



Present a New Index for Diagnosing Simultaneous Mechanical Faults According to an Analytical Study on the Current Harmonics of Motors

Seyed Hamid Rafiei^{1*}, Mansour Ojaghi², Mehdi Sabouri³

¹PhD Student, Department of Electrical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

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

³Assistant Professor, Department of Electrical & Computer Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 04.16.2023

Revised: 07.21.2023

Accepted: 09.05.2023

Keyword:

Mechanical Simultaneous Faults

Condition Monitoring

Current Signature

*Corresponding Author:

Seyed Hamid Rafiei

Email: s.h.rafiee@znu.ac.ir

ABSTRACT

Many investigations have been conducted to detect single incipient faults in squirrel cage induction motors. However, there is much less research on detecting and discriminating simultaneous faults within the induction motor. The simultaneous presence of eccentricity fault with some other faults is unavoidable due to some manufacturing imperfections or the possible misalignment of the motor-load shafts. Neglecting the intrinsic eccentricity and simultaneous faults might cause mistakes in the condition motoring of the motor. This article presents an analytical and experimental approach to detecting the simultaneous mix of eccentricity and broken rotor bar faults. Theoretical analyses represented how the indicators appear in the stator current due to mechanical faults according to dynamic equations, MWFA, and Fourier series. Thus, a new frequency indicator was introduced to identify simultaneous faults. The suggestive index is monitored in the modified winding function (MWFA), and finite element (FE) simulations and its amplitude was studied in motors with healthy conditions and separate and simultaneous faults. Simulation and experimental results confirmed the capability of the proposed index to distinguish simultaneous faults from other cases. This method is non-invasive, low-cost, load-independent, and can be implemented in the monitoring system of any motor.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The principal portion of failures in SCIMs are linked to mechanical faults, and it is essential to monitor and diagnose these faults in incipient procedures. Investigations have been conducted to detect single faults in SCIMs. However, there is much less research on discriminating simultaneous faults. The mechanical faults consist of broken rotor bars (BRB) and air gap eccentricity (AE). The simultaneous presence of eccentricity fault with some other faults is unavoidable due to some manufacturing imperfections or the possible misalignment of the motor-load shafts. Neglecting the intrinsic eccentricity may cause mistakes in diagnosing the faults. This paper by using motor current signature analysis (MCSA) aims to diagnose combined mixed eccentricity (ME) and broken rotor bar (BRB) faults. The analytical formulas according to the modified winding function approach (MWFA) reveal how the ME and BRB faults introduce some frequency components in the motor line currents when occurring separately and simultaneously. Then, novel frequency components will be introduced to diagnose the simultaneous ME-BRB faults. Finally, the experimental results will prove the impressive ability of the suggested modelling.

Methodology

The MWFA was applied to simulate four cases: healthy, BRB, ME and the simultaneous fault. In the healthy case, a novel formula to calculate Inductance and its harmonics was presented firstly:

$$L_{sr}(\theta) = \frac{\mu_0 \Gamma L N}{\pi \cdot g_0} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{n_s} A_{hi} \cos(Ph(\theta - \theta_{hi})) / h^2 \quad (1)$$

$$\theta_{hi} = \begin{cases} i \times \alpha_s - b \times \alpha_r \\ i \times \alpha_s - (b-1) \times \alpha_r \end{cases}, A_{hi} = \begin{cases} \text{sign}(N_s(i) - N_s(i+1)) \\ -\text{sign}(N_s(i) - N_s(i+1)) \end{cases}$$

The BRB defect modelling can be considered as a healthy rotor with an additional bar, which is located exactly in the position of the corresponding broken bar. The amplitude of the extra bar current is equal to the healthy bar current, and its direction is in the opposite direction. Therefore, the equivalent current of the two bars is zero, and the performance of the two bars will be equivalent to one broken bar. To calculate all the harmonics of the rotor bar current, the fifth and seventh order were considered in the rotor current for the first time in the present study. The components of the rotor bar current will be:

$$[I_{rk}] = \left[\sum_{h=1}^{\infty} I_{rk}^h \cos(Ph\theta \pm \omega_s t - \varphi_{rk}) \right]_{k=1, \dots, n_r} \quad (2)$$

which ω_s is the principal harmonic of the motor supply current and equal to the amplitude of h-th harmonic of the rotor current in k-th bar of the rotor. θ can be defined in

general, which includes the main rotational frequency of the rotor with speed fluctuations; therefore:

$$\omega_r = d\theta/dt = \omega_{r0} + \sum_{\eta=1}^{\infty} \Delta \omega_{r\eta} \cos(2\eta s \omega_s t) \quad (3)$$

$$\omega_{r0} = (1-s)\omega_s/P$$

By analytical formulation, the frequency components of the rotor current were obtained according to Equation (4). These frequencies include all frequencies expressed in the rotor current in addition to the rotor current harmonics ($s \times fs$):

$$f_{Trk} = (h(1-s) \pm 1) f_s \quad (4)$$

By using the dynamic model, the frequency components of the stator current in the BRB defect were obtained in low and high frequencies, f_{bb_lf} , and f_{bb_hf} respectfully:

$$f_{bb_lf} = (1 \pm 2\eta s) f_s \quad (5)$$

$$f_{bb_hf} = ((h' \pm h)(1-s) m l m 2\eta s) f_s \quad (6)$$

These equations provide a more accurate view of the indices and state that these indices are caused by speed fluctuations caused by the broken rotor bar defect. By increasing the number of broken rotor bars, the speed fluctuations increased and the amplitude and number of indices around the harmonics also increased with a possibility of interference with the eccentricity index.

In this paper, for the first time, the exact expansion of the inverse air gap function is presented. This expansion was presented using a two-sentence series, the Euler formula and the Khayyam-Pascal triangle coefficients. This function was error-free and included all the harmonics of the air gap function. The exact expansion of the air gap function was as per Equation (7).

$$g^{-1}(\varphi, \theta) = \frac{1}{g_0} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{2k} \left\{ \binom{2k}{k} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\rho}{2}\right)^m \binom{2k+m}{k} \cos(m(\varphi - \varphi_M)) \right\} \quad (7)$$

Using MWFA and the dynamic model of SCIM, the harmonics applied to the stator current in ME fault were obtained as per Equation (8).

$$f_{me} = \left| \left\{ p(h \pm h') \pm (k \pm k') \right\} \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm 1 \pm 2\eta s \right| \times f_s \quad (8)$$

if $P(h \pm h') \pm (k \pm k') \neq 3\lambda$, $\lambda=1,2,L$ & $\eta=0$

According to the explanations of Equation (8), an additional bar is capable of generating fluxes with frequencies of coefficient that are multiples of 3, and these frequencies are added

to a healthy rotor with an eccentricity defect. The same added frequencies can be used to distinguish between an ME defect and an ME and BRB simultaneous defect. It should be noted that in a healthy rotor with ME defect, by applying the sum of the effect of the flux of all rotor bars on the stator phases in the ME state, frequencies, which are multiples of 3, are eliminated and only other multiples of 3, remain. Therefore, the ME and BRB simultaneous defect index is presented as relation (9).

$$f_{me,bb} = (\{p(h \pm h') \pm (k \pm k')\} \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm 1 \pm 2\eta s) f_s$$

if $P(h \pm h') \pm (k \pm k') = 3\lambda, \quad \lambda=1,2,L \quad \& \quad \eta = 0$ (9)

if $P(h \pm h') \pm (k \pm k') \neq 3\lambda, \quad \lambda=1,2,L \quad \& \quad \eta \neq 0$

Results and discussion

The separate and simultaneous ME and BRB defects were studied by MWFA and Ansys Maxwell-2D and then compared with experimental results in Figure 1.

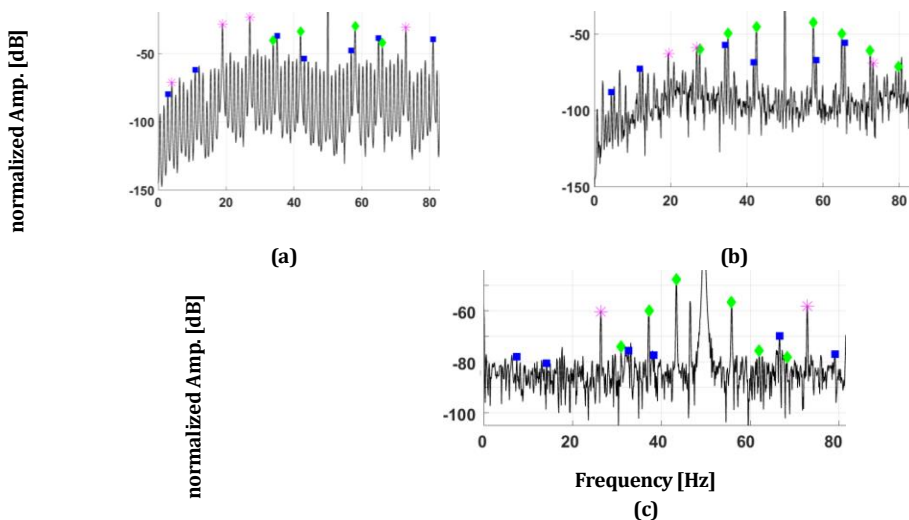


Figure 1. The normalized frequency spectrum using (a) MWFA, (b) FE, and (c) experimental results.

- BRB index with sign \blacklozenge
- ME index with sign $*$
- Simultaneous index with sign \blacksquare

Conclusion

This article provides a comprehensive view of how to generate indicators in mechanical faults and studies the effect of speed fluctuations and harmonic coefficients on it. According to the MWFA and FE simulations, a new index was introduced to identify the simultaneous mechanical faults in the stator current. Simulation and experimental results proved the ability of the proposed index to distinguish simultaneous faults from other cases. This method is non-invasive, low-cost, load-independent.

ارائه شاخص جدید برای پایش خطاهای مکانیکی هم‌زمان براساس مطالعه تحلیلی طیف هارمونیک جریان موتور

سید حمید رفیعی^{۱*}، منصور اوجاقلی^۲، مهدی صبوری^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
- ۲- استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی برق، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳

کلید واژگان:

خطاهای هم‌زمان مکانیکی
پایش وضعیت
امضای جریان

*نویسنده مسئول: سید حمید رفیعی

پست الکترونیکی:

s.h.rafiiei@znu.ac.ir

تحقیقات زیادی در مورد شناسایی خطاهای جداگانه در موتورهای القایی قفس سنجایی انجام شده است. اما تحقیقات بسیار کمی در زمینه خطاهای هم‌زمان در این نوع موتورها وجود دارد. خطاهای هم‌زمان می‌تواند به دلیل نقص در ساخت، مونتاژ، ناهم‌محوری ذاتی موتور و عدم هم‌راستایی محورهای موتور و بار ایجاد شود. عدم لحاظ هم‌زمانی این خطاها، باعث اختلال در سیستم پایش وضعیت موتور می‌شود. هدف مقاله حاضر، ارائه رویکردی تحلیلی و تجربی جهت تشخیص خطاهای هم‌زمان ناهم‌محوری و روتور میله شکسته است. لذا با تحلیل‌های تئوری مبتنی بر معادلات دینامیکی، روابط تابع سیم‌پیچ و سری فوریه، چگونگی پیدایش شاخص‌های فرکانسی در جریان استاتور توسط خطاهای مکانیکی مطالعه شده و شاخص فرکانسی جدیدی جهت شناسایی عیوب هم‌زمان معرفی می‌شود. این شاخص در شبیه‌سازی‌ها توسط روش‌های تابع سیم‌پیچ اصلاحی (MWFA) و اجزای محدود (FE) در بارهای مختلف مورد پایش قرار گرفته و حضور آن در موتورهای سالم و معیوب با اعمال خطاهای جداگانه و هم‌زمان مطالعه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، توانایی شاخص پیشنهادی را در تفکیک خطاهای هم‌زمان از سایر موارد اثبات می‌کند. این روش غیرتهاجمی، کم هزینه و مستقل از بار است و قابلیت اجرا در سیستم پایش هر موتور الکتریکی را دارد.

