری است زیرا گسترش آن‌ها سبب وقوع خرابی عمده و شکست کامل ماشین الکتریکی می‌شود [۵-۶]. خطاهای مختلف موجب ظهور برخی شاخص‌های خاص در عملکرد ماشین می‌شوند. با پایش این شاخص‌ها می‌توان خطاها را در مراحل اولیه وقوع تشخیص داد. بسته به نوع شاخص بکار رفته برای تشخیص خطا، برخی از روش‌های پایش نیاز به نصب سنسورهای ویژه بر روی بدنه موتور دارند که چنین روش‌هایی را روش‌های پایش وضعیت تهاجمی می‌نامند. از سوی دیگر، برخی از روش‌ها از اثرات عیب بر سیگنال‌های جریان و/یا ولتاژ استاتور به عنوان شاخص‌های خطا استفاده می‌کنند که اندازه‌گیری این سیگنال‌ها در اتاق تغذیه و کنترل بدون نیاز به نصب سنسور(ها) روی بدنه موتور قابل انجام است؛ لذا به این گونه روش‌ها، روش‌های پایش وضعیت غیرتهاجمی اطلاق می‌شود. روش‌های تهاجمی دارای معایبی مانند مشکل نصب سنسور، تحت تأثیر قرار گرفتن از عملکرد تجهیزات مجاور، عدم توانایی کافی در تشخیص عیوب ضعیف و ... می‌باشند. از طرف دیگر روش‌های غیرتهاجمی دارای مزایایی نظیر امکان پایش از راه دور، پیاده‌سازی ساده، تجهیزات اضافی کمتر و ... می‌باشند [۷].

در ماشین‌های الکتریکی، هسته استاتور نقش مهمی در نگهداری سیم‌پیچ‌های استاتور و ایجاد مدار مغناطیسی با رلوکتانس کم دارد که موجب تمرکز خطوط شار می‌شود. این هسته اغلب از ورقه‌های مغناطیسی با پوشش عایقی تشکیل می‌شود تا جریان گردابی و تلفات آن به حداقل برسد. ورقه‌های هسته اغلب به هم فشرده می‌شوند و به قاب موتور متصل می‌شوند. پوشش عایقی تعدادی از ورقه‌های هسته ممکن است به دلایل زیر بصورت موضعی آسیب‌دیده منجر به بروز خطای عایق بین ورقه‌ای (IID۱) در هسته استاتور شود [۸-۱۰]:

- نفوذ قطعات ریز خارجی هنگام مونتاژ، بازرسی و تعمیر
- آسیب مکانیکی بر سطح داخلی استاتور هنگام مونتاژ، بازرسی، سیم‌پیچی مجدد و گوه گذاری مجدد
- شل بودن و ارتعاش سیم‌پیچ‌ها، ورقه‌های هسته و گوه‌های شیار
- ایرادات باقیمانده از زمان ساخت ورقه‌ها (وجود پلیسه)
- مالش روتور به استاتور هنگام مونتاژ یا در حین کار ماشین

¹ Interlaminar Insulation Defect

• قوس الکتریکی ناشی از خطای سیم‌پیچ

خطای IID موضعی هسته استاتور باعث تقویت جریان‌های گردابی در ناحیه خطا می‌شود که افزایش تلفات توان و افزایش دمای موضعی را در پی دارد. این امر باعث تخریب بیشتر لایه عایقی ورقه‌ها و گسترش تدریجی ناحیه خطا و سپس، افزایش بیشتر جریان گردابی و دمای موضعی می‌شود. این فرآیند در نهایت ممکن است به ذوب شدن موضعی ورقه‌های هسته و/یا به آسیب دیدن عایق سیم‌پیچی و سوختن سیم‌پیچی استاتور منتهی شود [۱۰-۱۱]. بنابراین لازم است وضعیت پوشش عایق ورقه‌های هسته به‌طور مداوم مورد پایش قرار بگیرد تا حتی‌الامکان از خرابی‌های شدید ناشی از آن جلوگیری به عمل آید. اگرچه به‌استثنای مواقعی که خطای IID در سطح دندانه‌های استاتور است [۱۲]، در سایر مواقع تعمیرات هسته مستلزم تخلیه سیم‌پیچی و سپس سیم‌پیچی مجدد است، باین‌حال پایش وضعیت برخط و آگاهی از وقوع عیب IID می‌تواند مزایای زیر را در پی داشته باشد:

- اتخاذ تدابیر لازم برای توقف یا کاهش سرعت پیشرفت خطا، مانند کاهش شار ماشین و تقویت سیستم خنک‌کنندگی آن، به‌منظور فرصت دادن به اتمام دوره کار ضروری ماشین قبل از توقف اجباری آن [۱۳].
- کاهش شار ماشین از طریق کاهش دامنه ولتاژ تغذیه آن در حد مجاز میسر می‌شود. با این کار دامنه جریان گردشی در ناحیه خطا و تلفات و افزایش دمای ناشی از آن کنترل می‌شود.
- جلوگیری از توقف ناگهانی و بدون برنامه ماشین در اثر بروز خرابی عمده که ممکن است آسیب‌های دیگر مانند آسیب‌های انسانی در پی داشته و/یا منجر به تبدیل محصول در حال تولید به ضایعات گردد.

انجمن تحقیقات نیروی برق (EPRI) ۱ در گزارش فوریه ۲۰۱۰ خود موضوع پایش وضعیت برخط هسته استاتور ژنراتورها را از طریق پایش ولتاژ شفت و جریان زمین مورد بررسی قرار داده است [۱۳]. در [۱۴]، یک مشاهده‌گر حالت تطبیقی برای تشخیص IID هسته با پایش تغییرات تابع تلفات آهنی تخمینی (R_{fe}) ارائه شده است. در [۱۵-۱۷]، روش‌های آفلاین برای تشخیص IID در هسته استاتور ارائه شده که مبتنی بر روش آزمایش تشخیص عیب هسته الکترومغناطیسی (ELCID) ۲ است. این آزمایش مستلزم جداسازی روتور از ساختار موتور القایی است تا سیم‌پیچ تحریک لازم حول هسته استاتور پیچانده شود و سطح داخلی دندانه‌های استاتور از طریق پروب‌های مخصوص در دسترس باشد. روش‌های مبتنی بر ELCID امکان تشخیص خطاهای عمیق عایق ورقه‌های هسته استاتور را با دقت بالا و جریان تحریک نسبتاً کم فراهم می‌کنند. در [۱۲] روش آفلاین دیگری ارائه شده است که بر تأثیر IID بر ولتاژهای توالی صفر موتور در هنگام تحریک توسط توالی پالس بخصوص (سیگنال تست) استوار است. این توالی پالس از طریق اینورتر تولید و تزریق می‌گردد. با اعمال توالی پالس مزبور، سیگنال‌های ولتاژ القایی اندازه‌گیری شده و با انتقال آن‌ها به دستگاه مختصات α - β و انجام محاسبات پیچیده، شاخصی برای تشخیص خطای IID استحصال شده است. تغییرات حلقه هیستریزس دینامیکی ورقه‌های هسته در حضور عیب عایقی بین آن‌ها در [۱۸] بررسی شده است. این مطالعه صرفاً بر روی ورقه‌های هسته به‌طور جداگانه انجام‌شده و روی هسته موتور واقعی اجرا نشده است.

همه روش‌های تشخیص IID فوق به‌جز مراجع [۱۳-۱۴]، روش‌های آفلاین هستند که نیاز به جداسازی روتور ماشین از استاتور آن دارند. این امر سبب افزایش هزینه و زمان اجرا می‌شود. همچنین این روش‌ها اغلب به تجهیزات و سنسورهای

^۱ Electric power research institute

^۲ Electromagnetic Core Imperfection Detection

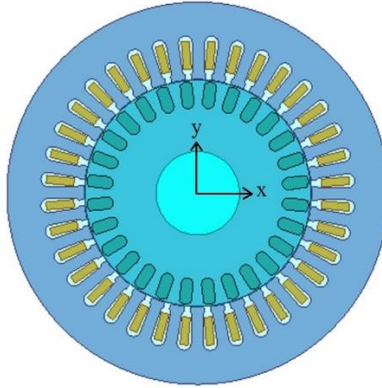
گران‌قیمت نیاز دارند. گزارش EPRI در مورد پایش ولتاژ شفت و جریان زمین برای تشخیص برخط IID نیز رضایت‌بخش نیست و نیاز به نصب پیچک جستجو حول محور روتور دارد. لذا یک روش تهاجمی بشمار می‌آید [۱۳]. روش ارائه‌شده در [۱۴] مستلزم تحلیل عملکرد دینامیکی موتور است که منجر به حصول نتایج تقریبی شده و نیاز به استفاده از سنسورهای گران‌قیمت دارد.

هدف این مقاله ارائه یک روش برخط، غیرتهاجمی و ارزان برای تشخیص خطای IID هسته استاتور با استفاده از سیگنال‌های الکتریکی موتور القایی است. برای این منظور سیگنال‌های جریان و گشتاور القایی در حوزه فرکانس مورد تحلیل قرار می‌گیرند. سیگنال گشتاور القایی با استفاده از سیگنال‌های جریان و ولتاژ موتور محاسبه می‌شود [۱۹]. از روش اجزای محدود (FEM) ۱ برای شبیه‌سازی موتور القایی سه‌فاز قفس سنجایی در شرایط سالم و خطای IID در هسته استاتور استفاده می‌شود. سپس تأثیر خطای مورد نظر بر طیف فرکانسی جریان خط استاتور و گشتاور القایی از طریق مقایسه نتایج متناظر حاصل از شبیه‌سازی در شرایط سالم و خطا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتیجه مقایسه حاکی از ظهور هارمونیک‌های جدید در سیگنال‌های مورد نظر و همچنین تغییر دامنه برخی هارمونیک‌های موجود بواسطه وقوع خطا است. اثرات شدت خطا، سطح بار و عدم تعادل ولتاژ بر دامنه این گونه هارمونیک‌ها نیز با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مطالعه می‌شود. در نتیجه یک مولفه فرکانسی در مجاورت هارمونیک ۱۵ جریان استاتور به‌عنوان حساس‌ترین مولفه نسبت به وقوع خطا و در عین حال مقاوم‌ترین مولفه نسبت به تغییرات سطح بار و عدم تعادل ولتاژ سه‌فاز استاتور به‌عنوان شاخص برای تشخیص خطای IID هسته استاتور انتخاب می‌شود. خطای IID مشابه در یک موتور القایی واقعی ایجاد شده و موتور مزبور مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی موید نتایج شبیه‌سازی است. با استفاده از شاخص به‌دست‌آمده می‌توان وجود خطای IID در هسته استاتور را به‌صورت برخط و بدون نیاز به جداسازی روتور و نیز بدون نیاز به تجهیزات گران‌قیمت تشخیص داد.

