



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 3, 2020
Research Paper

Developing an Intelligent Pattern Using Principal Component Analysis Method to Detect Eccentricity Faults in Squirrel-Cage Induction Motors

Mahdi Ahmadi

Dept. of Electrical Engineering, Esfarayen University of Technology, North-Khorasan, Iran
mahdiahmadi@esfarayen.ac.ir

Abstract:

Eccentricity fault is one of the prevalent faults in rotating machines which can cause other mechanical and electrical faults. This paper focuses on detecting the static and dynamic eccentricity faults in the squirrel-cage induction motors. The induction motor is modeled by the finite element method (FEM), a powerful and accurate method, using FLUX 2D software. The current signal cannot be used to detect the static and dynamic eccentricity faults especially when their severity is small. Therefore, the search-coil based method is employed and the voltage of two symmetrical search-coils is analyzed to detect and diagnose the static and dynamic faults. Since two search-coils are open-circuit, they do not affect the behavior of the induction motor. The analysis based on the principal component analysis (PCA) method shows that there exists an intelligent pattern that, firstly, is sensitive to the occurrence of eccentricity faults, even to a low degree, and secondly, has the ability to distinguish the type of fault (static or dynamic).

Keywords: Dynamic Eccentricity, Fault Detection, Induction Motor, Principal Component Analysis Method, Static Eccentricity.



2252-083X/ © 2020 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.120169.1304>

ارائه الگوی هوشمند مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اساسی برای تشخیص خطای ناهم‌راستایی در موتورهای القایی قفس سنجابی

مهدی احمدی

استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین - خراسان شمالی - ایران
mahdiahmadi@esfarayen.ac.ir

چکیده: خطای ناهم‌راستایی، یکی از خطاهای مهم مکانیکی در ماشین‌های دوار است که منشأ پیدایش خطاهای دیگر می‌شود. این مقاله به موضوع تشخیص خطای ناهم‌راستایی در موتورهای القایی قفس سنجابی در دو حالت استاتیک و دینامیک متمرکز است. روش المان محدود (FEM) روشی دقیق در این زمینه است که در این پژوهش برای مدل‌سازی موتور القایی در دو حالت سالم و دارای خطا استفاده شده است. با توجه به اینکه تشخیص وقوع این نوع خطا (به‌ویژه خطاهای با درجه کم) با سیگنال جریان انجام‌شده نیست، روش سیم‌پیچ جستجو به کار گرفته شده است که دو سیم‌پیچ حلقه‌باز به صورت متقارن در اطراف فاصله هوایی نصب می‌شوند. به علت حلقه‌باز بودن سیم‌پیچ‌ها، بر رفتار موتور تأثیری ندارند. تحلیل ولتاژ سیم‌پیچ‌های جستجو با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی (PCA) الگوی هوشمندی را به وجود می‌آورد که نخست، به وقوع خطا حتی با درجه کم حساس است و دوم، قابلیت تمییز نوع خطا (استاتیک و یا دینامیک) را دارد.

واژه‌های کلیدی: تشخیص خطا، خطای ناهم‌راستایی استاتیک، خطای ناهم‌راستایی دینامیک، روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی، موتور القایی.

هنگفت جلوگیری می‌کند [۱، ۲]. در میان ماشین‌های الکتریکی، موتورهای القایی، یکی از ابزارهای مهم در صنعت‌اند که به دلیل ساختار ساده و کارایی بالا به چرخ محرک بسیاری از صنایع تبدیل شده‌اند. در مقابل موتورهای جریان مستقیم به دلیل دارا بودن جاروبک و کموتاتور، در مقایسه با موتورهای القایی نیازمند هزینه‌های نگهداری و پشتیبانی بیشتری‌اند [۳، ۴].

خطاهای داخلی موتورهای القایی به دو گروه اصلی الکتریکی و مکانیکی دسته‌بندی می‌شوند [۵، ۶] که خطاهای مکانیکی (شامل خطای بیرینگ^۱، ناهم‌راستایی^۲، خطای بار و ناهم‌محوری شفت) در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کل خطاهای موتورهای القایی را به خود اختصاص می‌دهند. در این میان، خطای بیرینگ (۵۰٪-۴۰٪) و ناهم‌راستایی (۶۰٪) مهم‌ترین خطای مکانیکی محسوب می‌شوند [۷]. همچنین تقریباً ۸۰ درصد خطاهای مکانیکی به تولید خطای ناهم‌راستایی منجر

۱- مقدمه^۱

ماشین‌های دوار مانند موتورهای الکتریکی و ژنراتورها نقش مهمی در صنایع مختلف تجاری و نظامی دارند و در نتیجه، رخداد خطا و خرابی آنها موجب خسارت‌های سنگین به دلیل کاهش تولید محصول، کاهش کیفیت، افزایش هزینه‌های نگهداری و حتی احتمالاً به تلفات انسانی منجر می‌شود. به کارگیری یک سیستم پیش‌بینی‌کننده مطمئن رخداد خطا در ماشین‌های حساس از وقوع این هزینه‌های

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵

نام نویسنده مسئول: مهدی احمدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خراسان شمالی - مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین - دانشکده مهندسی برق