مقدمه

امروزه زندگی مدرن بشری به سیستم‌های الکتریکی و به ویژه موتورهای القایی قفس سنجایی^۱ وابسته است و توقف غیرمنتظره آنها صدمات جبران ناپذیری در پی دارد. عوامل عمده توقف این موتورها، مربوط به عیوب مکانیکی می‌باشد که شامل میله‌های شکسته روتور^۲ و خروج از مرکز فاصله هوایی^۳ است [۱؛ ۲]. برای شناسایی این خطاها شاخص‌های متنوعی وجود دارد [۳] که معروف‌ترین شاخص‌های هارمونیک در جریان استاتور برای تشخیص خطای روتور میله شکسته عبارتند از [۴؛ ۵]:

$$f_{bb_lf} = |1 \mp 2ks|f_s \quad (۱)$$

$$f_{bb_hf} = (h(1-s) \pm s \pm 2\eta s)f_s \quad (۲)$$

که در آنها s لغزش، f_s فرکانس اصلی، k و h اعداد صحیح مثبت، f_{bb_lf} و f_{bb_hf} به ترتیب شاخص‌های خطای BRB در فرکانس‌های پایین و بالا هستند.

خطای ناهم‌محوری ناشی از عدم انطباق خطوط مرکزی استاتور و روتور است و می‌تواند به دلیل تolerانس ساخت، نصب نادرست موتور، پیچ شل، کج بودن روتور، هسته بیضوی استاتور، روتور نامتعادل، جابجایی نادرست بلبرینگ یا سایش آن [۶] و عدم هم‌راستایی شفت‌های موتور و بار باشد. خطای ناهم‌محوری شامل انواع استاتیکی^۴، دینامیکی^۵ و مرکب^۶ است. ناهم‌محوری مرکب، ترکیبی از ناهم‌محوری استاتیکی و دینامیکی بوده و در آن، مرکز چرخش روتور جابجا می‌شود و منطبق بر هیچ‌کدام از مراکز روتور و استاتور نیست [۷]. مهم‌ترین شاخص‌های فرکانسی در جریان استاتور جهت تشخیص خطای ناهم‌محوری مرکب عبارتند از [۸؛ ۹]:

$$f_{me_lf} = |f_s \mp kf_r| \quad (۳)$$

$$f_{me_hf} = ((\lambda n_b \pm n_d)(1-s)/P \pm \mu)f_s \quad (۴)$$

که در آن f_r فرکانس چرخش روتور برحسب رادیان بر ثانیه، λ ، μ اعداد صحیح مثبت، n_b تعداد میله روتور، n_d درجه ناهم‌محوری ($n_d = 0$ برای ناهم‌محوری استاتیکی و $n_d = 1, 2, \dots$ برای ناهم‌محوری دینامیکی) و P بیانگر تعداد جفت قطب موتور، f_{me_lf} و f_{me_hf} به ترتیب شاخص‌های خطای ME در فرکانس‌های پایین و بالا هستند. با وقوع خطای ناهم‌محوری مرکب مطابق (۳) و لحاظ $k = 1$ دو هارمونیک با فاصله یکسان در اطراف هارمونیک اصلی ایجاد می‌شوند که باند جانبی پایین^۷ و بالا^۸ نامیده می‌شوند [۱۰].

در این مقاله ثابت می‌شود که پارامتر k در (۱) نشانگر نوسانات سرعت است که به دلیل وقوع شکست میله روتور پدید می‌آید. لذا با افزایش تعداد میله شکسته شده، میزان نوسانات سرعت بیشتر شده و شاخص‌هایی با مقدار k بزرگتر

¹ Squirrel cage induction motor (SCIM)

² Broken rotor bar (BRB)

³ Air eccentricity (AE)

⁴ Static eccentricity (SE)

⁵ Dynamic eccentricity (DE)

⁶ Mix eccentricity (ME)

⁷ Low sideband (LSB)

⁸ High sideband (HSB)

ظاهر می‌شوند. این شاخص‌ها در مجاورت شاخص‌های LSB و HSB ناشی از خطای ناهم‌محوری هستند و باعث ایجاد تداخل در آنها شده و سیستم شناسایی عیوب را دچار اختلال می‌نماید و بایستی برای این مشکل چاره‌ای اندیشید. وجود خطاهای ناهم‌محوری نیروی مغناطیسی کششی^۱ بر روتور اعمال می‌کند و با افزایش شدت خطای ناهم‌محوری اثر آن بر روی روتور افزایش می‌یابد [۱۱] و باعث سایش روتور با استاتور و بروز خطاهای مختلف در روتور می‌شود. از طرفی شاخص ME نیز بر روی شاخص BRB مؤثر است. به عنوان نمونه: مطابق (۵)، در یک موتور القایی با دو جفت قطب و لحاظ $k = 4$ در (۳) و $k = 1$ در (۱)، شاخص خطای ناهم‌محوری بر شاخص روتور میله شکسته منطبق شده و باعث اختلال در سیستم شناسایی عیوب می‌شود.

$$f_{me_lf} = |f_s - kf_r| = |f_s - 4 \times (1 - s)f_s/2| = |f_s - 2f_s + 2sf_s| = |-f_s + 2sf_s| \quad (5)$$

$$= |f_s(1 - 2s)| = f_{brb_lf}$$

همچنین امکان دارد که با تغییر لغزش و لحاظ مقادیر دیگری برای k ، شاخص‌های ناهم‌محوری و روتور میله شکسته بر هم منطبق شوند و عیوب بر هم تأثیر داشته باشند.

با وجود این‌که، مقالات زیادی در مورد خطاهای مکانیکی جداگانه ارائه شده است، متأسفانه مطالعات کمتری در زمینه خطاهای مکانیکی هم‌زمان وجود دارد. قابلیت شناسایی خطاهای ترکیبی BRB و AE در فرکانس‌های بالای براساس تحلیل امضای جریان موتور^۲ [۱۲]، نیروی روتور [۱۳]، گشتاور [۱۴] و تحلیل گذرای شار پراکندگی [۱۵] ارائه شده است. همچنین در مرجع [۱۶]، اثر حضور هم‌زمان BRB و SE و در مرجع [۱۷]، اثر هم‌زمان BRB و DE در جریان استاتور بررسی شده است. در مراجع [۱۶؛ ۱۷]، دو جمله اول تابع فاصله هوایی معکوس لحاظ شده و تشخیص خطای DE با آنالیز جریان استاتور را دشوار بیان کرده است. در مرجع [۹]، روش ترکیبی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته^۳، عملگر انرژی Teager-Kaiser^۴ و چگالی طیفی توان^۵ برای تشخیص عیوب BRB و ME استفاده شده است. این مرجع از شاخص‌های بیان شده در (۱-۴) استفاده کرده و شاخص جدیدی معرفی نکرده است و نقطه ضعف دیگر این روش، تغییر دامنه مؤلفه خطا با سطح بار است که عملاً کارایی آن را مختل می‌کند. تشخیص خطاهای هم‌زمان BRB و AE توسط روش طبقه‌بندی چند برچسب با توجه به جریان راه‌اندازی در [۱۸] و انواع عیوب مکانیکی با شبکه عصبی در [۴؛ ۱۹] و عیوب مکانیکی و الکتریکی با شبکه‌های عصبی در [۲۰] مطالعه شده است. در مرجع [۲۱]، مدل مدار معادل الکتریکی ساده شده SCIM با حضور خطاهای BRB و AE ارائه شده است.

شاخص‌های بیان شده در اکثر مقالات، تهاجمی هستند و نیازمند نصب چندین سنسور در داخل موتور بوده و هزینه‌بر می‌باشند. در مرجع [۱۲] گستره وسیعی از طیف فرکانسی جریان استاتور جهت شناسایی خطاها بدون ارائه مباحث تحلیلی ارائه شده است و در مرجع [۱۶؛ ۱۷] فقط خطاهای SE و DE بررسی شده و خطای ME مطالعه نشده است.

برای انجام مطالعات بیشتر خطاهای هم‌زمان دلایل دیگری نیز وجود دارد. در عمل، یک موتور کاملاً متقارن وجود ندارد و از بین بردن کامل ناهم‌محوری ذاتی به دلیل نقص ساخت یا مونتاژ منتفی است [۱۶]. به علاوه، به دلیل عدم هم‌راستایی ناگزیر شفت موتور و شفت بار چرخان یا ناهم‌محوری ذاتی بار چرخان، شاخص‌های ناهم‌محوری به شدت در یک موتور سالم افزایش می‌یابد. بنابراین، یک موتور سالم در حقیقت با مشکل ناهم‌محوری درگیر است و لحاظ نکردن

¹ Unbalanced magnetic pull (UMP)

² Motor current stator analysis (MCSA)

³ Discrete wavelet transforms (DWT)

⁴ Teager-Kaiser energy operator (TKEO)

⁵ Power spectral density (PSD)

ناهم‌محوری ذاتی باعث ایجاد اشتباه در تشخیص آن خطاها می‌شود. از طرفی، خطاهای مکانیکی از خطاهای رایج در SCIM هستند و معمولاً هم‌زمان اتفاق می‌افتند یا وجود یکی دیگری را تشدید می‌کند. خطاهای ترکیبی می‌توانند فرکانس‌های یکسانی را در اطراف هارمونیک اصلی در جریان استاتور ایجاد کنند [۱۶] و فرکانس مؤلفه‌های ایجاد شده توسط DE، مشابه برخی از فرکانس‌های خطای BRB است [۱۷]. لذا نادیده گرفتن ناهم‌محوری ممکن است باعث اشتباه در تشخیص BRB و تفکیک آنها شود [۱۶]. مرجع [۱۲]، نشان می‌دهد که مدل خطای BRB با هارمونیک‌های جریانی از خطای ناهم‌محوری متأثر می‌شود و تشخیص این دو خطا را مشکل می‌کند.