۲. شبیه‌سازی خطای IID با روش اجزاء محدود

شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود ممکن است بصورت دوبعدی یا سه‌بعدی انجام پذیرد. با توجه به اینکه خطای IID ممکن است فقط در بخشی از طول استاتور پدید آید، شبیه‌سازی سه‌بعدی برای مسئله موردنظر مناسب است. با این حال شبیه‌سازی سه‌بعدی نیاز به مش‌بندی سه‌بعدی کل حجم فعال ماشین دارد که مستلزم حجم محاسبات بزرگ و سنگینی است، به‌نحوی که انجام آن توسط سیستم‌های پردازشگر معمول و در دسترس در مدت زمان معقول میسر نمی‌باشد [۲]. بنابراین لاجرم از شبیه‌سازی دوبعدی در این مطالعه استفاده می‌شود. شکل ۱ مدل دوبعدی موتور القایی سه‌فاز را نشان می‌دهد که در صفحه $x-y$ تعریف شده است. در مدل‌سازی و شبیه‌سازی دوبعدی فرض بر همگن و یکنواخت بودن ساختار ماشین در امتداد طول آن (محور z) و چشم‌پوشی از اثرات انتهایی سیم‌پیچ‌ها و هسته است.

¹ Finite Element Method



شکل ۱. مقطع و مدل دو بعدی موتور القائی سه‌فاز

بنابراین در این تحقیق لاجرم از تورب میله‌های روتور که نوعی غیریکنواختی در طول روتور است، صرف‌نظر می‌شود. با این وصف، در این نوع شبیه‌سازی بردار چگالی جریان (J) و بردار پتانسیل مغناطیسی (A) عمود بر صفحه $x-y$ و در امتداد محور z خواهند بود [۲۰]:

$$\mathbf{J} = J_z u_z \quad (۱)$$

$$\mathbf{A} = A_z u_z \quad (۲)$$

که در آن J_z مولفه z بردار چگالی جریان، A_z مولفه z بردار پتانسیل مغناطیسی و u_z بردار واحد در امتداد محور z است. در این صورت بردارهای شدت میدان مغناطیسی (H) و چگالی شار مغناطیسی (B) که بر بردار چگالی جریان عمود هستند، مولفه‌هایی در صفحه $x-y$ داشته و فاقد مولفه در امتداد محور z خواهند بود [۲۰]:

$$\mathbf{H} = H_x u_x + H_y u_y \quad (۳)$$

$$\mathbf{B} = B_x u_x + B_y u_y \quad (۴)$$

میدان مغناطیسی موتور القائی سه‌فاز در مدل‌سازی دوبعدی با معادله دیفرانسیل زیر توصیف می‌شود [۲۰]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = J_{sz} + J_{iz} + J_{mz} \quad (۵)$$

که در آن μ نفوذپذیری مغناطیسی، J_{sz} چگالی جریان منبع تغذیه، J_{iz} چگالی جریان القائی ترانسفورماتوری و J_{mz} چگالی جریان القائی حرکتی است:

$$J_{iz} = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (۶)$$

$$J_{mz} = \sigma \mathbf{v} \times \text{curl} \mathbf{A} \quad (7)$$

که در آن σ هدایت الکتریکی و $\mathbf{v}$ بردار سرعت خطی روتور است.

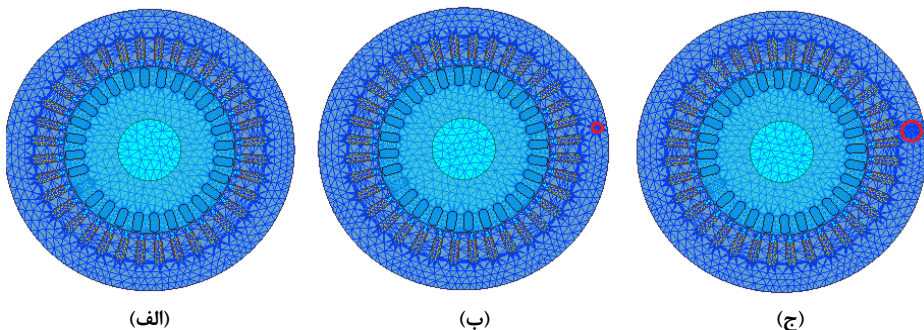
معادله (۵) نوعی معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی است که برای حل آن باید شرایط مرزی مسئله هم در نظر گرفته شود. حل تحلیلی چنین معادلاتی اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است. لذا در عمل اغلب به روش‌های عددی متوسل می‌شوند. روش اجزاء محدود یک روش رایج و دقیق برای حل عددی این گونه معادلات است. در این روش، فضای مسئله به قسمت‌های کوچک‌تر و ساده‌تر به نام اجزاء محدود تقسیم می‌شود که به آن مش‌بندی هم می‌گویند. در ادامه، فرمول‌بندی روش اجزاء محدود به سیستمی از معادلات جبری منتهی می‌شود که بیانگر تقریبی از یک تابع مجهول بر روی هر المان است. در نهایت با به حداقل رساندن یک تابع خطا پاسخ مسئله حاصل می‌گردد. اطلاعات بیشتر را می‌توان در مراجع ذیربط مانند [۲۰] به‌دست آورد. امروزه کلیه پردازش‌های روش اجزاء محدود توسط نرم‌افزارهای خاص این روش انجام می‌شود. کاربر کافی است فضای مسئله را شامل جنس و خصوصیات مواد بکار رفته در نرم‌افزار تعریف کند.

در این بخش یک موتور القایی سه فاز ۱/۱ کیلووات با استفاده از روش اجزاء محدود دوبعدی با نرم‌افزار Ansys Electronics شبیه‌سازی می‌شود. جدول ۱ مشخصات فنی موتور القایی را ارائه می‌دهد. در مدل دوبعدی ناحیه خطای IID به شکل یک دایره در هسته استاتور در نظر گرفته می‌شود. در این صورت، فرض یکنواخت بودن ساختار ماشین در طول آن در مدل دوبعدی، مستلزم وقوع خطا داخل یک استوانه با مقطع دایره مورد نظر در تمام طول هسته استاتور است. برای ایجاد خطا فرض می‌شود هسته داخل استوانه IID حاوی فولاد یک‌پارچه با هدایت الکتریکی متناسب با آن است. شدت خطا با تغییر قطر استوانه قابل تنظیم است. فرکانس نمونه‌برداری معادل ۲۰۰۰ نمونه بر ثانیه تنظیم شده و زمان شبیه‌سازی به مدت ۱۱ ثانیه انتخاب می‌شود. از این مدت ۱ ثانیه ابتدایی برای حذف شرایط گذرای راه‌اندازی حذف می‌شود و ۱۰ ثانیه حالت پایدار باقیمانده سیگنال‌ها برای مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

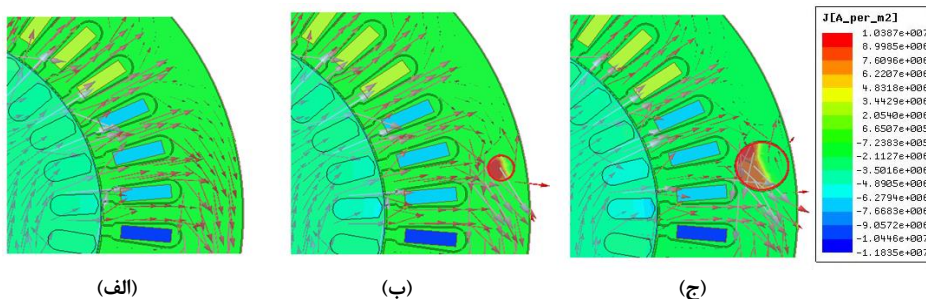
جدول ۱. پارامترهای موتور القایی سه فاز مورد مطالعه

عنوان	مقدار یا جنس	عنوان	مقدار یا جنس
توان نامی (kW)	۱/۱	جنس هادی استاتور	مس
ولتاژ نامی (V)	۳۸۰	جنس هادی روتور	آلومینیوم
سرعت نامی (rpm)	۱۴۰۰	قطر هادی استاتور (mm)	۰/۶۰۷
فرکانس نامی (Hz)	۵۰	ضریب پرشوندگی شیار استاتور (%)	۷۵
اتصال سیم‌پیچ استاتور	Y	قطر بیرونی روتور (mm)	۷۹/۸
تعداد قطب‌ها	۴	طول روتور (mm)	۷۶/۳
قطر بیرونی استاتور (mm)	۱۳۵	قطر داخلی روتور (mm)	۲۹/۵
قطر داخلی استاتور (mm)	۸۰/۴۵	تعداد شیارهای روتور	۲۸
طول استاتور (mm)	۷۵/۵	تعداد هادی شیار روتور	۱
جنس هسته استاتور	ورقه فولاد سیلیکونی	تورب میله‌های روتور (برحسب گام شیار)	۱
تعداد شیار استاتور	۳۶	جنس هسته روتور	ورقه فولاد سیلیکونی

شکل ۲ مش‌بندی دوبعدی ساختار موتور را در شرایط سالم و در دو حالت خطا با شدت متفاوت نشان می‌دهد که در آن ناحیه خطا با دایره قرمز رنگ مشخص شده است. با اجرای برنامه شبیه‌سازی اجزاء محدود کمیت‌های مختلف الکتریکی و مغناطیسی ماشین در طول زمان محاسبه می‌شود. شکل ۳ توزیع چگالی جریان الکتریکی و توزیع خطوط میدان مغناطیسی در بخش‌های مختلف ماشین را برای سه حالت شکل ۲ در یک لحظه از زمان نشان می‌دهد. همان‌گونه مشاهده می‌شود استوانه IID حاوی جریان الکتریکی با چگالی نسبتاً زیاد است، لذا امکان بروز نقطه داغ موضعی، گسترش ضعف عایقی بین ورقه‌های هسته و در نتیجه گسترش ناحیه خطا وجود دارد. شکل ۳ همچنین حاکی از مختل شدن توزیع عادی خطوط شار مغناطیسی در اطراف ناحیه خطا و افزایش شار نشتی در مجاورت ناحیه مزبور است.