جریان برای تشخیص خطای ناهم‌راستایی استاتیک استفاده شده است. در این روش با مقایسه الگوی دو بعدی بردار جریان در دو حالت سالم و خطا، وقوع خطا را تشخیص می‌دهند؛ با این حال برای تشخیص خطاهای استاتیک با درصد وقوع پایین و رخداد خطای دینامیک روشی ارائه نشده است. تحلیل مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال جریان، یکی دیگر از روش‌های تشخیص رخداد خطای ناهم‌راستایی است. تأثیر خطای استاتیک و دینامیک در [۲۲] بررسی شده است. همچنین مطالعه تئوری و آزمایش عملی برای تأثیر خطای ناهم‌راستایی روی سیگنال جریان و ارتعاشات در بارهای مختلف در [۲۳] انجام شده است. نتیجه این آزمایشات نشان می‌دهد خطای ناهم‌راستایی استاتیک و دینامیک موجب به وجود آمدن مؤلفه‌های کناری در اطراف هارمونیک اصلی شیار (PSH^1) می‌شوند که به پارامترهای ساختمانی موتور وابسته است [۱۷، ۱۸، ۲۴-۲۶]. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها این است که مؤلفه‌های فرکانسی یادشده به نوسانات گشتاور بار وابسته نیستند و بنابراین، تغییرات بار بر آنها تأثیری نمی‌گذارد [۲۷]. با وجود این، دلایل دیگر از جمله نویز و کلیدزنی نیز بر مؤلفه‌های فرکانسی تأثیر می‌گذارند و بنابراین، تفکیک‌پذیری خطا از سایر عوامل، نیازمند تجهیزات پیچیده پردازش سیگنال است که بسیار گران‌اند [۲۸]. همچنین دسترسی به پارامترهای ساختاری موتور القایی گاهی می‌تواند امکان‌پذیر نباشد و بنابراین، نمی‌توان به صورت تئوری به فرکانس مرتبط با وقوع خطا دست یافت. با در نظر گرفتن ایرادهای ذکرشده، تحلیل مؤلفه‌های کناری در اطراف فرکانس اصلی گزینه بهتری است؛ اما با این حال، تنها در حالت رخداد خطای ناهم‌راستایی ترکیبی (استاتیک به همراه دینامیک) می‌توان از این مؤلفه‌ها بهره جست [۲۳].

روش سیم‌پیچ جستجو نیز از دیگر روش‌های موجود در حوزه مبتنی بر سیگنال است که در آن پژوهشگران از سیم‌پیچ‌های جستجو برای اندازه‌گیری پارامتری کمک می‌گیرند که کاملاً از وقوع خطا متأثرند [۱۵، ۲۹، ۳۰]. در [۱۵]، برای مواجهه با ایرادات ذکرشده برای تحلیل سیگنال جریان، روش سیم‌پیچ جستجو برای تشخیص خطای استاتیک پیشنهاد شده است که در این روش دو سیم‌پیچ

می‌شوند [۸]. خطای ناهم‌راستایی موجب از بین رفتن تقارن فاصله هوایی موجود میان روتور و استاتور می‌شود؛ بنابراین، فاصله هوایی از نقطه نظر زاویه محیطی استاتور یا از نظر زمان ثابت نخواهد بود.

برای مدل‌سازی موتورهای القایی در حالت خطا از چهار روش مدار الکتریکی معادل (EEC^3) [۹]، مدار مغناطیسی معادل (EMC^4) [۱۰-۱۲]، تابع سیم‌پیچ اصلاح یافته ($MWFA^5$) [۱۳] و المان محدود [۱۴-۱۶] در مراجع استفاده شده است. روش FEM بر تحلیل میدان مغناطیسی استوار است و هندسه مدار مغناطیسی، توزیع فضایی سیم‌پیچ‌های استاتور و میله‌های روتور، وجود شیار در اطراف فاصله هوایی و رفتار غیرخطی مواد فرامغناطیس را در نظر می‌گیرد؛ بنابراین، روشی دقیق برای مدل‌سازی و تحلیل وقوع خطا در میان پژوهشگران است.

برای تشخیص این خطا، روش‌های ارائه‌شده در دو دسته مبتنی بر تحلیل سیگنال [۷، ۱۷، ۱۸]، شناسایی و تخمین [۸، ۱۹] دسته‌بندی می‌شوند. در حوزه روش‌های مبتنی بر شناسایی و تخمین، در [۸] با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم، مدلی را برای حالت سالم و دارای خطا به دست آورده و با مقایسه ضرایب در دو حالت مذکور به تشخیص خطا مبادرت ورزیده است؛ با این حال، تغییر ضرایب مدل روش چندان مناسبی برای تشخیص خطا نیست و با استناد به تغییر چند ضریب از مدل، وجود خطا، نوع و میزان آن را نمی‌توان تعیین کرد. در [۱۹]، محقق از مدل MWFA برای مدل‌سازی موتور در حالت‌های مختلف خطای ناهم‌راستایی و با درجات متفاوت استفاده کرده است. با مقایسه سیگنال‌های خروجی اندازه‌گیری‌شده و برآمده از مدل، نوع خطای ناهم‌راستایی و درجه آن تخمین زده می‌شود؛ اما مدل به‌کاررفته دارای فرضیات زیادی است که موجب می‌شود تخمین درجه خطا دقیق نباشد.

تحلیل شار مغناطیسی [۲۰] یکی از روش‌های تشخیص خطای ناهم‌راستایی است که با مشکلاتی از قبیل دشواری و گرانی نصب حسگرهای مربوطه روبه‌رو است. تحلیل سیگنال جریان به دلیل در دسترس بودن و نیازنداشتن به حسگر اضافی برای اندازه‌گیری، یکی از روش‌های محبوب در میان پژوهشگران است. در [۱۱، ۲۱] از ایده بردار پارک

نوع خطای ناهم‌راستایی استفاده شده است. در روش PCA در مقایسه با تبدیل فوریه سریع، تعداد پایه‌های متعامد به میزان زیادی کاهش می‌یابد که تأثیر بسزایی در کاهش حجم محاسبات و زمان شبیه‌سازی به‌ویژه در حالت بر-خط^۱ می‌گذارد.