با توجه به مشکلات بیان شده و برای جلوگیری از اختلال در شناسایی خطاهای مکانیکی، بایستی مطالعهٔ جامعی بر روی عیوب هم‌زمان BRB و ME انجام شود و شاخص ویژه‌ای برای شناسایی خطاهای هم‌زمان ارائه گردد. این مقاله با هدف تبیین نحوهٔ ایجاد شاخص خطای مکانیکی در جریان استاتور، سعی در ارائه دید تحلیلی برای هر خطا و در نتیجه ارائه شاخص جدید برای شناسایی خطاهای هم‌زمان مکانیکی BRB و ME دارد. لذا، ابتدا نحوهٔ شبیه‌سازی خطاهای BRB و ME توسط روش‌های تابع سیم‌پیچ اصلاحی^۱ و آنالیز اجزای محدود^۲ بیان شده و طیف هارمونیک جریانی استاتور برای خطاها مطالعه می‌شود. در ادامه، شاخص جدیدی برای تشخیص خطاهای هم‌زمان مکانیکی پیشنهاد می‌گردد. طیف هارمونیک جریانی موتور در شبیه‌سازی‌ها برای چهار حالت مختلف شامل موتور سالم، موتور با خطاهای جداگانه BRB و ME و موتور با خطاهای هم‌زمان مطالعه می‌شود و حضور شاخص پیشنهادی در هر حالت پایش می‌گردد. شاخص پیشنهادی باید قابلیت تفکیک خطای هم‌زمان از سایر حالت‌ها را داشته و مستقل از میزان بار موتور باشد. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی در یک موتور آزمایشگاهی مورد سنجش قرار گرفته و قوت شاخص پیشنهادی اثبات می‌گردد.

شبیه‌سازی خطاهای هم‌زمان در مدل دینامیکی SCIM

مدل دینامیکی SCIM براساس معادلات ولتاژ سیم‌پیچ‌های استاتور و میله‌های روتور در شرایط سالم با روابط زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$[V_{su}] = [R_{su}][I_{su}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{su}] \quad (۶)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (۷)$$

$$T_e - T_L = j \frac{d\omega}{dt} \quad (۸)$$

در روابط فوق، V_r ، V_{su} به ترتیب بردارهای ولتاژ خط استاتور و ولتاژ روتور، I_r و I_{su} به ترتیب بردارهای جریان استاتور و روتور هستند. R_r ، R_{su} به ترتیب ماتریس‌های مقاومت استاتور و روتور، Φ_r و Φ_{su} بردارهای شارهای پیوندی استاتور و روتور را نشان می‌دهد. در معادلهٔ گشتاور T_e و T_L به ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار، J و ω به ترتیب ممان اینرسی، سرعت روتور هستند. رابطهٔ بین شارهای پیوندی و جریان‌ها به شرح زیر است:

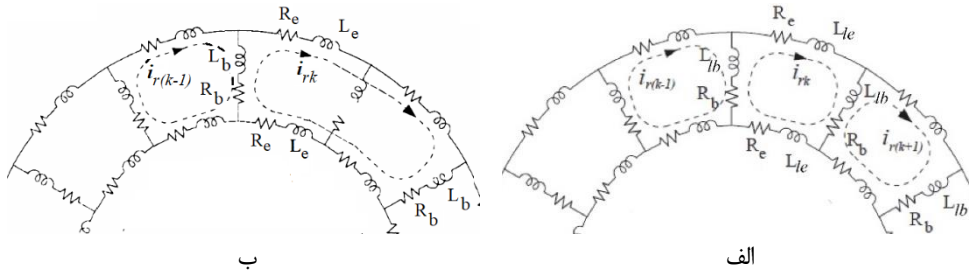
^۱ Modified winding function approach (MWFA)

^۲ Finite element analysis (FEA)

$$[\Phi_{sl}] = [L_{ssl}][I_{sl}] + [L_{srll}][I_r] \quad (۹)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rsl}][I_{sl}] + [L_{rr}][I_r] \quad (۱۰)$$

در معادلات ذکر شده، ماتریس‌های L_{ssl} ، L_{srll} ، L_{rr} و L_{rsl} به ترتیب معرف اندوکتانس خودی مدارهای استاتور و روتور، اندوکتانس متقابل بین مدارهای روتور است. برای محاسبه ماتریس مقاومت روتور، از قانون KVL کیرشهف مطابق شکل ۱-الف استفاده می‌شود تا رابطه (۱۱) حاصل شود [۲۳].



شکل ۱. مدار معادل روتور قفس سنجایی (الف) روتور سالم و (ب) روتور با میله شکسته [۲۴].

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & K & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & K & 0 \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & K & M \\ M & M & M & O & M \\ -R_b & 0 & K & K & 2(R_b + R_e) \end{bmatrix}_{n_b \times n_b} \quad (۱۱)$$

برای محاسبه انواع اندوکتانس‌های خودی و متقابل، از روش MWFA استفاده شده است. انتگرال اساسی MWFA برای محاسبه اندوکتانس بین دو سیم‌پیچ X و Y به شرح زیر است:

$$L_{xy}(\phi, \theta) = \mu_0 r L \int_0^{2\pi} n_x(\phi, \theta) N_y(\phi, \theta) g^{-1}(\phi, \theta) d\phi \quad (۱۲)$$

به طوری که n_x و N_y به ترتیب تابع دور سیم‌پیچ X و تابع سیم‌پیچ اصلاح شده Y هستند و g^{-1} نشان دهنده معکوس تابع توزیع فاصله هوایی است. μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی هسته استاتور، r شعاع خارجی روتور، L طول هسته روتور است. ϕ و θ به ترتیب بیانگر تغییرات زاویه نسبت به زاویه مرجع استاتور و زاویه موقعیت روتور است. با استفاده از روش MWFA، می‌توان مدل‌سازی روتور میله شکسته را نیز انجام داد. با توجه به شکل ۱-ب، می‌توان میله معیوب روتور را به صورت مدار باز^۱ با جریان صفر لحاظ کرد یا میله روتور با مقاومت بالا^۲ در نظر گرفت [۲۴]. در این مقاله، مدل مدار باز

^۱ Open Circuit

^۲ High Resistance

برای میله شکسته روتور لحاظ شده است. با فرض این که n_{bb} نشانگر تعداد میله شکسته روتور باشد، ابعاد ماتریس در رابطه (۱۱) به صورت $(n_b - n_{bb}) \times (n_b - n_{bb})$ خواهد بود.

برای شبیه‌سازی خطای ناهم‌محوری، طول فاصله هوایی به صورت (۱۳) تعریف می‌شود [۶]:

$$g^{-1}(\varphi, \theta) = (g_0(1 - \rho \times \cos(\varphi - \varphi_M)))^{-1} \quad (13)$$

به طوری که:

$$\rho = \sqrt{\rho_s^2 + \rho_d^2 + 2\rho_s\rho_d \cos(\theta - \varphi_s)} \quad (14)$$

$$\varphi_M = \varphi_s + \text{Arctan}\left(\frac{\rho_d \sin(\theta - \varphi_s)}{\rho_s + \rho_d \cos(\theta - \varphi_s)}\right) \quad (15)$$

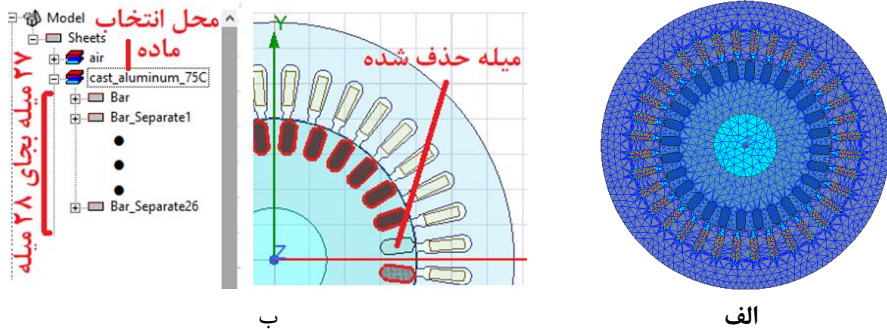
عبارت $g^{-1}(\varphi, \theta)$ نشانگر تابع فاصله هوایی معکوس برای ME است که متأثر از تغییرات زاویه‌ها نسبت به استاتور و روتور است. ρ ، ρ_s و ρ_d به ترتیب شدت ناهم‌محوری مرکب، شدت ناهم‌محوری استاتیکی و دینامیکی هستند. φ_M نشانگر موقعیت زاویه دارای حداقل طول هوایی نسبت به مرجع استاتور است.

برای اعمال خطاهای هم‌زمان، اثر BRB در کاهش ابعاد ماتریسی مطابق (۱۱) و اثر ME در تابع فاصله هوایی مطابق (۱۳)، به صورت یکجا در (۱۲) لحاظ می‌شوند.

شبیه‌سازی خطا در نرم‌افزار FE

روش FE، یک روش عددی است که می‌تواند به عنوان یک رویکرد دقیق در تشخیص عیوب موتورهای الکتریکی استفاده شود [۲۵]. این روش از مشخصات دقیق مغناطیسی و هندسی موتور برای محاسبه توزیع میدان مغناطیسی استفاده می‌کند. لذا این توزیع میدان حاوی اطلاعات دقیق در مورد استاتور، روتور و قطعات مکانیکی است [۲۵]. از این روش برای شبیه‌سازی موتور سالم در [۲۶؛ ۲۷] و خطای روتور میله شکسته در [۲۸؛ ۲۹] و خطای ناهم‌محوری در [۳۰؛ ۳۱] استفاده شده است.

در این مقاله، برای شبیه‌سازی خطاهای BRB و ME، از ویژگی RMxprt در نرم‌افزار Ansys Electronic Desktop ۲۰۲۰، مطابق جدول ۱ و شکل ۲ استفاده شده است. در این مدل، موتور سالم و موتور معیوب با خطاهای مذکور در بارهای ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ با گام‌های ۲۰٪ شبیه‌سازی شده و شاخص‌های معروف معایب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای اعمال خطای ME از ویژگی Maxwell Eccentricity در Maxwell ACT بخش Extensions Wizards نرم‌افزار استفاده شده است. مطابق شکل ۲، برای اعمال خطای BRB می‌توان با انتخاب مواد با مقاومت بالا برای میله مذکور، مقاومت میله معیوب را افزایش داد تا میزان جریان آن کاهش یابد [۲۳]. همچنین می‌توان با توجه به ساختار دو بعدی شبیه‌سازی FE، میله روتور را نسبت به حالت سالم در شیار مدنظر لحاظ نکرد [۲۴]. در این مقاله روش دوم مدنظر بوده است.



شکل ۲. شبیه‌سازی SCIM با FE (الف) موتور سالم با مش بندی (ب) موتور با خطای یک میله شکسته.