شکل ۲. مش‌بندی ساختار موتور القایی برای شبیه‌سازی دوبعدی: (الف) موتور سالم، (ب) موتور معیوب با استوانه محل IID به قطر ۶/۵ میلی‌متر، (ج) موتور معیوب با استوانه محل IID به قطر ۱۰ میلی‌متر



شکل ۳. توزیع چگالی جریان و خطوط میدان مغناطیسی در موتور: (الف) سالم، (ب) موتور معیوب با استوانه محل IID به قطر ۶/۵ میلی‌متر، (ج) موتور معیوب با استوانه محل IID به قطر ۱۰ میلی‌متر

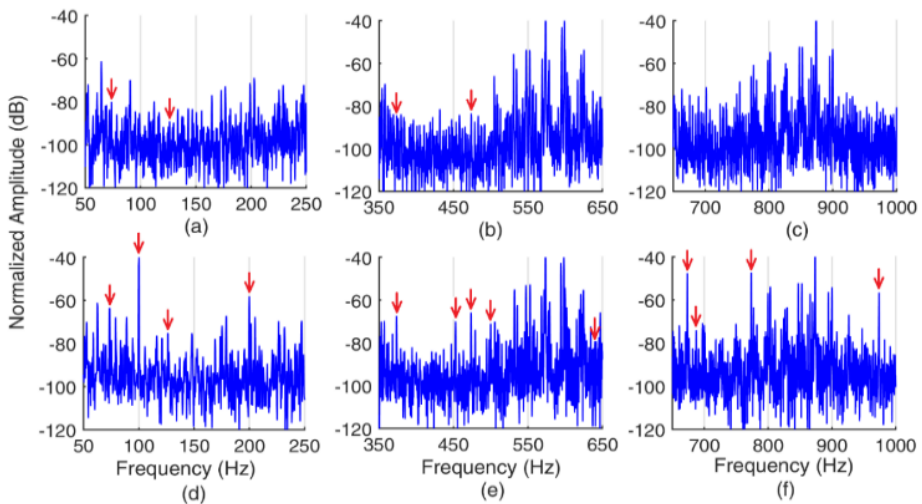
۳. تأثیر خطای IID بر طیف فرکانس گشتاور القایی و جریان استاتور

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، وجود خطای IID در هسته استاتور سبب اختلال در توزیع نرمال خطوط میدان مغناطیسی استاتور می‌شود که به‌نوبه خود ممکن است برخی هارمونیک‌ها را در جریان استاتور و گشتاور القایی القا کند. در این بخش، طیف فرکانسی جریان استاتور و گشتاور القایی در شرایط سالم و خطای IID هسته استاتور مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرند تا اثرات خطا بر روی آن‌ها مشخص شود [۶، ۲۱]. این تحلیل‌ها تحت

گشتاور بار ۶ نیوتن متر انجام می‌شود که نزدیک به گشتاور اسمی موتور مورد مطالعه است.

۳.۱. تحلیل فرکانسی گشتاور القایی

اتصال منبع تغذیه سه‌فاز به ترمینال‌های موتور القایی باعث جاری شدن جریان‌های سه‌فاز در سیم‌پیچ‌های استاتور، ایجاد میدان مغناطیسی دوار و القاء ولتاژ در میله‌های روتور می‌شود. ولتاژهای القایی باعث ایجاد جریان در میله‌های روتور و تولید میدان مغناطیسی دوار دیگری در روتور می‌شوند. از برهم‌کنش میدان‌های مغناطیسی دوار استاتور و روتور گشتاور القایی پدید می‌آید. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، وجود خطای IID در هسته استاتور سبب اختلال در توزیع فضایی عادی میدان مغناطیسی می‌شود که می‌تواند موجب القاء برخی مؤلفه‌های هارمونیک در گشتاور القایی شود. طیف فرکانسی نرمالیزه شده گشتاور القایی برای حالات سالم و خطای IID تحت گشتاور بار ۶ نیوتن متر در شکل ۴ نشان داده شده است. با مقایسه دقیق دو طیف فرکانسی می‌توان مشاهده کرد که برخی از مؤلفه‌های فرکانسی به دلیل وقوع IID در هسته استاتور تولید می‌شوند. علاوه بر این، برخی از مؤلفه‌های هارمونیک موجود پیش از وقوع عیب نیز شدت پیدا می‌کنند. علامت‌های فلش روی طیف‌ها در شکل ۳ نشانگر هارمونیک‌های متأثر از وقوع خطای IID است.



شکل ۴. طیف فرکانس گشتاور القایی در گشتاور بار ۶ نیوتن متر: (a,b,c) در موتور سالم، (d,e,f) در موتور معیوب با استوانه IID به قطر ۱۰ میلی‌متر

جدول ۲ فهرست کاملی از این هارمونیک‌ها را به همراه دامنه آن‌ها در حالات سالم و خطای IID با دو شدت مختلف ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه هارمونیک‌ها با وقوع خطای IID و نیز با افزایش شدت آن (افزایش قطر استوانه محل IID) افزایش می‌یابد. در همین حال، برخی از هارمونیک‌های مرتبه زوج شامل ۱۰۰ هرتز، ۲۰۰ هرتز و ۵۰۰ هرتز حساسیت خوبی نسبت به وقوع عیب و شدت آن نشان می‌دهند. علاوه بر این، جدول ۲ شامل برخی هارمونیک‌ها است که فرکانس آن‌ها در فاصله معینی (۲۶/۳ هرتز) از یک هارمونیک مرتبه زوج قرار دارد. این‌گونه

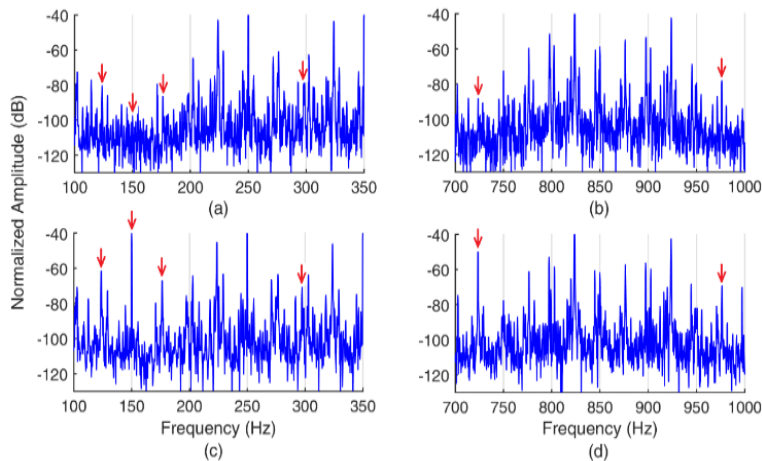
هارمونیک‌ها با علامت "*" در جدول مشخص شده‌اند.

جدول ۲. فرکانس و دامنه نرمالیزه هارمونیک‌های متأثر از خطای IID در گشتاور القایی

فرکانس (Hz)	دامنه نرمالیزه شده (dB)		حالت سالم
	IID (۱۰ mm)	IID (۴/۵ mm)	
*۷۳/۷	-۸۰/۰۵	-۷۲/۲۱	-۶۳/۶۱
۱۰۰	-۹۴/۸۸	-۴۲/۷	-۳۷/۶۴
*۱۲۶/۳	-۸۹/۰۵	-۷۷/۱۶	-۷۵/۳۹
۲۰۰	---	-۶۶/۹	-۵۸/۱۵
*۳۷۳/۷	-۸۴/۴۵	-۷۹/۲۳	-۶۷/۴۱
۴۵۲/۸	---	-۷۶/۶۸	-۶۹/۹۷
*۴۷۳/۷	-۸۳/۴۵	-۶۹/۳۴	-۶۵/۸۴
۵۰۰	-۹۲/۰۳	-۷۶/۹۶	-۷۱/۰۹
۶۴۰	---	-۸۵/۲۵	-۷۹/۳۷
*۶۷۳/۷	---	-۵۱/۸۲	-۴۷/۵۸
۶۸۷/۳	---	-۸۱/۹۸	-۷۴/۰۴
*۷۷۳/۷	---	-۵۳/۶۲	-۴۷/۲۵
*۹۷۳/۷	---	-۶۳/۸۷	-۵۶/۸۳

۳.۲. تحلیل فرکانسی جریان استاتور

اختلال در توزیع فضایی خطوط میدان مغناطیسی به دلیل وقوع خطای IID در هسته استاتور باعث ایجاد اعوجاج در ولتاژهای القایی سیم‌پیچ‌های استاتور و سپس در جریان‌های استاتور می‌شود. طیف فرکانسی نرمالیزه شده جریان فاز استاتور در شرایط سالم و خطای IID تحت گشتاور بار ۶ نیوتن متر در شکل ۵ نشان داده شده است. مقایسه دو طیف فرکانسی نشانگر ظهور یا تقویت برخی از مؤلفه‌های فرکانسی به دلیل وقوع خطای IID است. تعدادی از این مؤلفه‌های فرکانسی مهم با علامت فلش در شکل ۵ مشخص شده‌اند. جدول ۳ فهرستی از این مؤلفه‌های هارمونیک را با فرکانس‌های دقیق و دامنه‌های نرمالیزه شده در حالت سالم و خطای IID با دو شدت مختلف ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وقوع خطای IID یا افزایش شدت آن باعث افزایش دامنه هارمونیک‌ها می‌شود. در میان هارمونیک‌ها، دامنه نرمالیزه شده هارمونیک مرتبه سوم (۱۵۰ هرتز) قابلیت خوبی برای تشخیص وقوع خطای IID نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳ شامل برخی هارمونیک‌ها است که فرکانس آن‌ها در فاصله معینی (۲۶/۳ هرتز) از هارمونیک‌های مرتبه فرد قرار دارد. این هارمونیک‌ها با علامت "*" در جدول مشخص شده‌اند.