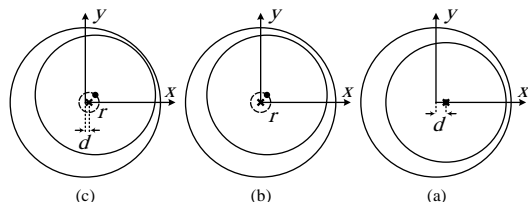
• در مقایسه با [۱۴] که از تبدیل موجک و شعاع چرخش سیگنال جریان استاتور برای تشخیص خطای استاتیک استفاده شده، روش ارائه‌شده در این مقاله به تشخیص و تمیز نوع خطای استاتیک و دینامیک (در تقابل با روش شعاع چرخشی که تنها میزان توزیع داده‌ها را می‌سنجد) قادر است. همچنین روش ارائه‌شده در این مقاله به تشخیص خطای استاتیک با درصد ناچیز (در تقابل با روش تبدیل موجک [۱۴]) نیز قادر است.

در ادامه، ابتدا پیش‌زمینه‌ای از خطای ناهم‌راستایی و انواع آن، روش PCA و روش سیم‌پیچ جستجو در بخش ۲ ارائه می‌شود، سپس در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی خطا برای دو حالت استاتیک و دینامیک بررسی می‌شوند. بخش ۴ الگوی هوشمند تشخیص خطا را بیان می‌کند. در پایان، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه می‌شود.

۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- خطای ناهم‌راستایی

ناهم‌راستایی روتور و استاتور موجب می‌شود فاصله هوایی از نقطه‌نظر زاویه محیطی استاتور یا از نظر زمان، ثابت نباشد. در حالت کلی، سه نوع ناهم‌راستایی تشخیص‌پذیر وجود دارد که در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱): (a) خطای ناهم‌راستایی استاتیک؛ (b) دینامیک و (c)

آمیخته. • مرکز هندسی و × مرکز چرخشی روتور.

◀ استاتیک: مراکز چرخشی و هندسی روتور

حلقه‌باز در اطراف فاصله هوایی نصب می‌شوند. با توجه به اینکه دو سیم‌پیچ حلقه‌بازند، بر رفتار موتور تأثیری ندارند. در [۲۸] نشان داده شده است خطای ناهم‌راستایی استاتیک موجب تغییر درخور توجه مؤلفه‌های فرکانسی در هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم می‌شود و بنابراین، تشخیص خطا را ساده می‌کند.

در این مقاله برای مواجهه با ایرادات ذکرشده، روشی مبتنی بر تحلیل سیگنال (داده) ارائه می‌شود. برای این منظور، یک موتور القایی قفس سنجابی ۷/۵ کیلوواتی با استفاده از روش FEM مدل‌سازی شده است. همچنین از روش سیم‌پیچ جستجو برای بررسی و تشخیص وقوع خطای استاتیک و دینامیک استفاده شده است. برای تحلیل وقوع خطا، روش PCA به کار گرفته شده که یکی از رایج‌ترین روش‌های تحلیل آماری برای داده‌های جمع‌آوری شده از یک آزمایش است [۳۱]. روش PCA با تحلیل بردارهای ویژه و مقادیر ویژه یک دسته از داده‌ها به بررسی جهت و نحوه توزیع آنها می‌پردازد و تأثیر وقوع خطا را بر جهت و نحوه توزیع داده‌ها تعیین می‌کند [۳۲]. بر اساس این، داده‌های ولتاژ سیم‌پیچ جستجو استفاده می‌شوند و نشان داده می‌شود الگوی دقیقی برای تشخیص رخداد خطا و نوع آن و درجه آن وجود دارد و بنابراین، روش ارائه‌شده عملکرد مناسبی در این زمینه دارد. به صورت خلاصه، روش ارائه‌شده در این مقاله با دیگر مراجع ذکرشده به صورت زیر مقایسه می‌شود:

• در مقایسه با [۱۱، ۲۱] که در آنها تنها به تشخیص خطای استاتیک با استفاده از بردار پارک جریان پرداخته شده است، در این مقاله هر دو خطای ناهم‌راستایی استاتیک و دینامیک مطالعه می‌شوند. همچنین تأثیر خطاهای مذکور علاوه بر نمایش گرافیکی به صورت تحلیلی بر مقادیر و بردارهای ویژه بررسی می‌شود و الگوی هوشمندی نه تنها برای تشخیص، بلکه برای تمیز این خطاها از یکدیگر ارائه می‌شود. همچنین روش پیشنهادی در این مقاله به شناسایی خطاهای با درصد پایین نیز قادر است.

• در مقایسه با [۱۵، ۱۶] که از تبدیل فوریه سریع (FFT) برای تشخیص خطای استاتیک بهره‌جسته‌اند، در این مقاله روش PCA، یک روش آماری، برای تحلیل دو

$$X \in R^{m \times n}$$

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] \quad (۳)$$

که در آن $x_i \in R^m$ متغیر i ام نمونه برداری شده است.

گام دوم: یافتن ماتریس همبستگی S :

$$S = \frac{1}{m-1} X^T X \quad (۴)$$

گام سوم: تجزیه ماتریس همبستگی S به ماتریس

بردارها و مقادیر ویژه:

$$S = U \Lambda U^T \quad (۵)$$

که در آن، Λ ماتریس قطری متشکل از مقادیر ویژه حقیقی غیرمنفی است ($\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$) و به صورت کاهشی ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$) چیده شده‌اند. همچنین $U \in R^{m \times n}$ و $U U^T = I$ یک ماتریس متعامد است که ستون‌های آن بردارهای ویژه ماتریس S هستند.