ارائه شاخص جدید برای شناسایی خطاهای مکانیکی هم‌زمان

اندوکتانس متقابل بین یک مش روتور و یک فاز استاتور مطابق رابطه (۱۲) می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

$$L_{b,s}(\phi, \theta) = \mu_0 r L g_0^{-1} \begin{cases} N_s(i)(i\alpha_s - \theta_1) + N_s(i+1)(\theta_2 - i\alpha_s) \\ \text{if } I: (i-1)\alpha_s - (b-1)\alpha_r \leq \theta \leq (i+1)\alpha_s - b\alpha_r \\ N_s(i)(i\alpha_s - \theta_1) + N_s(i+1)\alpha_s + N_s(i+2)(\theta_2 - i\alpha_s) \\ \text{if } II: \text{Others} \end{cases} \quad (16)$$

که در آن، N_s تابع سیم‌پیچ اصلاح شده فاز استاتور، $L_{b,s}$ اندوکتانس متقابل بین میله روتور به شماره b و فاز s استاتور است. θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویای ابتدایی و انتهایی میله b ام روتور هستند. $\alpha_s = 2\pi/n_s$ زاویه مکانیکی هر شیار استاتور، n_s تعداد شیار هسته استاتور، $\alpha_r = 2\pi/n_b$ زاویه مکانیکی هر مش روتور و N_s تابع سیم‌پیچ اصلاح شده استاتور و i نشانگر شماره شیار استاتور است. علامت i در (۱۶) شماره شیار استاتور مقابل زاویه مرکز میله شماره b روتور است. رابطه (۱۲) می‌تواند برای شبیه‌سازی موتور مؤثر باشد ولی به وضوح فرکانس‌های موجود در پارامترهای موتور سالم و معیوب را ارائه نمی‌دهد و نیاز به مطالعه تحلیلی دارد. در این مقاله، برای استخراج شاخص‌های فرکانسی، روش ترکیبی از MWFA و سری فوریه پیشنهاد می‌گردد. با محاسبه ضرایب فوریه، فرمول سری فوریه L_{sr} حاصل می‌شود.

$$L_{sr}(\theta) = \frac{\mu_0 r L N}{\pi \cdot g_0} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{n_s} A_{hi} \cos(Ph(\theta - \theta_{hi}))/h^2 \quad (17)$$

$$\theta_{hi} = \begin{cases} i \times \alpha_s - b \times \alpha_r \\ i \times \alpha_s - (b-1) \times \alpha_r \end{cases}, A_{hi} = \begin{cases} \text{sign}(N_s(i) - N_s(i+1)) \\ -\text{sign}(N_s(i) - N_s(i+1)) \end{cases}$$

در رابطه فوق، N برابر تعداد دورهای هر کلاف سیم‌پیچ استاتور، P تعداد جفت قطب موتور، h برابر مرتبه هارمونیک، i برابر شماره شیار استاتور ($i \in \mathbb{N}$) و $\theta_{hi} \in (0, 2\pi/P]$ است. باید توجه داشت در صورت برقراری شرط بازه، هر دو بخش θ_{hi} باید در (۱۷) لحاظ شود. تابع دور استاتور در اکثر شیارهای متوالی دارای مقدار ثابتی است و لذا تفاضل عبارات $N_s(i)$ و $N_s(i+1)$ در A_{hi} صفر شده و (۱۷) ساده‌تر شود.

مدل تحلیلی بررسی شاخص‌های خطای BRB

برای ارائه مدل تحلیلی خطای BRB، می‌توان این خطا را به صورت یک روتور سالم به همراه میله اضافی لحاظ کرد که این میله اضافی دقیقاً در موقعیت میله شکسته روتور قرار گیرد. اندازه جریان میله اضافی برابر میله سالم و جهت آن در خلاف جهت جریان میله سالم است. در این صورت برآیند جریان دو میله صفر شده و عملکرد دو میله معادل یک میله شکسته خواهد بود. برای محاسبه هارمونیک‌های جریان میله روتور، می‌توان از (۱۰) و جریان سه فاز متعادل در استاتور با اتصال ستاره بهره برد.

$$[I_{sll}]^T = I_{s, \max} [\cos(\omega_s t), \cos(\omega_s t - 2\pi / 3)] \quad (18)$$

با جای‌گذاری (۱۷-۱۸) در (۱۰)، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] [I_r] + \begin{bmatrix} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{n_h} A_{hi} \cos(Ph(\theta - \theta_{hi})) / h^2 & L \\ & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) \\ \cos(\omega_s t - 2\pi / 3) \end{bmatrix} \quad (19)$$

با ساده‌سازی (۱۹)، مؤلفه‌های فرکانسی شار پیوندی مش‌های روتور به دست می‌آید. از مشتق‌گیری شار پیوندی در میله‌های روتور، ولتاژ القا شده و جریان روتور حاصل می‌شود [۱۶]. مؤلفه‌های فرکانسی جریان میله روتور عبارتند از:

$$[I_{rk}] = \left[\sum_{h=1}^{\infty} I_{rk}^h \cos(Ph\theta \pm \omega_s t - \varphi_{rk}) \right]_{k=1, \dots, n_r} \quad (20)$$

که در آن ω_s هارمونیک اصلی جریان تغذیه کننده موتور، I_{rk}^h برابر دامنه هارمونیک h ام جریان روتور در میله k ام روتور است. عبارت θ در (۲۰) می‌تواند به صورتی تعریف شود که شامل فرکانس اصلی چرخشی روتور به همراه نوسانات سرعت باشد [۱۶]، لذا:

$$\omega_r = d\theta / dt = \omega_{r0} + \sum_{\eta=1}^{\infty} \Delta\omega_{r\eta} \cos(2\eta s \omega_s t) \quad \square \quad \omega_{r0} = (1-s)\omega_s / P \quad (21)$$

با جای‌گذاری (۲۱) در (۲۰)، مؤلفه‌های فرکانسی جریان روتور مطابق (۲۲) به دست می‌آید.

$$f_{rk} = (h(1-s) \pm 1) f_s \quad (22)$$

جریان میله اضافی (I_{bb}) برابر جریان میله روتور و در خلاف جهت آن است و باعث ایجاد ترم اضافی در (۹) می‌شود که هارمونیک‌های زیر را در شار روتور و سپس در جریان استاتور تحمیل می‌کند.

$$\frac{d([L_{srl}] \times [I_{bb}])}{dt} = \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{n_h} A_{h'hi} \left\{ \begin{array}{l} \cos(\pm\omega_s t - \varphi_{rk} + P\theta_{hh'i}) / h'^2 + \cos(P(h-h')) \times \\ \{ \omega_{r0} + \sum_{\eta=1}^{\infty} \Delta\omega_{r\eta} \cos(2\eta s \omega_s t) \} \pm \omega_s t - \varphi_{rk} - P\theta_{hh'i} \end{array} \right\} \quad (23)$$

در رابطه فوق، h همان نقش h را دارد و برای تفکیک هارمونیک‌های اندوکتانس و جریان روتور استفاده شده است. با ساده‌سازی (۲۳)، مؤلفه‌های فرکانسی جریان استاتور در خطای BRB به دست می‌آید [۱۶].

$$f_{bb_lf} = (1 \pm 2\eta s)f_s \quad (24)$$

$$f_{bb_hf} = ((h' \pm h)(1 - s) \mp 1 \mp 2\eta s)f_s \quad (25)$$

رابطه (۲۴) مؤید رابطه (۱) است و دید دقیق‌تری را به این شاخص ارائه می‌دهد. مطابق (۲۴)، این شاخص در اثر نوسانات سرعت به وجود می‌آید که ناشی از شکست میله روتور است و با افزایش تعداد میله شکسته شده، نوسانات سرعت افزایش یافته و دامنه و تعداد شاخص‌های اطراف هارمونیک اصلی افزایش می‌یابد. شاخص خطای BRB در فرکانس‌های بالا در (۲۵) بیان شده است و یک رابطه جامع بوده و مشکلات شاخص‌های قبلی را رفع می‌کند.

مدل تحلیلی بررسی شاخص‌های خطای ME

برای ساده‌سازی مدل تحلیلی خطای ME، در برخی مقالات از دو جمله اول معکوس تابع فاصله هوایی مطابق (۱۳) استفاده می‌شود [۶]. این ساده‌سازی علاوه بر افزایش میزان خطا، باعث حذف اکثر هارمونیک‌های مرتبط با خطا می‌شود. در مراجع [۱۶] و [۱۷] نیز برای بررسی هارمونیک‌های خطای BRB با SE و DE از دو جمله اول این تابع استفاده شده است. در این مقاله، بسط دقیق معکوس تابع فاصله هوایی مطابق (۲۶-۲۷) ارائه می‌شود که شامل همه فرکانس‌های ناشی از خطای ME است. این بسط با استفاده از سری دو جمله‌ای، فرمول اوپلر و ضرایب مثلث خیام-پاسکال حاصل شده است.

$$g^{-1}(\varphi, \theta) = \frac{1}{g_0} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{2k} \left\{ \binom{2k}{k} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\rho}{2}\right)^m \binom{2k+m}{k} \cos(m(\varphi - \varphi_M)) \right\} \quad (26)$$

$$\left(\frac{\rho}{2}\right)^{2k} = (\rho_s \rho_d)^k \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \left(\frac{\rho_s^2 + \rho_d^2}{2\rho_s \rho_d}\right)^{k-j} \cos^j(\theta - \varphi_s) \quad (27)$$

که در آنها k ، h و m اعداد صحیح مثبت هستند. با جای‌گذاری روابط فوق در (۱۲)، اندوکتانس متقابل استاتور و روتور تحت خطای ME به دست می‌آید.

$$L_{sr_b}(\varphi, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{2k}{k} \left\{ \left(\frac{\rho}{2}\right)^{2k} L_{sr_b, h} + \frac{\mu_0 r L}{g_0} \sum_{j=0}^k (\rho_s \rho_d)^k \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \left(\frac{\rho_s^2 + \rho_d^2}{\rho_s \rho_d}\right)^{k-j} \times \right. \quad (28)$$

$$\left. \sum_{h=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{Ph + j} \cos\{(Ph + j)\theta - P\theta_{hi} - j\varphi_s\} - \frac{1}{Ph - j} \cos\{(Ph - j)\theta - P\theta_{hi} + j\varphi_s\} \right\} \right.$$

$$\left. + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cos(h\theta + \varphi) \right.$$

این اندوکتانس به دو بخش قابل تفکیک است که بخش اول شامل فرکانس‌هایی است که ناشی از θ و ρ^{2k} بوده و هارمونیک‌های $(Ph \pm k)\theta$ را ایجاد می‌کند. بخش دیگر شامل ضرایب سینوسی و ρ^{2k} بوده و هارمونیک‌های $h\theta$ را تولید

می‌کند. با استفاده از جای‌گذاری (۱۸) و (۲۸) در (۱۰)، مؤلفه‌های فرکانسی شار پیوندی در مش‌های روتور تحت خطای ME مطابق (۲۹) به‌دست می‌آید.