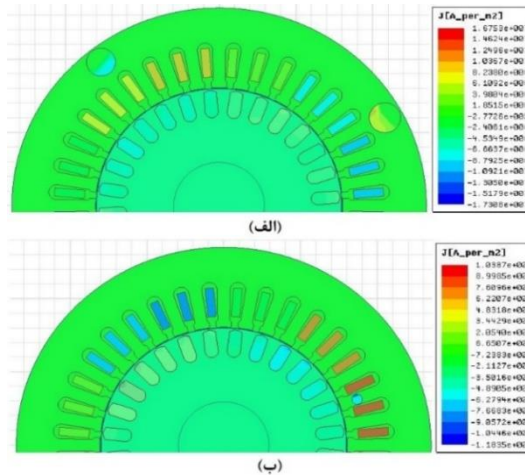
شکل ۵. طیف فرکانس جریان استاتور در گشتاور بار ۶ نیوتن متر: (a,b) در موتور سالم c,d) در موتور معیوب با استوانه IID به قطر ۱۰ میلی متر

جدول ۳. فرکانس و دامنه نرمالیزه هارمونیک‌های متأثر از خطای IID در جریان استاتور

دامنه نرمالیزه شده (dB)			فرکانس (Hz)
IID (۱۰ mm)	IID (۶/۵ mm)	حالت سالم	
-۶۱/۶۲	-۶۶/۸	-۸۰/۱۷	*۱۲۳/۷
-۳۹/۲۹	-۴۷/۱۹	-۹۷/۲۹	۱۵۰
-۶۷/۰۲	-۷۲/۶۱	-۸۶/۱۶	*۱۷۶/۳
-۷۰/۴۶	-۷۵/۳۴	-۸۰/۰۹	۲۹۷/۵
-۴۹/۹۰	-۵۵/۵۷	-۸۸/۱۱	*۷۲۳/۷
-۶۹/۳	-۷۰/۶۹	-۷۷/۷۴	*۹۷۶/۳

۳.۳. وقوع خطا در دو نقطه متفاوت و در دندانه استاتور

مصدق دیگر افزایش شدت خطای IID گسترش آن به نقاط دیگر هسته استاتور است. لذا در تکمیل مطالعات گذشته، مطالعه دیگری به ازای بروز خطای IID با قطر ۱۰ میلی متر در دو نقطه متفاوت از هسته استاتور به فاصله حدود یک گام قطب انجام می‌شود. علاوه بر این یک مطالعه هم به ازای بروز خطا به قطر حدود ۴ میلی متر در یک دندانه استاتور انجام می‌گیرد. بروز خطای IID در دندانه‌های استاتور محتمل تر است به‌ویژه اگر عامل بروز خطا مالش روتور به سطح داخلی استاتور باشد. شکل ۶ موقعیت خطاهای اخیر در هسته استاتور را هم‌زمان با توزیع چگالی جریان الکتریکی در یک لحظه معین نشان می‌دهد. نکته جالب توجه در این شکل (و همچنین شکل ۳) این است که جریان گردایی داخل محل خطا در جهت مخالف جریان هادی‌های داخل شیارهای مجاور استاتور است. نتایج مطالعات حاکی از حصول نتایج مشابه قبل در دو حالت اخیر است.



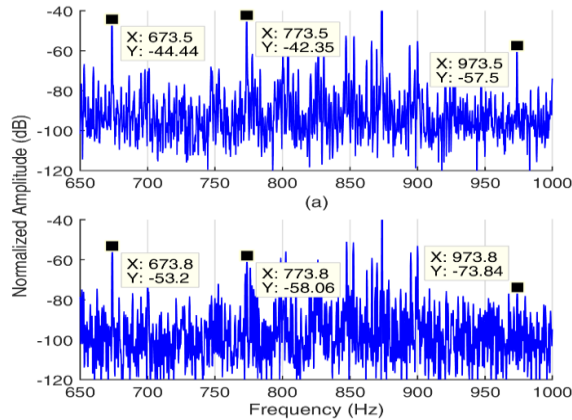
شکل ۶. حالت خطای IID (الف) در دو نقطه متفاوت از یوغ هسته استاتور، (ب) در یکی از دندان‌های هسته استاتور

برای اختصار شکل ۷ بخشی از طیف فرکانس گشتاور القایی را برای دو مطالعه اخیر در بار ۶ نیوتن متر نشان می‌دهد که در آن دامنه و فرکانس بعضی از هارمونیک‌های متأثر از خطا مشخص شده است. در مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج جدول ۲ به ازای خطای ۱۰ میلی‌متر در یک نقطه، ملاحظه می‌شود که دامنه دو هارمونیک افزایش و دامنه هارمونیک آخر اندکی کاهش یافته است. به‌ویژه دامنه هارمونیک مجاور هارمونیک ۱۶ در حالت اخیر حدود ۵ دسی‌بل بیشتر شده است؛ اما در حالت خطای دندان دامنه هر سه هارمونیک نسبت به مقادیر متناظر جدول ۲ کاهش یافته است که علت آن قطر (شدت) کمتر خطای دندان است. شکل ۸ نیز بخشی از طیف فرکانس جریان استاتور را در دو مطالعه اخیر نشان می‌دهد که در آن دامنه و فرکانس دو هارمونیک ردیف آخر جدول ۳ مشخص شده است. در مقایسه با نتایج متناظر جدول ۳ بروز خطای ۱۰ میلی‌متر در دو نقطه موجب تقویت جزئی دامنه دو هارمونیک شده در حالی که دامنه این دو هارمونیک به ازای خطای دندان با مقادیر متناظر جدول ۳ به ازای خطای ۶/۵ میلی‌متر تقریباً برابری می‌کند.

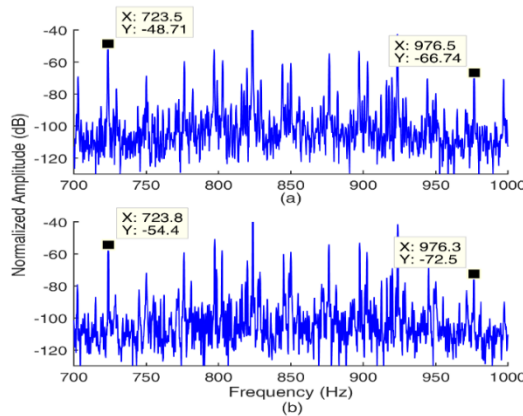
۴. بررسی اثر سطح بار

بررسی‌های انجام‌شده در بخش قبل نشان داد که وقوع خطای IID باعث ظهور یا تقویت برخی هارمونیک‌ها در گشتاور القایی و جریان استاتور می‌شود. به‌جز تعداد معدودی از این هارمونیک‌ها، مابقی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: گروه هارمونیک‌های مرتبه زوج/فرد و گروه هارمونیک‌هایی که در فاصله معینی از هارمونیک‌های مرتبه زوج/فرد قرار دارند. در ادامه بر این دو گروه تمرکز می‌شود. فرکانس هارمونیک‌ها در این دو گروه با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$f_c = k f_s \pm f_d \quad (۸)$$



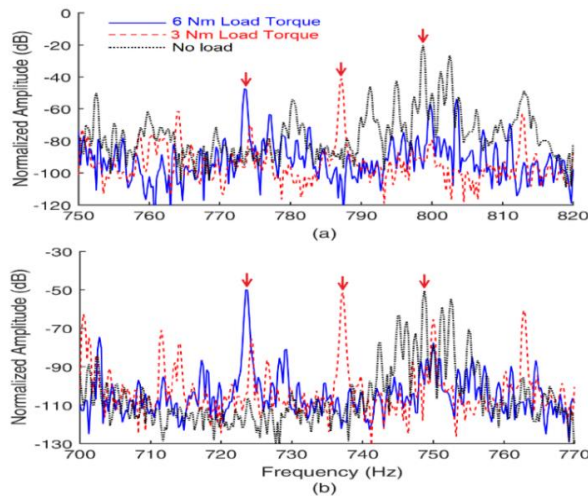
شکل ۷. بخشی از طیف فرکانس گشتاور القایی در گشتاور بار ۶ نیوتن متر به ازای: (a) خطای ۱۰ میلی‌متر در دو نقطه متفاوت، (b) خطای ۴ میلی‌متر در دندانه



شکل ۸- بخشی از طیف فرکانس جریان استاتور در گشتاور بار ۶ نیوتن متر به ازای: (a) خطای ۱۰ میلی‌متر در دو نقطه متفاوت، (b) خطای ۴ میلی‌متر در دندانه

در رابطه (۸) f_c فرکانس هارمونیک متأثر از خطای IID هسته، f_s فرکانس هارمونیک اصلی منبع تغذیه استاتور، f_d برای گروه اول هارمونیک‌ها صفر و برای گروه‌های دوم هارمونیک‌ها مقدار ثابت معینی است. برای هارمونیک‌های سیگنال گشتاور $k=2, 4, 6, \dots$ و برای هارمونیک‌های سیگنال جریان استاتور $k=1, 3, 5, \dots$ است. بررسی‌های بیشتر روی نتایج شبیه‌سازی در سطوح بار پایین‌تر نشان می‌دهد که مقدار f_d برای گروه دوم هارمونیک‌ها با کاهش گشتاور بار کاهش می‌یابد. شکل ۹ این امر را برای هارمونیک گشتاور مجاور فرکانس ۸۰۰ هرتز ($k=16$) و برای هارمونیک جریان مجاور ۷۵۰ هرتز ($k=15$) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش گشتاور بار، فرکانس هارمونیک مربوط به IID به فرکانس هارمونیک مضرب صحیح مربوطه نزدیک‌تر می‌شود. به بیان دیگر مقدار f_d کاهش می‌یابد.

(جدول ۴)



شکل ۹. نزدیک شدن فرکانس هارمونیک گروه ۲ به فرکانس هارمونیک گروه ۱ مجاور خود با کاهش گشتاور بار: (a) هارمونیک مجاور ۸۰۰ هرتز گشتاور القایی، (b) هارمونیک مجاور ۷۵۰ هرتز جریان استاتور.