روش PCA در واقع، توزیع داده‌های نمونه برداری شده در دستگاه مختصات دکارتی را به دستگاه جدیدی انتقال می‌دهد که متشکل از بردارهای ویژه است. از روش PCA برای کاهش بعد فضای داده‌های نمونه برداری شده استفاده می‌شود؛ به صورتی که a بردار ویژه متناظر با a مقدار ویژه اول به عنوان مؤلفه اساسی انتخاب شده و بیان‌کننده راستای بیشترین توزیع داده‌ها است. در این مقاله داده‌ها دو بعدی هستند و بنابراین، مقوله کاهش بعد داده‌ها مطرح نخواهد بود.

۲-۳- سیم پیچ جستجو

اگرچه تحلیل سیگنال جریان استاتور برای تشخیص خطا، به روشی عمومی در میان محققان تبدیل شده، تشخیص خطای استاتیک و دینامیک با آن مستلزم تحلیل مؤلفه‌های فرکانسی بالا است که این امر ایراداتی به شرح ذیل دارد:

- نمونه برداری با ثابت زمانی کوچک باید انجام شود که موجب حجم بالای داده می‌شود.

- هارمونیک‌های مرتبه بالا دامنه کوچکی دارند و آغشته به نویز هستند و بنابراین، مقایسه میان حالت سالم و دارای

یکسان‌اند؛ اما با مرکز استاتور متفاوت‌اند. محل کوتاه‌ترین فاصله هوایی از نقطه نظر استاتور ثابت است. میزان خطا با SEF به صورت (۱) بیان می‌شود.

$$SEF = \frac{d}{g_0} \times 100 \quad (۱)$$

که در آن d میزان انحراف روتور و g_0 فاصله هوایی در حالت سالم است.

◀ دینامیک: مراکز هندسی و چرخشی روتور از یکدیگر متفاوت‌اند و مرکز چرخشی روتور با مرکز هندسی استاتور یکسان است؛ بنابراین، محل کوتاه‌ترین فاصله هوایی از نقطه نظر استاتور تغییر می‌کند. شدت خطا با DEF به صورت (۲) بیان می‌شود.

$$DEF = \frac{r}{g_0} \times 100 \quad (۲)$$

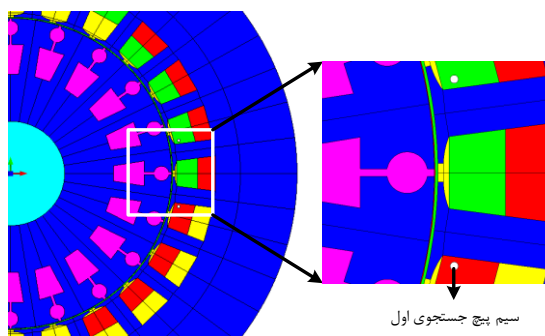
که در آن r میزان انحراف روتور و شعاع دایره‌ای است که روتور روی محیط آن می‌چرخد.

◀ آمیخته: این نوع از ناهم‌راستایی ترکیبی از هر دو نوع ناهم‌راستایی استاتیک و دینامیک است که در آن مراکز چرخشی و هندسی روتور و نیز مرکز هندسی استاتور از یکدیگر متفاوت‌اند. همچنین میزان خطا به صورت ترکیب SEF و DEF بیان می‌شود.

۲-۲- روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی

تحلیل مؤلفه‌های اساسی، یکی از رایج‌ترین روش‌های تحلیل آماری برای داده‌های جمع‌آوری شده از یک آزمایش است که آقای پیرسن^۹ این روش را در سال ۱۹۷۱ بنیان نهاد و امروزه این روش بسیار شایان توجه قرار دارد؛ تاجایی که استفاده از آن در حوزه‌های مهندسی و اقتصاد نمایان‌تر است [۳۱]. با استفاده از تعریف بردار ویژه، این روش به یافتن جهت‌های اساسی داده‌های نمونه برداری شده در فضای برداری قادر است. همچنین تعریف مقادیر ویژه، امکان بررسی نحوه توزیع داده‌ها را در جهت این بردارها فراهم می‌سازد. برای استفاده از این روش باید مراحل زیر طی شود.

گام اول: یافتن ماتریس داده‌های نمونه برداری شده



شکل (۲): موقعیت سیم پیچ جستجوی اول.

۳- نتایج شبیه سازی خطا

۳-۱- شبیه سازی موتور القایی

در این مقاله، یک موتور القایی قفس سنجابی سه فاز، ۷/۵ کیلو وات، ۳۸۰ ولت با اتصال ستاره مدل سازی شده است. این موتور دارای ۲۰ شیار روتور و ۲۴ شیار استاتور است. مشخصات موتور القایی قفس سنجابی شبیه سازی شده با نرم افزار FLUX 2D در جدول (۱) گردآوری شده است. شبیه سازی کامل موتور القایی با استفاده از روش المان محدود شامل مراحل شبیه سازی هندسی، مدل سازی الکتریکی، تعیین خواص فیزیکی و تعیین رفتار مکانیکی اجزا است که جزئیات این مراحل در [۳۳] آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات هندسی و الکتریکی موتور القایی

شبیه سازی شده.

مشخصه	مقدار	مشخصه	مقدار (mm)
توان نامی	7.5 kw	قطر خارجی هسته استاتور	212
ولتاژ	380 V	قطر داخلی استاتور	120
فرکانس کاری	50 Hz	قطر خارجی روتور	119
تعداد شیارهای استاتور	24	قطر داخلی هسته روتور	40
تعداد شیارهای روتور	20	ضخامت فاصله هوایی	0.5
		طول هسته روتور و استاتور	125

خطا مشکل است.