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} A_{k,h} \cos((Ph \pm k)\theta) & L \\ & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) \\ \cos(\omega_s t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (29)$$

شار روتور باعث اعمال ولتاژ در میله‌های روتور و جاری شدن جریان در آنها مطابق (۳۰) می‌شود.

$$[I_{rk,me}] = \left[\sum_{h'=1}^{\infty} I_{rk}^{h'} \cos((Ph' \pm k)\theta \pm \omega_s t - \varphi_{rk}) \right]_{k=1, \dots, n_b} \quad (30)$$

که در آن، \hat{h} و \hat{k} به ترتیب مشابه h و k هستند که به جهت تمییز ضرایب استفاده شده‌اند. با جای‌گذاری (۲۸) و (۳۰) در (۹) و لحاظ از (۲۱)، هارمونیک‌های شار استاتور ناشی از ME مطابق (۳۱) حاصل می‌شود.

$$\frac{d([L_{sll,me}] \times [I_{bb,me}])}{dt} = \sum_{\substack{k,k',h,h'=1 \\ P(h \pm h') \pm (k \pm k') \neq 3k}}^{\infty} \dot{\varphi}_{kk'hh'} \sin(\{(P(h \pm h') \pm (k \pm k'))\}) \quad (31)$$

$$(\omega_{r0} + \sum_{\eta=1}^{\infty} \Delta\omega_{r\eta} \cos(2\eta s \omega_s t)) \pm \omega_s t - \phi_{kk'hh'}$$

لذا هارمونیک‌های اعمال شده در جریان استاتور تحت خطای ME مطابق (۳۲) به‌دست می‌آید.

$$f_{me} = \left| \{p(h \pm h') \pm (k \pm k')\} \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm 1 \pm 2\eta s \right| \times f_s \quad (32)$$

if $P(h \pm h') \pm (k \pm k') \neq 3\lambda, \lambda=1,2, \dots \& \eta = 0$

نتایج قابل استخراج از (۳۲) به شرح زیر است که جامعیت آن را بیان می‌کند:

- الف- اگر $\lambda = P(h \pm h') \pm (k \pm k')$ ، حاصل می‌شود. ($\lambda = 1, 2, \dots$)
- ب- اگر $k \pm k' = 0$ ، ناهم‌محوری SE و اگر $k \pm k' \neq 0$ ، ناهم‌محوری DE در (۴) حاصل می‌شود.
- ج- شار هر مش روتور شامل فرکانس‌هایی با ضرایب $P(h \pm h') \pm (k \pm k')$ است که مضرب ۳ هستند ولی در شار مجموع روتور ضرایب فوق با مضرب ۳ حذف می‌شوند و تنها مضارب غیر ۳ باقی می‌مانند. این امر می‌تواند به دلیل شیفت پیدا کردن این شارها در روی هر میله روتور باشد که در شار مجموع و در نقطه ستاره سیم‌پیچ‌های استاتور خنثی می‌شود. وجود این ارتباط بین تعداد میله‌های روتور و خطای ME، می‌تواند به عنوان یک شاخص در بررسی خطاهای هم‌زمان ME و BRB باشد.
- د- یکی از عوامل اصلی نوسانات سرعت، شکست میله روتور است. در این بخش با فرض سالم بودن میله‌های روتور، ضریب نوسانات سرعت (η) صفر لحاظ شده است.
- ه- حالت خاصی از این فرمول برای $k=1$ برای خطای ناهم‌محوری SE در مقاله [۱۶] ارائه شده است. اما در این مقاله یک رابطه کلی ارائه شده که شامل ناهم‌محوری استاتیکی و دینامیکی است.

ارائه شاخص جدید برای خطاهای مکانیکی هم‌زمان

در این بخش، مدل تحلیلی برای خطاهای مکانیکی هم‌زمان ارائه می‌شود. در ابتدا فرض می‌شود که یک موتور با خطای ME وجود دارد که خطای BRB در آن اتفاق می‌افتد. لذا همانند بخش تحلیلی برای روتور میله شکسته، می‌توان روتور معیوب را با یک روتور سالم به همراه میله اضافی لحاظ کرد. جریان میله اضافی برابر جریان میله روتور با خطای ناهم‌محوری و در خلاف جهت آن است. جریان هر میله روتور با خطای ناهم‌محوری در (۳۰) ارائه شده است. می‌توان در تحلیل خطاهای هم‌زمان، ماتریس جریان روتور را به دو بخش تفکیک کرد که شامل ماتریس جریان روتور با خطای ME و ماتریس جریان میله‌های اضافی یا میله‌های شکسته روتور باشد. $I_{bb,me}$ ماتریس جریان میله شکسته روتور با خطای ME است و باعث ایجاد ترم اضافی در (۹) می‌شود که هارمونیک‌های زیر را در شار روتور و سپس در جریان استاتور تحمیل می‌کند.

$$\frac{d([L_{srlt,me}] \times [I_{bb,me}])}{dt} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{k'=1}^{\infty} \sum_{h'=1}^{\infty} A_{k,h} I_{r_k,h}^{h'} \{ (P(h \pm h') \pm (k \pm k')) \omega_r \pm \omega_s \} \quad (33)$$

$$\sin(\{ (P(h \pm h') \pm (k \pm k')) \omega_r \pm \omega_s \} t - \phi_{khk'h'} - \phi_b)$$

مطابق نتایج (۳۲)، میله اضافی دارای شاری است که عبارت $P(h \pm h') \pm (k \pm k')$ در فرکانس آن مضرب ۳ است. لذا به یک روتور سالم با خطای ناهم‌محوری این فرکانس‌ها اضافه می‌شود. از همین فرکانس‌های اضافه شده می‌توان برای تفکیک خطای ME و خطاهای هم‌زمان مکانیکی استفاده کرد و شاخص خطاهای هم‌زمان را به صورت (۳۴) بیان نمود.

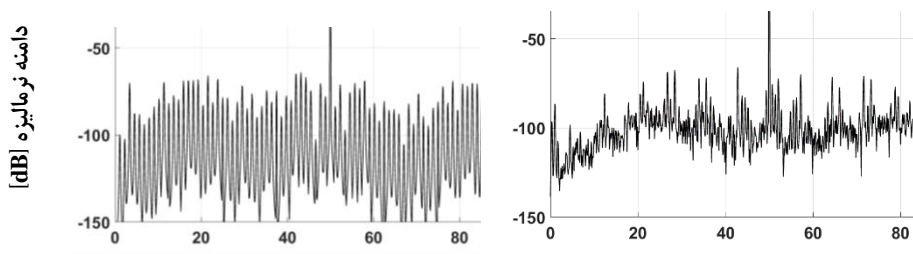
همچنین سایر فرکانس‌های شار میله اضافی که عبارت $P(h \pm h') \pm (k \pm k')$ مضرب ۳ نیست، نوسانات سرعت وجود دارد و η غیر صفر است. این فرکانس‌ها نیز به عنوان شاخص دیگری برای شناسایی خطاهای هم‌زمان مکانیکی در (۳۴) معرفی می‌شوند.

$$f_{me,bb} = \{ (p(h \pm h') \pm (k \pm k')) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm 1 \pm 2\eta s \} f_s \quad (34)$$

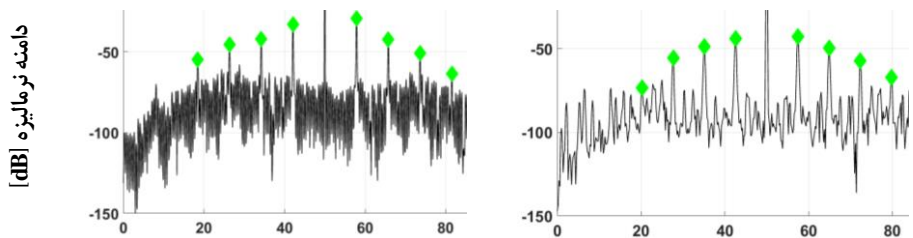
if $P(h \pm h') \pm (k \pm k') = 3\lambda$, $\lambda=1,2,\dots$ & $\eta = 0$
 if $P(h \pm h') \pm (k \pm k') \neq 3\lambda$, $\lambda=1,2,\dots$ & $\eta \neq 0$

نتایج شبیه‌سازی با MWFA و FE

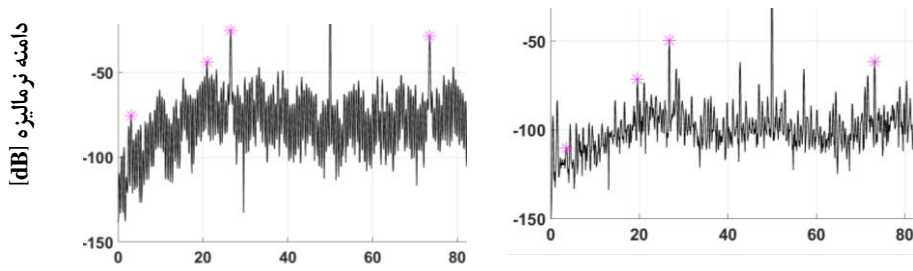
شبیه‌سازی‌ها با دو روش MWFA و FE مطابق اطلاعات جدول ۱ انجام شد که در آنها، خطای ME با لحاظ $SE/1.5 = DE = 30\%$ و خطای BRB، با یک میله شکسته بوده است. نتایج این شبیه‌سازی و طیف فرکانسی نرمالیزه برای موتور سالم و معیوب با خطاهای جداگانه و هم‌زمان در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق شکل ۳ و شبیه‌سازی FE، شاخص‌های مربوط به خطای ME در 26.8 Hz و 73.13 Hz و خطای BRB در 27.63 Hz ، 34.2 Hz ، 42.5 Hz ، 57.9 Hz و 65.8 Hz مشخص شده‌اند. هارمونیک‌های مختص عیوب هم‌زمان در 10.9 Hz ، 19.4 Hz ، 34.3 Hz ، 43.1 Hz ، 56.9 Hz ، 64.9 Hz ، 81 Hz و 87.85 Hz افزایش دامنه مناسبی برای تفکیک عیوب نشان می‌دهند که این هارمونیک‌ها نیز علامتگذاری شده‌اند.



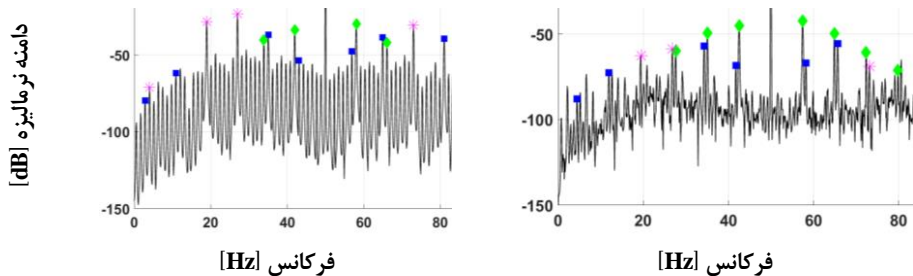
(الف)



(ب) شاخص با علامت \blacklozenge



(ج) شاخص با علامت $*$



(د) شاخص با علامت \blacksquare

شکل ۳- طیف فرکانسی نرمالیزه جریان با روش MWFA (سمت چپ) و با روش FE (سمت راست) (الف) موتور سالم (ب) عیب BRB (ج) عیب ME (د) عیوب همزمان.

جدول ۱. اطلاعات موتور آزمایشگاهی.