مقادیر fd را در چند گشتاور بار از بی‌باری تا بار کامل ارائه می‌دهد که با استفاده از تحلیل نتایج شبیه‌سازی به دست آمده‌اند. در ادامه اثرات سطح بار بر روی دامنه نرمالیزه دو گروه هارمونیک بررسی می‌شود. جداول ۵-۶ برای این منظور تهیه شده است. جدول ۵ دامنه‌های نرمالیزه هارمونیک‌های گشتاور القایی را در دو شدت متفاوت خطای IID و گشتاورهای بار مختلف ارائه می‌کند. همچنین جدول ۶ نتایج مشابه را برای جریان استاتور نشان می‌دهد. مقادیر fd از جدول ۴ با توجه به مقدار گشتاور بار جایگزین شده است. ستون SD^1 انحراف معیار دامنه هارمونیک‌ها را در هر ردیف نشان می‌دهد. SD کمتر به معنای وابستگی کمتر دامنه هارمونیک به تغییر سطح بار است. کمترین SD متعلق به هارمونیک است که فرکانس آن در گشتاور القایی $2fs-fd$ و در جریان استاتور $15fs-fd$ است. ملاحظه می‌شود که حساسیت هارمونیک ذکر شده جریان به میزان بار بسیار کمتر از هارمونیک گشتاور القایی است و از این نظر، می‌تواند شاخص مناسب‌تری برای تشخیص خطای IID هسته استاتور باشد.

۵. بررسی اثر عدم تعادل ولتاژ

سیستم ولتاژ سه‌فاز متعادل شامل سه ولتاژ سینوسی با فرکانس‌ها و دامنه‌های مساوی و اختلاف‌فاز 120° درجه نسبت به هم است؛ اما در عمل، به دلیل عدم تقارن خطوط برق و/یا وجود بارهای نامتعادل، ممکن است برابری دامنه‌های ولتاژ سه‌فاز مختل شده و منجر به نامتعادل شدن سیستم ولتاژ سه‌فاز شود [۲۲]. طبق استاندارد IEEE Std 141، نسبت عدم تعادل ولتاژ فاز (PVUR) برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد موتور نباید بیشتر از ۲٪

¹ Standard Deviation

² Phase Voltage Unbalance Rate

باشد [۲۳]. با این حال، حتی مقادیر پایین‌تر PVUR نیز به طور قابل توجهی بر عملکرد موتور تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، هدف این بخش بررسی اثرات ولتاژهای سه‌فاز نامتعادل استاتور بر دامنه هارمونیک‌های مربوط به خطای IID است. برای این منظور، دامنه ولتاژهای سه‌فاز استاتور در شبیه‌سازی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مقدار PVUR معادل ۰/۹۴ حاصل شود. سپس، شبیه‌سازی‌ها در حالت سالم و خطای IID با گشتاور بار ۶ نیوتن‌متر انجام می‌شود تا دامنه نرمالیزه شده هارمونیک‌های مربوط به خطای IID استخراج و با دامنه متناظر آن‌ها در تغذیه با ولتاژهای متعادل مقایسه شود. جداول ۷ و ۸ به ترتیب برای مقایسه هارمونیک‌های گشتاور القایی و جریان استاتور ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

جدول ۴. مقادیر f_d تحت بارهای مختلف موتور القایی

گشتاور بار (Nm)	بی‌باری	۱/۵	۳/۰	۴/۵	۶/۰
f_d (Hz)	۱/۲	۷/۰	۱۲/۷	۱۹/۳	۲۳/۳

جدول ۵. تغییرات دامنه نرمالیزه (dB) هارمونیک‌های گشتاور القایی متأثر از خطای IID با تغییر گشتاور بار در دو

شدت مختلف خطای مزبور

SD(%)	گشتاور بار (Nm)					قطر محل IID (mm)	f_c (Hz)
	۶	۴/۵	۳	۱/۵	۰		
۷/۳۷	-۷۲/۲	-۶۸/۴	-۶۶/۹	-۷۰/۴	-۵۳/۶	۶/۵	$2f_s - f_d$
۱۱	-۴۲/۷	-۴۰/۴	-۳۷/۵	-۳۰/۸	-۱۵/۴	۶/۵	$2f_s$
۱۱،۳	-۷۷/۱	-۶۵/۸	-۸۱/۹	-۶۹/۶	-۵۲/۶	۶/۵	$2f_s + f_d$
۱۵،۸	-۶۶/۹	-۶۲/۱	-۵۱/۲	-۴۳/۵	-۲۷/۱	۶/۵	$4f_s$
۱۱/۹	-۷۹/۲	-۷۴/۴	-۷۱/۱	-۷۳/۹	-۴۸/۸	۶/۵	$8f_s - f_d$
۱۲/۶۶	-۶۹/۳	-۶۷/۴	-۶۷/۳	-۶۰/۹	-۳۸/۸	۶/۵	$10f_s - f_d$
۱۱/۷	-۷۶/۹	-۷۷/۹	-۶۷/۲	-۶۵/۱	-۴۸/۸	۶/۵	$10f_s$
۱۰/۱	-۵۱/۸	-۴۴/۹	-۴۷/۲	-۴۱/۴	-۲۵/۵	۶/۵	$14f_s - f_d$
۱۱/۲	-۵۳/۶	-۵۱/۴	-۴۷/۴	-۴۲/۱	-۲۵/۵	۶/۵	$16f_s - f_d$
۸	-۶۳/۹	-۶۳/۶	-۵۶/۸	-۵۴/۷	-۴۴/۴	۶/۵	$20f_s - f_d$
۳/۶۸	-۶۳/۶	-۵۹/۴	-۶۴/۳	-۶۶/۲	-۵۷/۳	۱۰	$2f_s - f_d$
۱۰/۷	-۳۷/۶	-۳۶	-۳۳/۸	-۲۶/۹	-۱۱/۵	۱۰	$2f_s$
۱۱/۶	-۷۵/۳	-۶۵/۸	-۷۱/۶	-۶۰/۶	-۴۵/۶	۱۰	$2f_s + f_d$
۷/۷	-۵۸/۱	-۵۰/۱	-۴۵/۵	-۴۳/۸	-۳۷/۴	۱۰	$4f_s$
۸/۷	-۶۷/۴	-۶۱/۵	-۶۵/۵	-۶۴/۶	-۴۶	۱۰	$8f_s - f_d$
۱۳/۷۸	-۶۵/۸	-۶۱/۱	-۶۳/۸	-۷۰/۶	-۳۵/۵	۱۰	$10f_s - f_d$
۱۰/۵	-۷۱/۱	-۶۸/۷	-۶۴/۳	-۶۷/۹	-۴۵/۱	۱۰	$10f_s$
۱۷/۴	-۴۷/۶	-۵۰/۸	-۷۲/۹	-۳۸/۸	-۲۵/۵	۱۰	$14f_s - f_d$
۱۰/۷	-۴۷/۲	-۴۴/۶	-۴۰/۹	-۳۶/۲	-۲۰/۲	۱۰	$16f_s - f_d$
۷/۵	-۵۶/۸	-۵۴/۸	-۵۰/۲	-۵۲/۷	-۳۷/۸	۱۰	$20f_s - f_d$

جدول ۶. تغییرات دامنه نرمالیزه (dB) هارمونیک‌های جریان استاتور متأثر از خطای IID با تغییر گشتاور بار در دو

شدت مختلف خطای مزبور

SD(%)	گشتاور بار (Nm)					قطر محل IID (mm)	f_c (Hz)
	۶	۴/۵	۳	۱/۵	۰		
۵/۷۹	-۶۶/۸	-۶۶/۶	-۷۶/۷	-۶۷/۶	-۷۸/۳	۶/۵	$3f_s - f_d$
۳/۶۹	-۴۷/۱	-۴۷/۷	-۴۶/۶	-۴۲	-۳۹/۳	۶/۵	$3f_s$
۴/۲	-۷۲/۶	-۶۷/۶	-۷۹/۲	-۷۴/۱	-۷۱/۷	۶/۵	$3f_s + f_d$
۱/۶۳	-۵۵/۵	-۵۶/۱	-۵۴/۲	-۵۳	-۵۲/۲	۶/۵	$15f_s - f_d$
۵/۳۴	-۷۷/۷	-۷۳/۱	-۷۰/۶	-۶۷	-۶۳/۹	۶/۵	$19f_s + f_d$
۱۲/۸۸	-۶۱/۶	-۶۰/۱	-۶۶/۷	-۶۳/۳	-۹۱/۲	۱۰	$3f_s - f_d$
۲/۷۲	-۳۹/۳	-۳۸/۹	-۳۷/۴	-۳۴/۷	-۳۳	۱۰	$3f_s$
۶/۸۲	-۶۷	-۶۴/۶	-۷۶	-۷۶/۳	-۷۰	۱۰	$3f_s + f_d$
۰/۵۵	-۴۹/۹	-۴۹/۸	-۵۱/۲	-۵۰	-۵۰/۴	۱۰	$15f_s - f_d$
۴/۵۸	-۶۹/۳	-۷۰/۴	-۶۰/۵	-۶۲/۴	-۶۱/۹	۱۰	$19f_s + f_d$

جدول ۷. مقایسه دامنه نرمالیزه (dB) هارمونیک‌های گشتاور القایی تحت گشتاور بار ۶ نیوتن متر با تغذیه

متعادل/نامتعادل در شرایط سالم و معیوب.