▪ روش های تحلیل فرکانسی مبتنی بر سیگنال جریان، مستلزم دانش درباره پارامترهایی از قبیل تعداد شیارهای روتور و استاتور، لغزش و ... است که در برخی موارد ممکن نیست.

▪ با توجه به وقوع یک حلقه افزایشی میان دامنه UMP^۱ و درصد ناهم راستایی، تشخیص خطاهای با درصد پایین نیز دارای اهمیت است؛ درحالی که نتایج حاصل از تحلیل سیگنال جریان عدم توانایی آن را نشان می دهند [۱۵].

اگرچه تحلیل شار مغناطیسی که مستقیماً از تغییرات فاصله هوایی تأثیر می پذیرد، بهترین روش تشخیص خطای ناهم راستایی است، قابل اندازه گیری نیست و تنها می توان آن را تخمین زد. در [۱۵] و [۲۹، ۳۰] روش سیم پیچ جستجو برای تشخیص خطای ناهم راستایی به ترتیب در موتورهای القایی و شار محوری معرفی شده اند. در این روش از دو سیم پیچ هفت حلقه ای با مقاومت بسیار ناچیز به صورت مدار باز استفاده می شود که در دو طرف فاصله هوایی و در نزدیک ترین محل ممکن نصب می شوند تا تأثیرات شار مغناطیسی فاصله هوایی کاملاً به آنها انتقال یابد؛ البته به سبب اینکه در این روش از ولتاژ سیم پیچ ها برای تشخیص خطا استفاده می شود، اندازه گیری آنها در عمل امکان پذیر خواهد بود. شکل (۲) موقعیت سیم پیچ اول را نمایش می دهد و سیم پیچ دوم به صورت کاملاً متقارن در سمت چپ روتور قرار گرفته است. به سبب اینکه دو سیم پیچ جستجو به صورت کاملاً متقارن در دو طرف روتور قرار گرفته اند، ولتاژ القاشده در آنها در حالت سالم با یکدیگر یکسان بوده اند و اختلافی میان آنها وجود ندارد. با وقوع خطای ناهم راستایی، بسته به نوع و درجه خطا فاصله هوایی تغییر می کند و ولتاژ القاشده در دو سیم پیچ جستجو متفاوت خواهد شد. یافتن الگوی هوشمند با استفاده از ولتاژ القاشده در سیم پیچ های جستجو که حساس به نوع و درجه رخداد خطا باشد، هدف غایی این مقاله است.

۳-۲- خطای ناهم‌راستایی استاتیک

با توجه به شکل (۱)، برای مدل‌سازی خطای ناهم‌راستایی استاتیک فرض می‌شود مراکز چرخشی و هندسی روتور به اندازه SEF در راستای محور افقی تغییر مکان داده‌اند. شکل (۳) نمایش دو بعدی بردار پارک جریان را در دو حالت سالم و $SEF = 50\%$ نشان می‌دهد. در نمایش دو بعدی بردار پارک جریان، جریان‌های سه فاز (i_u, i_v, i_w) با رابطه (۶) به حالت دو بعدی (i_d, i_q) تبدیل می‌شوند.

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_u - \sqrt{\frac{1}{6}}i_v - \sqrt{\frac{1}{6}}i_w \\ i_q = \sqrt{\frac{1}{2}}i_v - \sqrt{\frac{1}{2}}i_w \end{cases} \quad (6)$$

نمایش بردار پارک جریان با فراهم کردن یک نمایش دو بعدی از روی یک فضای سه بعدی، تحلیل ساده‌تری را مهیا می‌کند. در [۳۲] از این روش برای تشخیص خطای استاتور استفاده شده است. نمایش دو بعدی $i_d - i_q$ برای دو حالت سالم و دارای خطای استاتیک با $SEF = 50\%$ در شکل (۳) نشان داده شده است. با دقت در شکل (۳)، مشاهده می‌شود با رخداد خطای ناهم‌راستایی استاتیک، بردار جریان دچار تغییر جزئی می‌شود که به صورت بصری تمییزشدنی نیست.

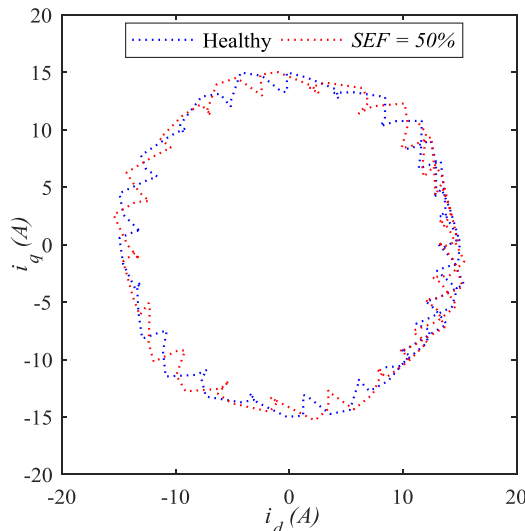
در [۱۵] نشان داده شده است تحلیل فوریه سیگنال جریان قابلیت تمییز حالت سالم و خطای ناهم‌راستایی استاتیک حتی برای خطاهای با درصد بالا را ندارد؛ بنابراین، روش نصب سیم‌پیچ جستجو ارائه شده است. در این مقاله نیز شکل (۳) صحت این موضوع را تأیید می‌کند. شکل (۴) نمایش دو بعدی ولتاژ دو سیم‌پیچ نصب‌شده را به‌ازای دو حالت سالم و خطا با SEF ‌های مختلف نمایش می‌دهد. با دقت در این شکل نتایج زیر حاصل می‌شوند:

◀ در حالت سالم، به دلیل برابری ولتاژهای القاشده در دو سیم‌پیچ نصب‌شده در اطراف فاصله هوایی، نمایش دو بعدی به صورت یک خط با شیب واحد است.