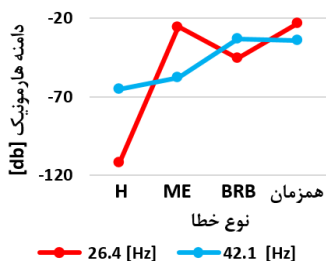
پارامتر	مقدار
Rated Power and Voltage	۱.۱ [kW], ۳۸۰
Frequency and Pole Pairs Number	۵۰ [Hz], ۲
Phases Configuration	Star
Stator and Rotor Slots Number	۳۶, ۲۸
Healthy Air Gap Length	۰.۳ [mm]
Air Gap Mean Radius	۴۰ [mm]
Stack Length	۶۰ [mm]
Stator Winding Turn Per Coil	۶۳ [Turn]
Stator Resistance Per Phase	۷.۸ [Ω /Phase]
Rotor Bar Resistance	۹.۷۲ [$\mu\Omega$]
End Ring Resistance	۸ [$\mu\Omega$]
Leakage inductance of Stator	۱۸.۸ [mH/Phase]
Leakage inductance of Rotor Bar	۰.۵۷۱ [μ H]
Leakage inductance of End Ring	۰.۰۵۱ [μ H]
Inertia Moment	۰.۰۰۲۳۸۵ [Kg.m ²]
"Winding Scheme of Phase "A	A-۱-۱۲'-۲-۱۱'-۳-۱۰'-۱۹-۳۰'-۲۰-۲۹'-۲۱-۲۸'-X

در دو روش شبیه‌سازی، تفاوت اندکی در لغزش و فرکانس شاخص‌ها مشاهده شد که ناشی از عدم احتساب اشباع، شار نشتی و شیارهای استاتور در روش MWFA بوده است. در جدول ۲، تأثیرپذیری عیوب از همدیگر براساس شبیه‌سازی FE در شکل ۳ ارائه شده است.

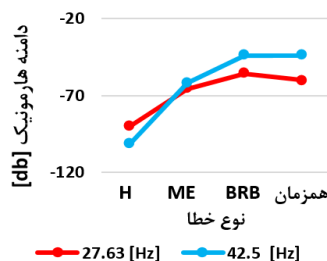
- مطابق ستون دوم جدول ۲، بررسی تأثیرپذیری شاخص BRB از سایر عیوب نشان می‌دهد:
 - در خطای BRB، دامنه شاخص BRB نسبت به حالت سالم افزایش داشته و تشخیص درست است.
 - در خطای ME، دامنه شاخص BRB افزایش قابل توجهی دارد و تشخیص شاخص نادرست است.
 - در خطاهای هم‌زمان، دامنه شاخص BRB افزایش قابل توجهی دارد و تشخیص شاخص نادرست است.
 - مطابق ستون سوم جدول ۲، بررسی تأثیرپذیری شاخص ME از عیوب دیگر نشان می‌دهد:
 - در خطای ME، دامنه شاخص ME نسبت به حالت سالم افزایش داشته و تشخیص درست است.
 - در خطای BRB، دامنه شاخص ME در شبیه‌سازی FE کاهش یافته و تشخیص درست است.
 - در خطاهای هم‌زمان، دامنه شاخص ME افزایش قابل توجهی دارد و تشخیص شاخص نادرست است.
 - مطابق ستون چهارم جدول ۲، تأثیرپذیری شاخص عیوب هم‌زمان از خطاهای دیگر مطالعه شده است:
 - در خطای BRB، تغییرات دامنه شاخص خطای هم‌زمان بسیار کم است و تشخیص درست است.
 - در خطای ME، تغییرات دامنه شاخص خطای هم‌زمان بسیار کم است و تشخیص درست است.
 - در خطاهای هم‌زمان، دامنه شاخص پیشنهادی نسبت به سایر موارد افزایش یافته و تشخیص درست است.
- مطابق هر دو روش شبیه‌سازی شده، شاخص پیشنهاد شده برای شناسایی و تفکیک خطاهای هم‌زمان مکانیکی دقت مناسبی دارد و لذا مورد تایید است.

جدول ۲. تأثیرپذیری خطاهای مکانیکی.

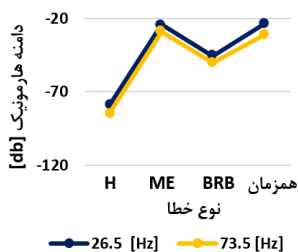
تغییرات شاخص و نوع تشخیص شاخص	شاخص BRB / تشخیص	شاخص ME / تشخیص	شاخص پیشنهادی عیوب همزمان / تشخیص	نوع عیب
کم / درست	زیاد / درست	کم / درست	کم / درست	BRB
کم / درست	زیاد / نادرست	زیاد / درست	کم / درست	ME
زیاد / درست	زیاد / نادرست	کم / درست	زیاد / درست	عیب همزمان



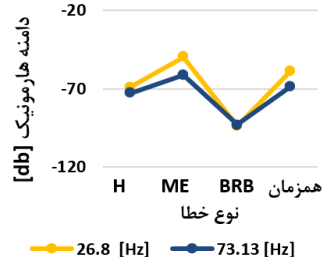
(الف)



(ب)



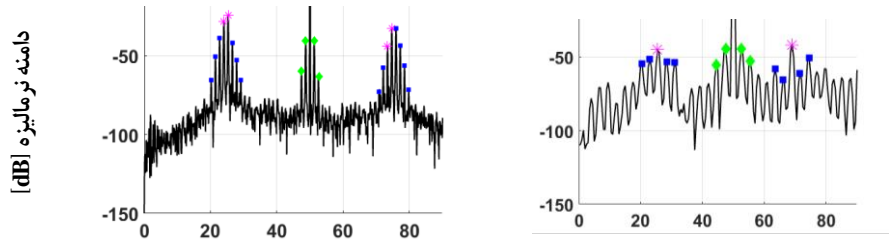
(ج)



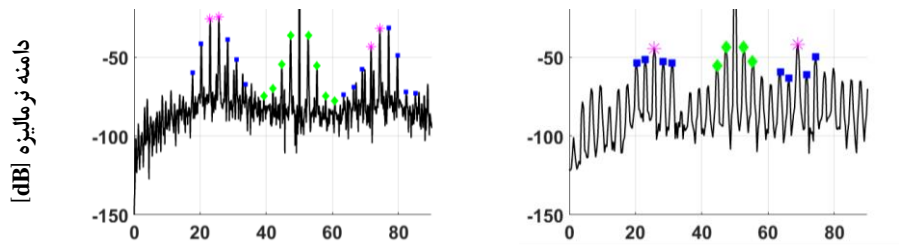
شکل ۴. مقایسه دامنه برخی از شاخص‌ها با روش MWFA (سمت چپ) و با روش FE (سمت راست) در چهار حالت (الف) شاخص BRB (ب) شاخص ME (ج) شاخص عیوب همزمان.

بررسی اثر بارگذاری بر شاخص پیشنهادی در شبیه‌سازی‌ها

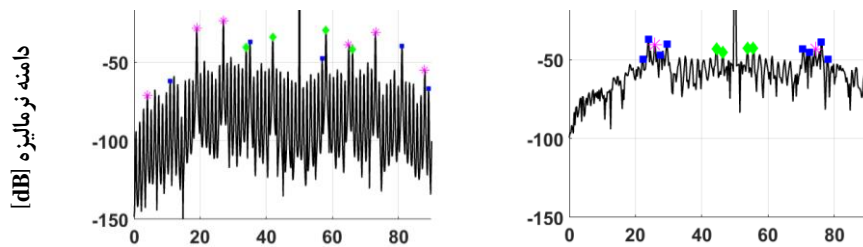
برای بررسی اثر بارگذاری بر شاخص پیشنهادی، شبیه‌سازی خطاهای همزمان BRB و ME با روش‌های MWFA و FE برای بارهای ۲۰٪ تا ۸۰٪ بار کامل با گام ۲۰٪ مطالعه شد و نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۵ ارائه شد.



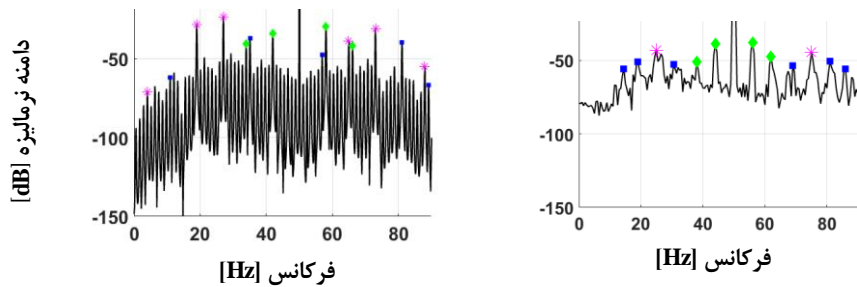
(الف)



(ب)



(ج)



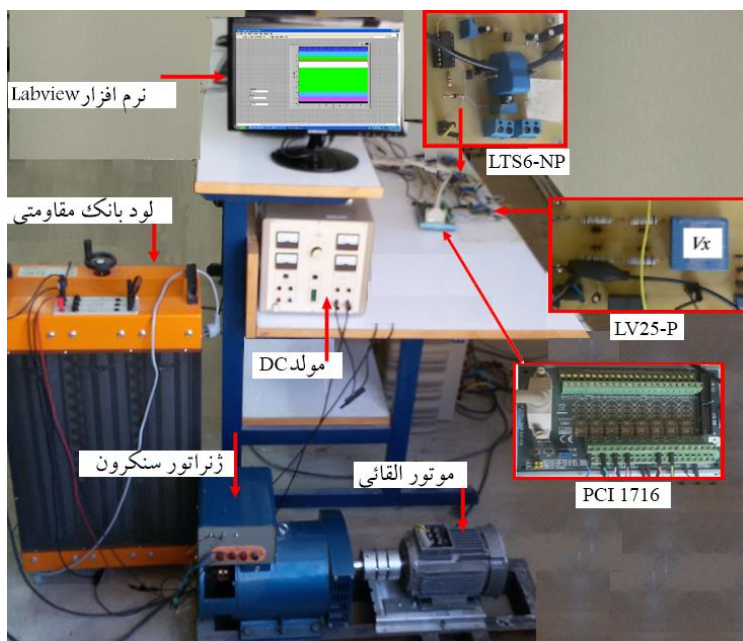
(د)

شکل ۵. طیف فرکانسی نرمالیزه جریان باروش MWFA (سمت چپ) و باروش FE (سمت راست) بارگذاری در (الف) ۲۰٪ بارکامل (ب) ۴۰٪ بارکامل (ج) ۶۰٪ بارکامل (د) ۸۰٪ بارکامل.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود شاخص پیشنهادی افزایش دامنه مناسبی در بارهای ۲۰٪ تا ۸۰٪ بار کامل دارد. همچنین دامنه این شاخص در بارهای کم نسبت به بارهای بالاتر، افزایش بسیار خوبی دارد. لذا عملکرد این شاخص مستقل از میزان بار موتور است. این موضوع توانایی شاخص پیشنهادی را برای پایش خطاهای هم‌زمان در بارگذاری‌های مختلف مطابق شبیه‌سازی‌های MWFA و FE را اثبات می‌کند.

نتایج تست‌های آزمایشگاهی

برای انجام تست‌های عملی یک مجموعه آزمایشگاهی کامل مطابق شکل ۶ مهیا شد. در این مجموعه، یک موتور با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ و با قابلیت اعمال خطاهای مکانیکی جداگانه و هم‌زمان استفاده شد. جهت اعمال بارهای مختلف به موتور، یک مجموعه ژنراتور سنکرون و لود بانک اهمی سه فاز نیز در این مجموعه قرار دارد.



شکل ۶. مجموعه تست آزمایشگاهی.