شرایط IID با قطر استوانه				حالت سالم		f_c (Hz)
۱۰ (mm)		۶/۵ (mm)				
نامتعادل	متعادل	نامتعادل	متعادل	نامتعادل	متعادل	
-۶۱/۲	-۶۳/۶۱	-۶۳/۷۱	-۷۲/۲۱	-۶۹/۸	-۸۰/۰	$2f_s - f_d$
-۳۲	-۳۷/۶۴	-۳۲	-۴۲/۷	-۳۴/۱	-۹۴/۸	$2f_s$
-۶۹/۹	-۷۵/۳۹	-۶۸/۸۱	-۷۷/۱۶	-۷۳/۷	-۸۹/۰	$2f_s + f_d$
-۵۴/۵۳	-۵۸/۱۵	-۷۰/۴۸	-۶۶/۹	-۶۲/۵	---	$4f_s$
-۶۵/۹	-۶۷/۴۱	-۶۹	-۷۹/۲	-۷۱/۴	-۸۴/۴	$8f_s - f_d$
-۶۳/۶۵	-۶۵/۸۴	-۶۲/۴۸	-۶۹/۳۴	-۶۷/۵	-۸۳/۴	$10f_s - f_d$
-۶۷/۸۳	-۷۱/۱۹	-۷۱/۱۹	-۷۶/۹۶	-۷۴/۲	-۹۲/۰	$10f_s$
-۴۵/۹	-۴۷/۶	-۵۰	-۵۱/۸	-۵۸/۴	-۹۰	$14f_s - f_d$
-۴۹	-۴۷/۲	-۵۳	-۵۳/۶	-۶۲	-۱۰۳/۹	$16f_s - f_d$
-۵۵/۵	-۵۶/۸	-۵۹	-۶۳/۸	-۶۵/۹	-۸۵/۸	$20f_s - f_d$

ولتاژهای نامتعادل حتی در شرایط موتور سالم دامنه هارمونیک‌ها را افزایش می‌دهد و این تقویت در مورد هارمونیک‌های مرتبه زوج/فرد با $f_d = 0$ شدیدتر است. به گونه‌ای که دامنه بعضی هارمونیک‌ها در شرایط سالم با ولتاژهای نامتعادل برابر یا بیشتر از دامنه آن‌ها در شرایط خطای شدیدتر (۱۰ میلی‌متر) با ولتاژهای متعادل است.

جدول ۸. مقایسه دامنه نرمالیزه (dB) هارمونیک‌های جریان استاتور تحت گشتاور بار ۶ نیوتن متر با تغذیه متعادل/نامتعادل در شرایط سالم و معیوب.

f_c (Hz)	حالت سالم		شرایط IID با قطر حفره			
	متعادل	نامتعادل	۶/۵ (mm)	۶/۵ (mm)	۱۰ (mm)	نامتعادل
$3f_s - f_d$	-۸۰/۱۷	-۶۶/۳۵	-۶۶/۸	-۶۰/۰۲	-۶۱/۶۲	-۵۸/۵۴
$3f_s$	-۹۷/۲	-۴۵/۳	-۴۷/۲	-۴۷/۳	-۳۹/۳	-۴۵/۵
$3f_s + f_d$	-۸۶/۱۶	-۶۹/۰۳	-۷۲/۶	-۶۴/۰۸	-۶۷/۰۲	-۶۳/۹۴
$15f_s - f_d$	-۸۸/۱	-۶۵/۱	-۵۵/۶	-۵۳/۱	-۵۰/۱	-۴۹/۶
$19f_s + f_d$	-۷۷/۷	-۶۶/۶	-۷۰/۶	-۶۵	-۶۹/۳	-۶۳/۷

هارمونیک‌های سه ردیف آخر جدول ۷ در حضور خطای IID حساسیت کمتری به ولتاژهای نامتعادل نشان می‌دهند. در این بین هارمونیک ردیف ماقبل آخر ($۱۶f_s - f_d$) شرایط مناسب‌تری دارد. در جدول ۸ نیز در حضور خطا هارمونیک $۱۵f_s - f_d$ حساسیت کمتری به نامتعادلی ولتاژها نشان می‌دهد. رشد دامنه این هارمونیک در شرایط سالم با تغذیه نامتعادل نیز در حدی نیست که تشخیص خطا را مختل سازد. لذا با توجه به حساسیت کمتر این هارمونیک به تغییرات سطح بار که در بخش قبل مشخص شد و نیز با توجه به سهولت اندازه‌گیری و استخراج هارمونیک‌های جریان استاتور نسبت گشتاور القایی، هارمونیک $۱۵f_s - f_d$ جریان استاتور به عنوان بهترین شاخص برای تشخیص آنالین خطای هسته استاتور تعیین می‌گردد.

۶. تست آزمایشگاهی

یک موتور القایی سه‌فاز قفس سنجابی با مشخصات فنی جدول ۱، جهت استخراج نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغذیه موتور بطور مستقیم از شبکه سه‌فاز برق شهر انجام می‌شود که ولتاژ خط نامی آن ۳۸۰ ولت است و بسته به شرایط، اغلب مقداری نامتعادلی دارد. آزمایش‌ها تحت گشتاور بار صفر، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ نیوتن متر انجام می‌شود. دمای آزمایشگاه محل انجام آزمایش‌ها اغلب حدود ۲۵ درجه سانتیگراد بوده و فن خنک‌کاری موتور القایی بر روی آن نصب بوده است. برای اعمال گشتاور بار قابل تنظیم یک دستگاه ترمز پودر مغناطیسی به محور موتور بسته می‌شود. اگرچه گشتاور نامی موتور القایی ۶ نیوتن متر است اما ترمز پودر مغناطیسی موجود قابلیت اعمال گشتاور بار تا ۴/۵ نیوتن متر را دارد. شکل ۱۰ تصویر تجهیزات آزمایشگاهی مذکور را نشان می‌دهد. موتور در حالت سالم تحت گشتاورهای بار ذکر شده تست می‌شود و ولتاژها و جریان‌های استاتور با استفاده از سنسورهای ولتاژ LV25-P، سنسورهای جریان L.TS6-NP، کارت نمونه‌برداری PCI1716 و نرم‌افزار LabView-V2012 نمونه‌برداری و ثبت می‌شوند. سپس، با استفاده از برخی روابط ریاضی شکل موج گشتاور القایی محاسبه می‌گردد [۱۹]. برای ایجاد خطای IID مشابه با شرایط شبیه‌سازی، ابتدا حفره‌ای به قطر ۶/۵ میلی‌متر در یوغ هسته استاتور ایجاد می‌شود. سپس این حفره با میله‌ی آهنی صلب کاملاً پر می‌شود. شکل ۱۱-الف حفره ایجاد شده در هسته استاتور و شکل ۱۱-ب حفره پر شده توسط میله آهنی را نشان می‌دهد. موتور تحت شرایط IID با گشتاورهای بار متفاوت آزمایش می‌شود و ولتاژها و جریان‌های استاتور

نمونه‌برداری و ثبت می‌شوند.

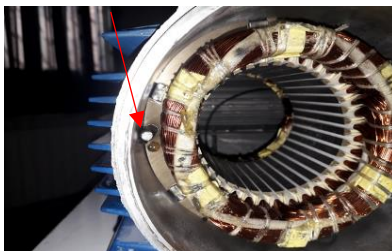


(ب)



(الف)

شکل ۱۰. تصویر تجهیزات آزمایشگاهی: (الف) موتور القایی کوپله شده به ترمز پودر مغناطیسی، (ب) دستگاه کنترل گشتاور ترمز پودر مغناطیسی



(ب)



(الف)

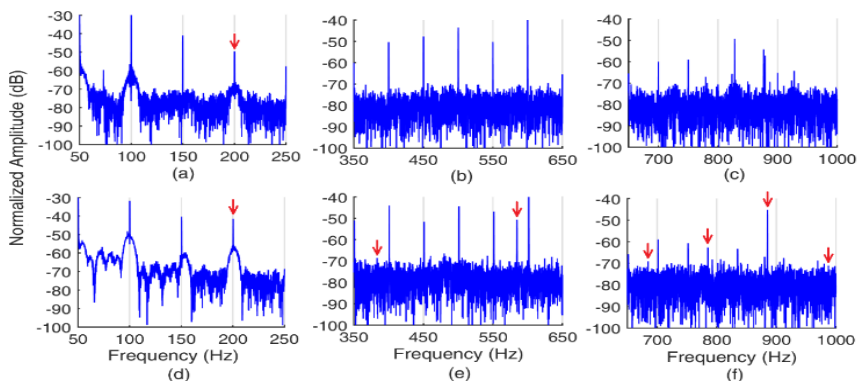
شکل ۱۱. هسته استاتور با: (الف) حفره ایجادشده، (ب) حفره پر شده توسط میله آهنی

شکل‌های ۱۲-۱۳ طیف فرکانسی گشتاور القایی و جریان استاتور حاصل از آزمایش را در شرایط سالم و خطای IID تحت گشتاور بار $4/5$ نیوتن متر نشان می‌دهد. علامت‌های فلش نشان‌دهنده برخی هارمونیک‌ها مطابق با رابطه (۸) هستند که به دلیل خطای IID ایجاد یا تقویت می‌شوند. در ادامه بررسی نتایج آزمایشگاهی به مولفه هارمونیک انتخاب شده در بخش شبیه‌سازی به عنوان بهترین شاخص خطا یعنی هارمونیک $15fs-fd$ جریان استاتور تمرکز می‌کنیم. کاهش مقدار fd با کاهش گشتاور بار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در شکل ۱۴ تأیید می‌شود. نزدیک شدن فرکانس جریان استاتور $15fs-fd$ به فرکانس مرتبه صحیح مجاور خود ($15fs$) با کاهش گشتاور بار در این شکل کاملاً مشهود است. علاوه بر این حساسیت ناچیز دامنه این هارمونیک به تغییرات سطح بار موتور نیز از شکل ۱۴ قابل نتیجه‌گیری است. جدول ۹ برای مقایسه دقیق‌تر نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی تنظیم شده است. این جدول دامنه نرمالیزه هارمونیک منتخب جریان استاتور را در شرایط سالم و خطای IID به قطر $6/5$ میلی‌متر در سطوح بار مختلف ارائه می‌دهد، جایی که نتایج متناظر حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش عملی در ستون‌های کنار هم درج شده‌اند. با توجه به