◀ چون دو سیم‌پیچ جستجو در مکان‌های متناظر با کمترین و بیشترین فاصله هوایی در حالت رخداد خطای ناهم‌راستایی استاتیک نصب شده‌اند، با وقوع خطا، ولتاژ

القاشده در آنها به ترتیب افزایش و کاهش خواهد یافت و بنابراین، نمایش دو بعدی آن در حالت خطا دیگر دارای شیب واحد نخواهد بود.

رخداد خطای ناهم‌راستایی استاتیک حتی با درجات کم ($SEF = 10\%$) نیز به تغییر نمایش دو بعدی ولتاژ القاشده در سیم‌پیچ‌های جستجو منجر شده است.



شکل (۳): نمایش دو بعدی جریان $i_d - i_q$ در دو حالت سالم و دارای خطای استاتیک با $SEF = 50\%$.

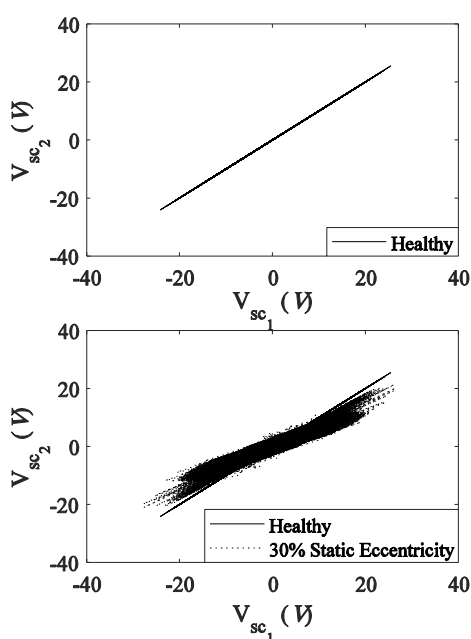
۳-۳- خطای ناهم‌راستایی دینامیک

در این حالت مرکز چرخشی روتور و مرکز هندسی استاتور بر هم منطبق بوده و مرکز هندسی روتور با آنها متفاوت است. برای مدل‌سازی این حالت، مرکز هندسی روتور به اندازه r منحرف می‌شود که در این صورت روتور روی یک مسیر دایره‌ای به شعاع r خواهد چرخید (شکل (۱)). شکل (۵) نمایش دو بعدی $i_d - i_q$ را برای دو حالت سالم و دارای خطا با $DEF = 50\%$ نشان می‌دهد.

مشابه با حالت خطای ناهم‌راستایی استاتیک، در این حالت نیز، وقوع خطا حتی با درجه بالا ($DEF = 50\%$) موجب تغییر نمایش دو بعدی سیگنال جریان نشده است؛ به‌گونه‌ای که حتی به صورت بصری نیز تشخیص‌پذیر نیست. با وقوع خطای ناهم‌راستایی دینامیک مکان کمترین فاصله هوایی از دیدگاه استاتور تغییر می‌کند. چون دو سیم‌پیچ جستجو در دو مکان ثابت و در راستای افقی نصب شده‌اند، فرکانس چرخش روتور بر ولتاژ القاشده در دو سیم‌پیچ

است.

تأثیر فرکانس چرخش روتور در این حالت موجب پراکندگی ولتاژهای القاشده در اطراف یک خط با شیب واحد (حالت سالم) شده که میزان پراکندگی به میزان انحراف مرکز هندسی روتور از حالت سالم است. با افزایش انحراف روتور، میزان پراکندگی نیز افزایش یافته است. رخدادهای ناهم‌راستایی دینامیک حتی با درجات کم ($DEF = 10\%$) نیز به تغییر نمایش دو بعدی ولتاژ القاشده در دو سیم‌پیچ جستجو منجر شده است.



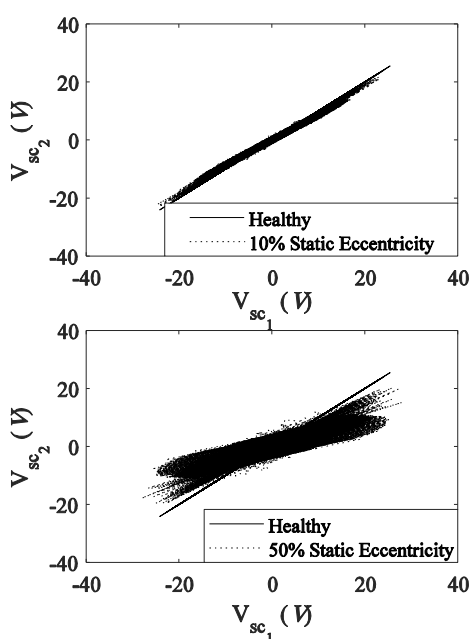
شکل (۴): نمایش دو بعدی $V_{sc1} - V_{sc2}$ برای حالت سالم و دارای خطای ناهم‌راستایی استاتیک با SEF های مختلف