ابتدا می‌توان جریان تحریک را توسط منبع DC متغیر تا جریان تحریک نامی ژنراتور افزایش داد. در این حالت می‌توان گشتاور را از حدود ۷۰٪ الی ۸۵٪ بار نامی موتور تغییر داد. در مرحله بعد، مقاومت لود بانک کاهش داده می‌شود. این کاهش مقاومت، جریان خروجی ژنراتور را در ولتاژ نامی آن افزایش داده و گشتاورهای بالاتری را فراهم می‌کند. با این کار، مقدار گشتاور تا مقدار گشتاور نامی موتور نیز می‌رسد. برای انجام نمونه‌برداری از سخت‌افزار PCI ۱۷۱۶ به همراه ۴ عدد سنسور جریانی LTS۶-NP و ۴ عدد سنسور ولتاژی LV۲۵-P با نرم‌افزار Labview-۷۲۰۱۲ استفاده شده است. با انجام تست‌ها و بررسی‌های اولیه مشخص شد که شاخص‌های ناهم‌محوری در یک موتور سالم در اثر یک کوپلینگ ثابت مطابق شکل ۷-الف ایجاد می‌شود که می‌تواند از عواملی همانند عدم هم‌راستایی محورهای موتور و ژنراتور، ترکیب ناهم‌محوری ذاتی موتور و ژنراتور و عدم تراز دقیق سطح فیکسچر باشد. حتی این عوامل می‌تواند در پایش وضعیت، موتور سالم را به اشتباه یک موتور با عیب ME تشخیص دهد. برای حل این مشکل، استفاده از یک کوپلینگ انعطاف‌پذیر

به جای کوپلینگ ثابت پیشنهاد شد. لذا در این تست‌ها، کوپلینگ آلومینیومی دو دیسکی با اتصال کلمپی با کد -DMPA مطابق شکل ۷-ب استفاده شد و مشاهده گردید که میزان شاخص‌های ME موتور سالم کوپله شده با ژنراتور، به همان میزان ناهم‌محوری ذاتی موتور سالم تقلیل یافت و میزان تشخیص اشتباهی را به حداقل رساند.



(ب)



(الف)

شکل ۷. انواع کوپلینگ (الف) کوپلینگ ثابت (ب) کوپلینگ DMPA-C.

در مرحله دوم، برای اعمال خطاهای مختلف BRB و ME اقدامات لازم انجام شد. برای اعمال خطای BRB مطابق شکل ۸، از یک روتور با یک میله سوراخکاری شده به جای روتور سالم استفاده شد.



(ب)



(الف)

شکل ۸. روتور سالم (ب) روتور با عیب BRB.

برای مطالعه خطای ME، بلبرینگ‌های موتور سالم با کد ۶۲۰۵RS با بلبرینگ‌های مختلف جایگزین شد. در بلبرینگ‌های حالت ME، یک حلقه داخلی و یک حلقه بیرونی بر روی بلبرینگ جایگزین نصب شد و ناهم‌محوری مد نظر بر روی حلقه‌های نصب شده اعمال شد. همچنین موقعیت کمترین فاصله هوایی بر روی هر حلقه نیز مشخص شد که در هنگام نصب بر روی محور روتور و قالباق موتور، کمترین فواصل هوایی در دو سمت روتور، روبروی هم قرار گیرند تا از ایجاد خطای عدم هم‌راستایی در روتور اجتناب شود. بلبرینگ جایگزین با کد ۶۹۰۶ZZ بود و با توجه به حلقه‌های داخلی و بیرونی خطای ME با میزان $SE = 30\%$ و $DE = 20\%$ لحاظ شد. تصاویر این بلبرینگ‌ها و حلقه‌ها در شکل ۹ ارائه شده است.



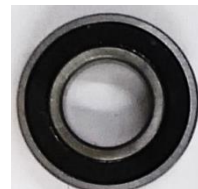
(د)



(ج)



(ب)



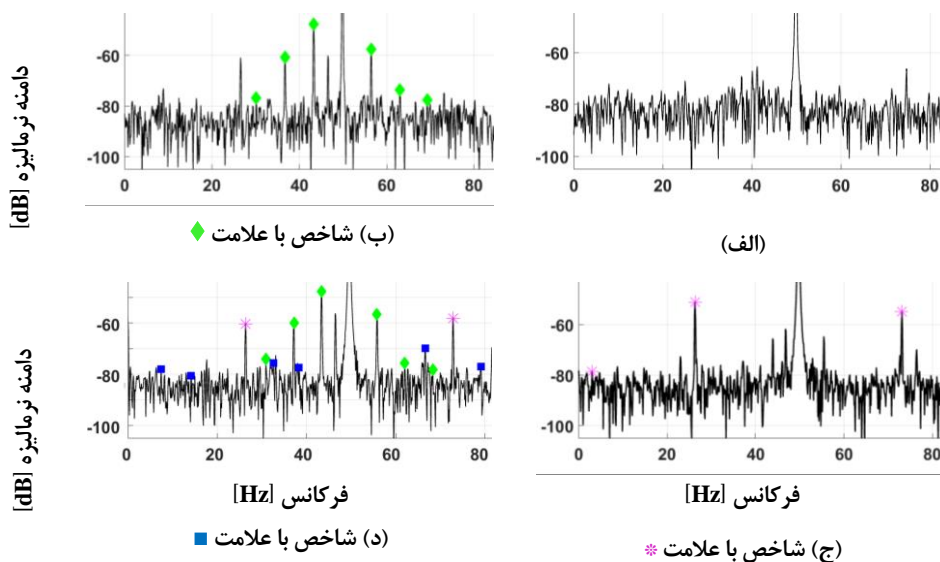
(الف)

شکل ۹. (الف) بلبرینگ ۶۲۰۵RS (ب) بلبرینگ ۶۹۰۶ZZ (ج) حلقه بیرونی (د) حلقه داخلی.

در شکل ۱۰، طیف فرکانسی نرمالیزه شده جریان در تست‌های عملی برای چهار حالت مختلف در بار نامی مشخص شده‌اند. مطابق این شکل، شاخص‌های مربوط به خطای ME در ۲۶.۳۳ Hz و ۷۳.۱۱ Hz و خطای BRB در ۳۶.۶۷ Hz، ۴۳.۳۳ Hz، ۵۶.۴۴ Hz و ۶۳ Hz هستند. هارمونیک‌های مختص عیوب هم‌زمان نیز در ۱۶.۶۷ Hz، ۳۳.۱۱ Hz، ۶۶.۶۷ Hz و ۷۹.۳۶ Hz افزایش دامنه مناسبی نشان می‌دهند که این هارمونیک‌ها نیز علامت‌گذاری شده‌اند. همچنین بررسی تأثیرپذیری عیوب از همدیگر در تست‌های عملی در جدول ۳ ارائه شده است که منطبق بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در جدول ۲ است.

جدول ۳. تأثیرپذیری خطاهای مکانیکی از همدیگر مطابق تست عملی.

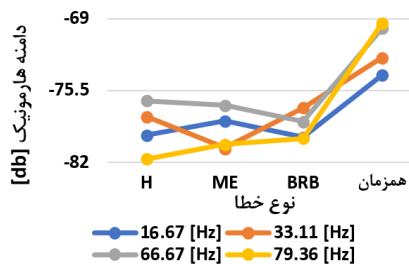
نوع عیب	تغییرات شاخص و نوع تشخیص شاخص		
	شاخص BRB / تشخیص	شاخص ME / تشخیص	شاخص پیشنهادی عیوب هم‌زمان / تشخیص
BRB	زیاد/درست	زیاد/نادرست	کم/درست
ME	زیاد/نادرست	زیاد/درست	کم/درست
عیب هم‌زمان	زیاد/نادرست	زیاد/نادرست	زیاد/درست



شکل ۱۰. طیف فرکانس نرمالیزه جریان در (الف) موتور سالم (ب) موتور با عیب BRB

(ج) موتور با عیب ME (د) موتور با عیوب هم‌زمان BRB و ME.

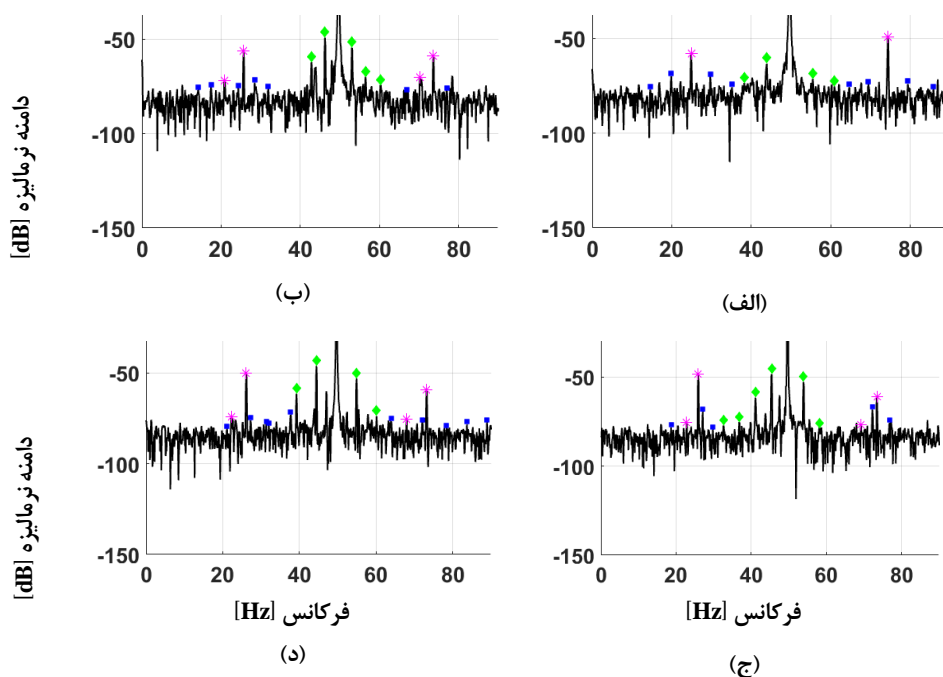
در شکل ۱۱، تأثیرپذیری چهار شاخص عیوب هم‌زمان از خطاهای دیگر مطالعه شده است. مطابق این شکل، در خطاهای جداگانه، تغییرات دامنه شاخص پیشنهادی بسیار کم بوده و در خطای هم‌زمان، دامنه شاخص پیشنهادی افزایش مناسبی یافته است. لذا مطابق روش آزمایشگاهی، شاخص پیشنهادی برای تشخیص خطای هم‌زمان و تفکیک آن از عیب جداگانه دقت لازم را دارد. بنابراین نتایج آزمایشگاهی همانند نتایج شبیه‌سازی توانایی شاخص پیشنهادی برای تشخیص عیوب هم‌زمان را تأیید می‌کند.



شکل ۱۱. دامنه شاخص پیشنهادی برای تشخیص عیوب همزمان در چهار حالت تست آزمایشگاهی.