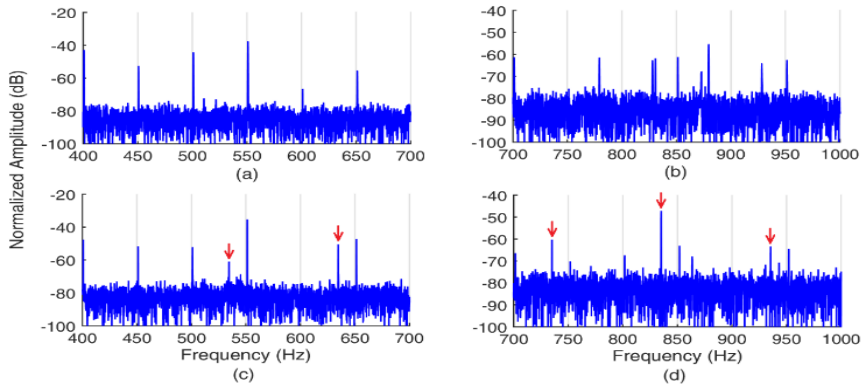
اینکه پایه نویز طیف فرکانسی جریان استاتور در نتایج عملی کمی بیشتر از 80 dB - است (شکل ۱۳ را ببینید)، هارمونیک منتخب جریان استاتور در نتایج عملی حالت سالم قابل شناسایی نیست. لذا در ستون مربوطه در جدول ۹ خط تیره درج شده است. اما در شرایط خطا این هارمونیک در طیف فرکانس عملی جریان استاتور کاملاً قابل شناسایی است و مقادیر متناظر آن در جدول ۹ درج شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بین نتایج حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در شرایط خطا کمی اختلاف وجود دارد به نحوی که دامنه نرمالیزه هارمونیک مورد نظر در نتایج عملی همواره کمتر از نتایج شبیه‌سازی است. کمترین اختلاف نتایج به میزان $4/2\text{ dB}$ در گشتاور بار $4/5$ نیوتن‌متر و بیشترین اختلاف به میزان $7/7\text{ dB}$ در بی‌باری مشاهده می‌شود. عوامل مختلفی در بروز اختلاف بین نتایج عملی با نتایج متناظر شبیه‌سازی می‌تواند موثر باشد:

- عدم تقارنی‌ها و ناهمگنی‌های ذاتی ماشین واقعی که در مدل اجزاء محدود قابل اعمال نیست.
- مدل‌سازی اجزاء محدود به صورت دوبعدی که با اعمال بعضی تقریب‌ها و چشم پوشی از تورب میله‌های روتور همراه است.
- عدم تعادل معمول در ولتاژهای شبکه سه فاز که موجب نامتعادل شدن ولتاژهای استاتور در تست‌های آزمایشگاهی می‌شود
- خطای سنسورها و وسایل نمونه‌برداری در آزمایش عملی

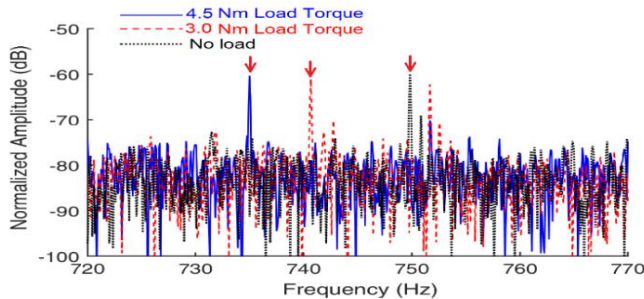
نکته جالب توجه دیگر ثبات بیشتر دامنه هارمونیک منتخب جریان استاتور (1 fs-fd) در نتایج عملی با وجود تغییر گشتاور بار است. دامنه این هارمونیک در نتایج عملی از بی‌باری تا بار $4/5$ نیوتن‌متر فقط $1/2\text{ dB}$ تغییر کرده است در حالیکه این مقدار در نتایج شبیه‌سازی $3/9\text{ dB}$ است.



شکل ۱۲. طیف فرکانس نرمالیزه گشتاور القایی تحت گشتاور بار $4/5\text{ Nm}$ در موتور: (a,b,c) سالم (d,e,f) با خطای IID به قطر $6/5\text{ mm}$ - نتایج تجربی



شکل ۱۳. طیف نرمالیزه جریان استاتور تحت گشتاور بار ۴/۵ Nm در موتور: (a,b) سالم، (c,d) با خطای IID به قطر ۶/۵ mm - نتایج تجربی



شکل ۱۴. نزدیک شدن فرکانس هارمونیک جریان متأثر از خطای IID ($15f_s - f_a$) به هارمونیک صحیح مجاور خود ($15f_s$) با کاهش گشتاور بار - نتایج تجربی

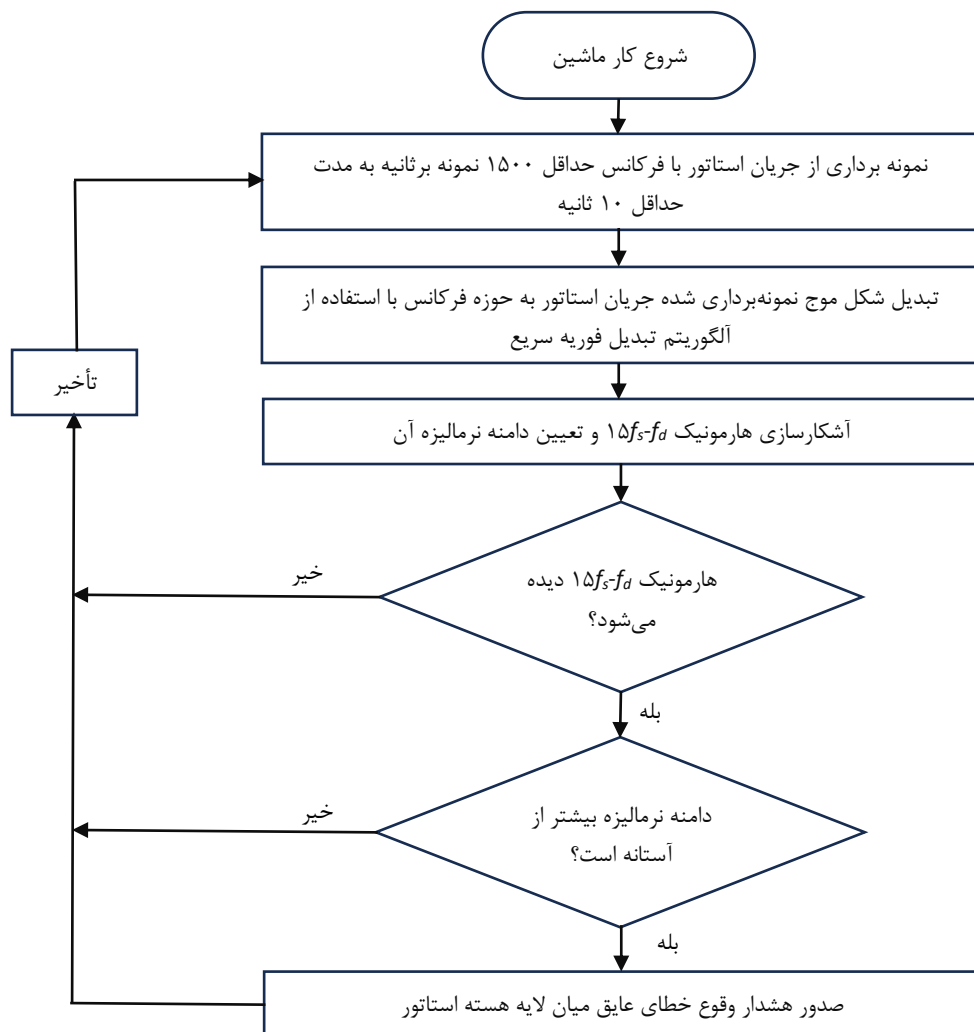
جدول ۹. مقایسه دامنه نرمالیزه (dB) هارمونیک $15f_s - f_a$ جریان استاتور حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش عملی در حالت سالم و خطای IID به قطر استوانه ۶/۵ میلی‌متر در سطوح بار مختلف

ماشین با خطای IID		ماشین سالم		گشتاور بار (Nm)
عملی	شبیه‌سازی	عملی	شبیه‌سازی	
-۵۹/۹	-۵۲/۲	-	-۹۳/۰	بدون بار
-۵۹/۹	-۵۳/۰	-	-۸۶/۱	۱/۵
-۶۱/۱	-۵۴/۲	-	-۸۴/۴	۳/۰
-۶۰/۳	-۵۶/۱	-	-۸۰/۸	۴/۵

۷. روش تشخیص خطای IID

با توجه به مجموعه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی می‌توان یک روش برخط مبتنی بر سیگنال [۲۴] برای تشخیص خطای عایق میان لایه هسته استاتور موتور القائی سه‌فاز تدوین و اجرا نمود. اساس این روش بر

آشکارسازی هارمونیک $15fs-fd$ جریان استاتور و مقدار دامنه نرمالیزه آن استوار است. ابتدا باید یک مقدار آستانه برای دامنه نرمالیزه هارمونیک مذکور تعیین شود به نحوی که اگر در حین کار ماشین دامنه اندازه‌گیری شده از مقدار آستانه فراتر رفت دلیل بر وقوع خطا باشد. در کاربرد واقعی، با ملاک قراردادن نتایج عملی وفق شکل ۱۴ و جدول ۹ می‌توان مقدار آستانه را بین 70 db تا 65 db انتخاب کرد. سپس کار تشخیص خطا بصورت برخط طبق روندنمای شکل ۱۵ پیگیری می‌شود.



شکل ۱۵. روند نمای روش تشخیص خطای IID

مطابق این روند نما کار تشخیص خطا همزمان با شروع کار ماشین آغاز می‌شود و شامل یک حلقه است که بطور مرتب تکرار می‌گردد. در هر تکرار ابتدا از جریان استاتور نمونه‌برداری انجام می‌شود. با توجه به فرکانس هارمونیک شاخص خطا که نزدیک هارمونیک ۱۵ام و کمتر از آن است، فرکانس نمونه‌برداری نباید کمتر از ۱۵۰۰ نمونه بر ثانیه باشد. سپس شکل موج نمونه‌برداری شده با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه سریع به حوزه فرکانس تبدیل می‌گردد. نمونه‌برداری به مدت حداقل ۱۰ ثانیه موجب می‌شود طیف فرکانسی حاصله دقت ۰/۱ هرتز و کمتر داشته باشد. در ادامه ظهور هارمونیک شاخص خطا بررسی می‌شود و در صورت ظهور، دامنه نرمالیزه آن به نسبت دامنه هارمونیک اصلی تعیین می‌شود. عدم ظهور هارمونیک شاخص یا کمتر بودن دامنه نرمالیزه آن از مقدار آستانه تعیین شده به معنی سالم بودن ماشین تلقی می‌شود. در غیر این صورت ماشین دچار خطای IID شده لذا هشدار لازم برای کاربر صادر می‌گردد. به این ترتیب یک تکرار حلقه تشخیص خطا کامل می‌شود و تکرار بعدی با کمی تأخیر آغاز می‌گردد. برحسب مورد و نیاز می‌توان میزان تأخیر را انتخاب و یا آن را معادل صفر تنظیم کرد.