۴- الگوی هوشمند تشخیص خطا

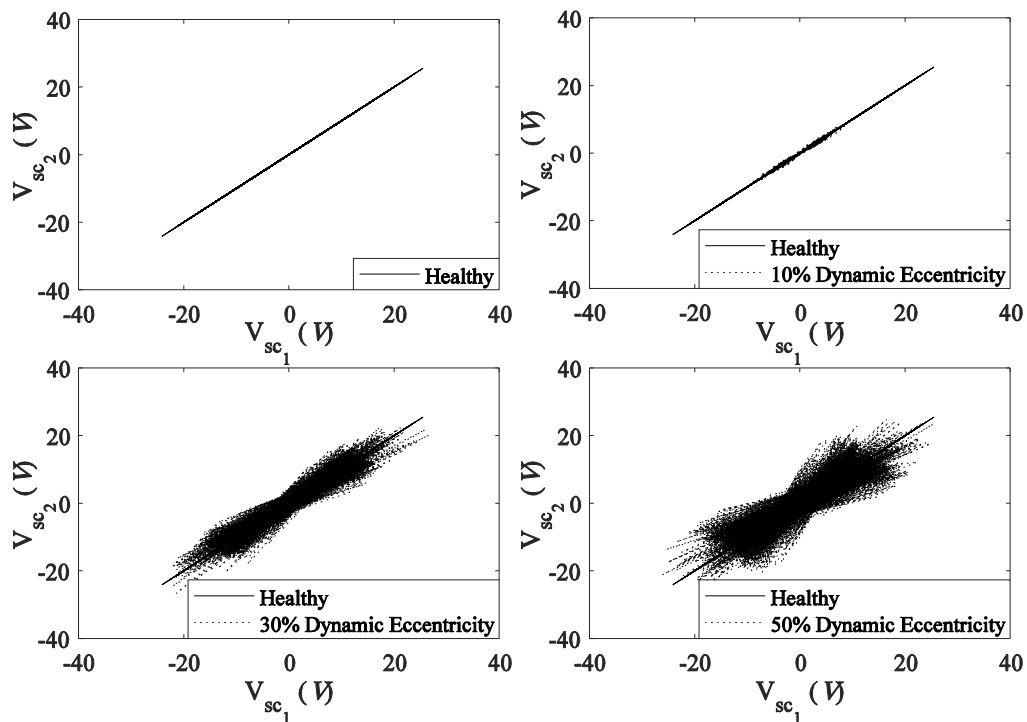
شکل‌های (۴) و (۶) تغییر نمایش دو بعدی ولتاژ دو سیم‌پیچ جستجو را در اثر رخداد خطای ناهم‌راستایی استاتیک و دینامیک نمایش می‌دهند. برای بررسی دقیق‌تر موضوع، روش PCA برای هر دو حالت خطا استفاده می‌شود تا الگوی مبتنی بر تحلیل مقادیر و بردارهای ویژه استخراج شود. ویژگی متناظر با رخداد خطا مشخصه^{۱۱} نامیده خواهد شد. برای به‌کارگیری روش PCA، ولتاژ دو سیم‌پیچ جستجو به‌عنوان متغیرهای نمونه‌برداری شده در روش PCA انتخاب می‌شوند؛ بنابراین، ماتریس داده‌های نمونه‌برداری شده به‌صورت (V) خواهد بود.

جستجو نیز تأثیر خواهد داشت. نمایش دو بعدی ولتاژ دو سیم‌پیچ جستجو برای حالت سالم و خطا با DEF های مختلف در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. با دقت در شکل (۶) نتایج زیر حاصل می‌شوند:

برخلاف حالت خطای استاتیک، نمایش دو بعدی در حالت سالم و رخداد خطای دینامیک با DEF های مختلف دارای شیب واحد است که این موضوع به دلیل ثابت بودن مکان دو سیم‌پیچ جستجو و تغییر مکان کمترین و بیشترین فاصله هوایی متناسب با فرکانس چرخش روتور



شکل (۵): نمایش دو بعدی جریان $i_d - i_q$ در دو حالت سالم و دارای خطای دینامیک با $DEF = 50\%$.



شکل (۶): نمایش دو بعدی $V_{sc_1} - V_{sc_2}$ برای حالت سالم و دارای خطای ناهم‌راستایی دینامیک با DEF های مختلف.

۴-۱- مشخصه خطای ناهم‌راستایی استاتیک

برای استخراج مشخصه‌های متناظر با خطای ناهم‌راستایی استاتیک، ماتریس نمونه‌برداری شده مطابق رابطه (۷)، ماتریس همبستگی مطابق با رابطه (۴) برای تمامی حالت‌های سالم و دارای خطا با SEF های متفاوت تشکیل می‌شوند. مقادیر و بردارهای ویژه، مطابق رابطه (۸) و (۹) محاسبه و در جدول (۲) گردآوری شده‌اند. با توجه به اینکه بردارهای ویژه متعامند، تنها بردار ویژه اول گزارش شده است.

با دقت در جدول (۲) مشاهده می‌شود با وقوع خطای ناهم‌راستایی استاتیک، بردارهای ویژه و مقادیر ویژه اول و دوم تغییر می‌کنند؛ به طوری که مقادیر ویژه اول و دوم زاویه بردار ویژه اول به صورت منظم با افزایش درجه خطا افزایش می‌یابند. این موضوع در شکل (۴) نیز مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که با افزایش درجه خطا، پراکندگی داده‌ها نسبت به حالت سالم بیشتر (افزایش مقدار ویژه اول و دوم) و دارای انحراف (تغییر زاویه بردار ویژه اول) می‌شود.

$$X = \begin{bmatrix} V_{sc_1}(t_0) & V_{sc_2}(t_0) \\ V_{sc_1}(t_0 + \Delta T) & V_{sc_2}(t_0 + \Delta T) \\ \vdots & \vdots \\ V_{sc_1}(t_0 + (m-1)\Delta T) & V_{sc_2}(t_0 + (m-1)\Delta T) \end{bmatrix} \quad (V)$$