بررسی اثر بارگذاری بر شاخص پیشنهادی در تست آزمایشگاهی

در این بخش، اثر میزان بار بر شاخص پیشنهادی در تست‌های آزمایشگاهی بررسی می‌شود. این تست‌ها، برای جریان‌های ۲.۲ A تا ۲.۸ A با گام ۰.۲A مطالعه شد و نتایج آن در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۱۲. طیف فرکانسی نرمالیزه جریان با تست‌های آزمایشگاهی در بارگذاری (الف) ۲.۲ A (ب) ۲.۴ A (ج) ۲.۶ A (د) ۲.۸ A

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود شاخص پیشنهادی افزایش دامنه مناسبی در بارهای مختلف دارد و عملکرد آن مستقل از میزان بار موتور است. مشابه نتایج شبیه‌سازی‌های MWFA و FE، نتایج آزمایشگاهی نیز توانایی شاخص پیشنهادی را برای پایش خطاهای همزمان در بارگذاری‌های مختلف اثبات می‌کند.

نتیجه گیری

خطاهای همزمان مکانیکی می‌توانند به دلیل نقص در ساخت، مونتاژ، ناهمچوری ذاتی موتور و عدم هم‌راستایی محورهای موتور و بار ایجاد شده و سیستم پایش وضعیت موتور را مختل نمایند. این مقاله به مطالعه عیوب جداگانه و هم‌زمان BRB و ME با رویکردی تحلیلی پرداخته است و بسط دقیق معکوس تابع فاصله هوایی را ارائه می‌دهد که شامل همه هارمونیک‌های این تابع است. مطابق روش MWFA، رابطه‌ای پر کاربرد برای اندوکتانس متقابل در حالت سالم ارائه شده است. همچنین طیف هارمونیک جریان میله‌های روتور، اندوکتانس‌ها و شار استاتور در حالت سالم، عیوب جداگانه و هم‌زمان مکانیکی ارائه شد که می‌تواند مبنایی برای استخراج شاخص‌های جدید قرار گیرد. این مقاله نگرش جامعی در رابطه با نحوه تولید شاخص‌های فرکانسی در خطاهای مکانیکی ارائه می‌دهد و اثر نوسانات سرعت و ضرایب هارمونیک را در آن بررسی می‌کند. شبیه‌سازی‌های مقاله براساس روش‌های MWFA و FE انجام شده و شاخص جدیدی برای شناسایی خطای هم‌زمان مکانیکی در جریان استاتور معرفی گردیده است. براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، این شاخص توانایی مناسبی در تفکیک خطای هم‌زمان BRB و ME از حالت سالم و عیوب جداگانه دارد و مستقل از میزان بار موتور است. علاوه بر شبیه‌سازی‌ها، یک مجموعه کامل آزمایشگاهی برای بررسی شاخص جدید در خطاهای مذکور مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آزمایشگاهی، توانایی چشمگیر شاخص پیشنهادی را تأیید کرد.

References

- [1] Gundewar, S. K., & Kane, P. V. (2021). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9(4), 643-674. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00253-y>
- [2] Choudhary, A., Goyal, D., & Letha, S. S. (2020). Infrared thermography-based fault diagnosis of induction motor bearings using machine learning. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Sensors Journal*, 21(2), 1727-1734. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3015868>
- [3] Aguayo-Tapia, S., Avalos-Almazan, G., Rangel-Magdaleno, J. d. J., & Ramirez-Cortes, J. M. (2023). Physical Variable Measurement Techniques for Fault Detection in Electric Motors. *Energies*, 16(12), 4780. <https://doi.org/10.3390/en16124780>
- [4] Martinez-Herrera, A. L., Ferrucho-Alvarez, E. R., Ledesma-Carrillo, L. M., Mata-Chavez, R. I., Lopez-Ramirez, M., & Cabal-Yopez, E. (2022). Multiple fault detection in induction motors through homogeneity and kurtosis computation. *Energies*, 15(4), 1541. <https://doi.org/10.3390/en15041541>
- [5] Garcia-Calva, T., Morinigo-Sotelo, D., Fernandez-Cavero, V., & Romero-Troncoso, R. (2022). Early Detection of Faults in Induction Motors—A Review. *Energies*, 15(21), 7855. <https://doi.org/10.3390/en15217855>
- [6] Klein, C., Pinter, M., Palmieri, M., Nienhaus, M., & Grasso, E. (2022). An exact solution to the modified winding function for eccentric permanent magnet synchronous machines. *Mathematics*, 10(3), 345. <https://doi.org/10.3390/math10030345>
- [7] Polat, A., Yilmaz, A., & Ergene, L. T. (2018). Investigation of The Effects of Eccentricity on Induction Motor via Multi-Resolution Wavelet Analysis. *Electrica*, 18(2), 187-197. <https://doi.org/10.5152/ijueee.2018.1821>
- [8] Kandukuri, S. T., Senanyaka, J. S. L., Huynh, V. K., & Robbersmyr, K. G. (2019). A Two-Stage Fault Detection and Classification Scheme for Electrical Pitch Drives in Offshore Wind Farms Using Support Vector Machine. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industry Applications*, 55(5), 5109-5118. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2924866>

- [9] Agah, G. R., Rahideh, A., Khodadadzadeh, H., Khoshnazar, S. M., & Hedayatikia, S. (2022). Broken rotor bar and rotor eccentricity fault detection in induction motors using a combination of discrete wavelet transform and Teager–Kaiser energy operator. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Energy Conversion*, 37(3), 2199-2206. <https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3162394>
- [10] Ojaghi, M., & Mohammadi, M. (2017). Unified modeling technique for axially uniform and nonuniform eccentricity faults in three-phase squirrel cage induction motors. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5292-5301. <http://doi.org/10.1109/TIE.2017.2760280>
- [11] Zhu, R., Tong, X., Han, Q., He, K., Wang, X., & Wang, X. (2023). Calculation and Analysis of Unbalanced Magnetic Pull of Rotor under Motor Air Gap Eccentricity Fault. *Sustainability*, 15(11), 8537. <https://doi.org/10.3390/su15118537>
- [12] Ishkova, I., & Vítek, O. (2015, May 20-22). *Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis*. 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Kouty nad Desnou, Czech Republic. <https://doi.org/10.1109/EPE.2015.7161130>
- [13] Fireteanu, V., Constantin, A. I., Zorig, A., & Chouder, A. (2018, October 4-6). *Impact of the Stator Short-circuit, Rotor Broken Bar and Eccentricity Faults on Rotor Force for Loaded and No-load Induction Motors Operation*. 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, Craiova, Romania. <https://doi.org/10.1109/I CATE.2018.8551471>
- [14] Fireteanu, V., Constantin, A. I., & Popa, M. (2018, September 3-6). *Influence of Single or Multiple Faults Short-circuit, Broken Rotor Bar and Eccentricity on the Torque and Rotor Force in Induction Motors*. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines, Alexandroupoli, Greece. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507008>
- [15] Antonino-Daviu, J., Quijano-López, A., Climente-Alarcon, V., & Razik, H. (2017, October 1-5). *Evaluation of the detectability of rotor faults and eccentricities in induction motors via transient analysis of the stray flux*. 2017 Institute of Electrical and Electronics Engineers Energy Conversion Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio, United States. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096633>
- [16] Kaikaa, M. Y., Hadjami, M., & Khezzer, A. (2013). Effects of the simultaneous presence of static eccentricity and broken rotor bars on the stator current of induction machine. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2452-2463. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2270216>
- [17] Kaikaa, M. Y., & Boudjlida, L. (2018). Detection of combined faults in squirrel cage induction motors. *European Mechanical Science*, 2(1), 9-16. <https://doi.org/10.26701/ems.323739>
- [18] Georgoulas, G., Climente-Alarcon, V., Antonino-Daviu, J. A., Tsoumas, I. P., Stylios, C. D., Arkkio, A., & Nikolakopoulos, G. (2017). The Use of a Multilabel Classification Framework for the Detection of Broken Bars and Mixed Eccentricity Faults Based on the Start-Up Transient. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Informatics*, 13(2), 625-634. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2637169>
- [19] Lee, J-H., Pack, J-H., & Lee, I-S. (2019). Fault diagnosis of induction motor using convolutional neural network. *Applied Sciences*, 9(15), 2950. <https://doi.org/10.3390/app9152950>

- [20] Huang, Z., Wang, T., Liu, W., Valencia-Cabrera, L., Pérez-Jiménez, M. J., & Li, P. (2021). A fault analysis method for three-phase induction motors based on spiking neural P systems. *Complexity*, 2021, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2021/2087027>
- [21] Petrov, A., Plokhov, I., Rassõlkin, A., Vaimann, T., Kallaste, A., & Belahcen, A. (2017, August 29- September 01). *Adjusted electrical equivalent circuit model of induction motor with broken rotor bars and eccentricity faults*. 2017 Institute of Electrical and Electronics Engineers 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Tinos, Greece. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062334>
- [22] Abad, H. B. B., Ojaghi, M., & Taheri, A. (2021). Efficient index for detecting the stator winding interturn fault in six-phase squirrel-cage induction motors. *Measurement*, 184, 109912. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109912>
- [23] Ojaghi, M., Sabouri, M., & Faiz, J. (2018). Performance analysis of squirrel-cage induction motors under broken rotor bar and stator inter-turn fault conditions using analytical modeling. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2842240>
- [24] Liang, X., Ali, M. Z., & Zhang, H. (2020). Induction Motors Fault Diagnosis Using Finite Element Method: A Review. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1205-1217. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2958908>
- [25] Terron-Santiago, C., Martinez-Roman, J., Puche-Panadero, R., & Sapena-Bano, A. (2021). A review of techniques used for induction machine fault modelling. *Sensors*, 21(14), 4855. <https://doi.org/10.3390/s21144855>
- [26] Kuczmann, M., Gadó, K., Horváth, S., Vajda, I., Marcsa, D., & Belahcen, A. (2018). Analysis of an Induction Machine by the Finite Element Method. *Recent Innovations in Mechatronics*, 5(1), 1-5. <https://doi.org/10.17667/riim.2018.1/5>
- [27] Ding, Z., Bu, W., Cai, X., Wu, X., & Liu, S. (2019, October 12-13). *Finite Element Analysis and Modeling of Three-Phase Induction Motor*. 2019 4th International Conference on Insulating Materials, Material Application and Electrical Engineering, Melbourne, Australia. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/677/5/052055>
- [28] Halder, S., Bhat, S., & Dora, B. (2022). Prediction of broken rotor bar in induction motor using spectral entropy features and tibo optimized svm. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(5), 1962-1979. <https://doi.org/10.55730/1300-0632.3916>
- [29] Mazouji, R., Khaloozadeh, H., & Arasteh, M. (2020, February 4-6). *Fault Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Finite Element Analysis*. 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference, Tehran, Iran. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC49159.2020.9088429>
- [30] Tian, K., Zhang, T., Ai, Y., & Zhang, W. (2018). Induction motors dynamic eccentricity fault diagnosis based on the combined use of WPD and EMD-simulation study. *Applied Sciences*, 8(10), 1709. <https://doi.org/10.3390/app8101709>
- [31] Fantin Irudaya Raj, E., & Appadurai, M. (2022). Static 2D-Finite Element Analysis of Eccentricity Fault in Induction Motor. In M. L. Kolhe, S. B. Jaju, & P. M. Diagavane (Eds.), *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development, Vol 1*. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6875-3_33