مقایسه بعضی ویژگی‌های مهم روش‌های تشخیص خطای IID که در مراجع گذشته و نیز در این مقاله معرفی شده‌اند، با استفاده از جدول ۱۰ قابل انجام است. همانگونه که ملاحظه می‌شود روش پیشنهادی در این مقاله تنها روش غیرتهاجمی است که قابلیت اجرا بصورت برخط داشته و نیاز به جدا کردن روتور، نیاز به ابزار گران قیمت و نیاز به محاسبات پیچیده ندارد.

جدول ۱۰. مقایسه ویژگی‌های مهم روش‌های تشخیص خطای IID

شماره مرجع	نوع روش	قابلیت اجرا بصورت برخط	نیاز به جدا کردن روتور	نیاز به ابزار گران قیمت	نیاز به محاسبات پیچیده
[۸]	غیرتهاجمی	ندارد	ندارد	دارد	ندارد
[۱۰]	تهاجمی	ندارد	دارد	دارد	ندارد
[۱۲]	غیرتهاجمی	ندارد	ندارد	دارد	دارد
[۱۳]	تهاجمی	دارد	ندارد	ندارد	ندارد
[۱۴]	غیرتهاجمی	دارد	ندارد	دارد	دارد
[۱۵]	تهاجمی	ندارد	دارد	دارد	ندارد
[۱۶]	تهاجمی	ندارد	دارد	دارد	ندارد
[۱۷]	تهاجمی	ندارد	دارد	دارد	ندارد
این تحقیق	غیرتهاجمی	دارد	ندارد	ندارد	ندارد

در خاتمه لازم به توضیح است که اگرچه مطالعات در این تحقیق بر روی یک موتور القایی انجام شد، اما با توجه به ساختمان مشابه همه موتورهای القایی قفس سنجابی، انتظار می‌رود رفتار مشابهی از آن‌ها در شرایط خطای IID هسته استاتور مشاهده شود، همان‌طور که در قبال سایر خطاها، مانند ناهم‌محوری، شکست میله روتور و ... رفتار مشابهی نشان داده‌اند. لذا انتظار می‌رود روند نمای شکل ۱۵ برای تشخیص وقوع خطای IID در همه موتورهای القایی روتور قفس سنجابی قابل استفاده باشد.

نتیجه‌گیری

مطالعات شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزا محدود دوبعدی در این مقاله نشان داد که بروز خطای عایقی موضعی بین ورقه‌های هسته استاتور باعث اختلال در توزیع فضایی خطوط میدان مغناطیسی داخل موتور القایی سه‌فاز شده و شکل موج گشتاور القایی و جریان استاتور را دچار اعوجاج می‌نماید. این اعوجاج به صورت ایجاد یا تقویت برخی هارمونیک‌ها در کمیت‌های مذکور ظاهر گردید. فرکانس برخی از این هارمونیک‌ها مضربی زوج (برای گشتاور) یا فرد (برای جریان) از فرکانس هارمونیک اصلی است و برخی دیگر از هارمونیک‌ها نزدیک به هارمونیک‌های زوج یا فرد مزبور و به‌فاصله معینی از آن‌ها قرار دارند. میزان این فاصله با سطح بار موتور ارتباط دارد و با کاهش سطح بار، کاهش می‌یابد. بررسی حساسیت دامنه هارمونیک‌های متأثر از خطای مورد نظر در برابر شدت خطا، سطح بار و نامتعادلی ولتاژ تغذیه نشان داد که هارمونیک ۱۵fs-fd جریان استاتور مناسب‌ترین هارمونیک‌ها برای استفاده به‌عنوان شاخص خطا است. در گشتاور بار ۴/۵ نیوتن‌متر، با وقوع خطای نسبتاً ضعیف، دامنه نرمالیزه این هارمونیک از ۸۰/۸ db به ۵۶/۱ db- در نتایج شبیه‌سازی و به ۶۰/۳ db- در نتایج عملی رشد پیدا کرد. از بی‌باری تا بار ۴/۵ نیوتن‌متر، بسته به شدت خطا، دامنه این هارمونیک حداکثر ۳/۹db در نتایج شبیه‌سازی و ۱/۲ db در نتایج عملی تغییر کرد. نامتعادل شدن ولتاژهای سه‌فاز استاتور موجب تقویت دامنه این هارمونیک در حالت سالم شد ولی در حد تقویت ناشی از بروز خطا نبود. در شرایط خطا میزان تاثیر نامتعادلی ولتاژهای سه‌فاز بر دامنه هارمونیک منتخب در حد ۲/۵ db بود. بین دامنه هارمونیک منتخب به‌عنوان شاخص خطا و شدت خطا رابطه مستقیم مشاهده شد. این امر اجازه می‌دهد میزان گسترش خطا از طریق پایش میزان رشد شاخص منتخب همواره تحت نظارت باشد و در صورت عدم توقف گسترش خطا با وجود اقدامات پیشگیرانه، برنامه‌ریزی برای توقف ماشین و تعمیرات هسته پیگیری شود.

References

- [1] Rodríguez, P. V. J., Negrea, M., & Arkkio, A. (2008). A simplified scheme for induction motor condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(5), 1216-1236. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.11.018>
- [2] Rafiei, S.H., Ojaghi, M., & Sabouri, M. (2023). Effective Use of the SVM Method for Fault Diagnosis of Electric Motors Using Finite Element Analysis. *Karafan Scientific Quarterly*, 20(3), 367-392. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.389534.2495> (In Persian)
- [3] Bindu, S., & Thomas, V. V. (2014). Diagnoses of internal faults of three phase squirrel cage induction motor-A review. Paper presented at the 2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT). <http://dx.doi.org/10.1109/ICAECT.2014.6757060>
- [4] Lebaroud, A., & Clerc, G. (2008). Classification of induction machine faults by optimal time-frequency representations. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 55(12), 4290-4298. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.2004666>
- [5] Acosta, G. G., Verucchi, C., & Gelso, E. (2006). A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(4), 953-965. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.10.001>
- [6] Rafiei, S.H., Ojaghi, M., & Sabouri, M. (2023). Proposal of a New Index for Simultaneous Monitoring of Mechanical Faults Based on Analytical Study of Motor

- Current Harmonic Spectrum. *Karafan Scientific Quarterly*, 20(3), 239-264. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.389534.2495> (In Persian)
- [7] Faiz, J., & Ojaghi, M. (2009). Different indexes for eccentricity faults diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motors: A review. *Mechatronics*, 19(1), 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.07.004>
- [8] Lee, K., Hong, J., Lee, K.-W., Lee, S. B., & Wiedenbrug, E. J. (2009). A stator-core quality-assessment technique for inverter-fed induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(1), 213-221. <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2036527>
- [9] Hamzehbahmani, H., Anderson, P., & Eldieb, A. (2015). An overview of the recent developments of the interlaminar short circuit fault detection methods in magnetic cores. Paper presented at the 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339835>
- [10] Lee, S. B., Kliman, G. B., Shah, M. R., Mall, W. T., Nair, N. K., & Lusted, R. M. (2005). An advanced technique for detecting inter-laminar stator core faults in large electric machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1185-1193. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853383>
- [11] Silva, L. I., de la Barrera, P. M., Leidhold, R., Bossio, G. R., & De Angelo, C. H. (2018). Multi-domain model of faulty stator core for thermal effects and losses evaluation. *Electric Power Components and Systems*, 46(2), 187-196. <https://doi.org/10.1080/15325008.2018.1444685>
- [12] De La Barrera, P., Bossio, G., Garcia, G., & Solsona, J. (2009). Stator core fault diagnosis for induction motors based on parameters adaptation. Paper presented at the 2009 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2009.5292774>
- [13] Electric Power Research Institut. (2010, February). Generator statoe core condition monitoring by trackingshaft voltage and grounding current (Report No. 1020275). <https://restservice.epri.com/publicdownload/1020275/0/Product>
- [14] de la Barrera, P. M., & Bossio, G. R. (2011). Stator core faults detection on induction motor drives using signal injection. Paper presented at the 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2011.6063608>
- [15] Wang, J., Cao, Z., Dai, H., Sun, F., Shang, P., & Sun, S. (2020). The application of elcid on inter-laminar insulation failure of generator stator core. Paper presented at the 2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). <https://doi.org/10.1109/ICPRE51194.2020.9233107>
- [16] Smith, A., Bertenshaw, D., Ho, C., Chan, T., & Sasic, M. (2009). Detection of stator core faults in large turbogenerators. Paper presented at the 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2009.5075290>
- [17] Romary, R., Demian, C., Schlupp, P., & Roger, J.-Y. (2012). Offline and online methods for stator core fault detection in large generators. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 60(9), 4084-4092. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2224077>
- [18] Hamzehbahmani, H. (2019). Development of a new approach to core quality assessment of modern electrical machines. *IET Electric Power Applications*, 13(6), 750-756. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5276>

- [19] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2002). *Analysis of electric machinery and drive systems* (2nd ed.). New York: IEEE press.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118524336>
- [20] Bianchi, N., (2005). *Electrical machine analysis using Finite Elements*. New York: CRC press.
https://books.google.com/books/about/Electrical_Machine_Analysis_Using_Finite.htm?id=vvD2CSJGWY0C
- [21] Asgharpour Almadari, H. (2021). Analysis and Implementation of a Harmonic Component Elimination Method for Synchronous Generators with Nonlinear Loads. *Karafan Scientific Quarterly*, 18(3), 155-168.
<https://doi.org/10.48301/kssa.2021.257650.1280>. (In Persian)
- [22] Aderibigbe, A., Ogunjuyigbe, A., Ayodele, R., & Samuel, I. (2017). The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 10(5),
<http://dx.doi.org/10.25103/jestr.105.17>
- [23] Girigoudar, K., & Roald, L. A. (2020). On the impact of different voltage unbalance metrics in distribution system optimization. *Electric Power Systems Research*, 189, 106656. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106656>
- [24] Gao, Z., Secati C., & Ding S, X. (2015). A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 62(6),
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106656>