که در آن $V_{sc_1} = X_1 \in R^m$ و $V_{sc_2} = X_2 \in R^m$ به ترتیب ولتاژ سیم پیچ جستجوی اول و دوم بوده و متغیرهای نمونه‌برداری شده‌اند. همچنین $X \in R^{m \times 2}$ زمان نمونه‌برداری $\Delta T = 2.5 \times 10^{-4}$ ثانیه و $m = 400$ است. بدین ترتیب ماتریس همبستگی $S \in R^{2 \times 2}$ دارای دو مقدار ویژه و متناظر دو بردار ویژه خواهد بود. همچنین برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر، ماتریس X به‌ازای t_0 های مختلف $t_0 = \{1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4\}$ محاسبه می‌شود و مقادیر و بردارهای ویژه نهایی از طریق رابطه‌های (۸) و (۹) به دست می‌آیند.

$$\Lambda = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \Lambda_k \quad (۸)$$

$$U = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 U_k \quad (۹)$$

جدول (۲): ماتریس مقادیر و بردار ویژه متناظر با حالت سالم و دارای خطای ناهمراستایی استاتیکی.

زاویه بردار ویژه	مقادیر ویژه	بردارهای ویژه	درصد خطا
45	$\begin{cases} \lambda_1 = 0 \\ \lambda_2 = 125.3 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.71 \\ -0.71 \end{bmatrix}$	0
48.7	$\begin{cases} \lambda_1 = 0.23 \\ \lambda_2 = 127.2 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.66 \\ -0.75 \end{bmatrix}$	10
56.5	$\begin{cases} \lambda_1 = 2 \\ \lambda_2 = 140.6 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.55 \\ -0.83 \end{bmatrix}$	30
64.5	$\begin{cases} \lambda_1 = 5.2 \\ \lambda_2 = 173.4 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.43 \\ -0.90 \end{bmatrix}$	50

بردار ویژه اول) از جدول (۳) و شکل (۶) برداشت می‌شود که مشخصه رخداد خطای دینامیک است. همچنین یکی دیگر از مشخصه‌های خطای دینامیک نسبت به استاتیک، تغییرات نامنظم مقدار ویژه دوم (پراکندگی در راستای بردار ویژه اول) است.

۴-۳- الگوریتم تشخیص خطای ناهمراستایی

با توجه به بخش‌های ۴-۱ و ۴-۲، خطای ناهمراستایی استاتیک بر دو مشخصه مقادیر و بردارهای ویژه تأثیر می‌گذارد و خطای ناهمراستایی دینامیک بر زاویه بردارهای ویژه تأثیری ندارد و تنها بر پراکندگی داده‌ها در راستای بردار ویژه اول تأثیر منظم دارد؛ بنابراین، می‌توان با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم تشخیص و تمییز خطای ناهمراستایی را استخراج کرد. شکل (۷) بیان‌کننده الگوریتم تشخیص خطای ناهمراستایی و تمییز میان دو حالت استاتیک و دینامیک است. با دقت در شکل (۷)، تغییر زاویه بردارهای ویژه، تمییزدهنده دو حالت استاتیک و دینامیک است؛ به طوری که با انحراف زاویه بردارهای ویژه از حالت سالم، می‌توان رخداد خطای استاتیک را نتیجه گرفت. همچنین با محاسبه میزان افزایش زاویه، درصد خطا حدس زده می‌شود.

همچنین در صورتی که زاویه بردارهای ویژه دچار تغییر نشده باشند، برای تمییز میان دو حالت سالم و خطای دینامیک، لازم است مقادیر ویژه اول و دوم بررسی شوند. در حالت سالم داده‌ها تنها در راستای بردار ویژه دوم پراکنده شده‌اند؛ بنابراین، در صورتی که هر دو مقدار ویژه غیرصفر باشند که به معنای پراکندگی در راستای هر دو بردار ویژه است، وقوع خطای دینامیک برداشت می‌شود. برای تشخیص میزان درجه خطای دینامیک از مقدار ویژه اول کمک گرفته می‌شود که دارای تغییرات منظم نسبت به درصد وقوع خطا است.

در صورت وقوع خطای ناهمراستایی آمیخته، پیش‌بینی می‌شود الگوی توزیع داده‌ها ترکیبی از هر دو نوع خطای استاتیک و دینامیک باشد. وجود تغییر زاویه در توزیع داده‌ها وجود خطای استاتیک و نامنظم بودن تغییرات مقدار ویژه دوم وجود خطای دینامیک را تأیید می‌کنند؛ بنابراین، در

۴-۲- مشخصه خطای ناهمراستایی دینامیک

در این حالت نیز ماتریس نمونه برداری شده مطابق رابطه (۷)، ماتریس همبستگی مطابق با رابطه (۴) برای تمامی حالت‌های سالم و دارای خطا با DEF های متفاوت تشکیل می‌شوند. مقادیر و بردارهای ویژه، مطابق رابطه (۸) و (۹)، محاسبه و در جدول (۳) جمع‌آوری شده‌اند.

جدول (۳): ماتریس مقادیر و بردارهای ویژه متناظر با حالت سالم و دارای خطای ناهمراستایی دینامیک.

مقادیر ویژه	بردارهای ویژه	درصد خطا
$\begin{cases} \lambda_1 = 0 \\ \lambda_2 = 125.3 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.71 \\ -0.71 \end{bmatrix}$	0
$\begin{cases} \lambda_1 = 0.5 \\ \lambda_2 = 121.2 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.71 \\ -0.71 \end{bmatrix}$	10
$\begin{cases} \lambda_1 = 3.1 \\ \lambda_2 = 117.5 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.71 \\ -0.71 \end{bmatrix}$	30
$\begin{cases} \lambda_1 = 8.9 \\ \lambda_2 = 124.3 \end{cases}$	$U_1 = \begin{bmatrix} 0.71 \\ -0.71 \end{bmatrix}$	50

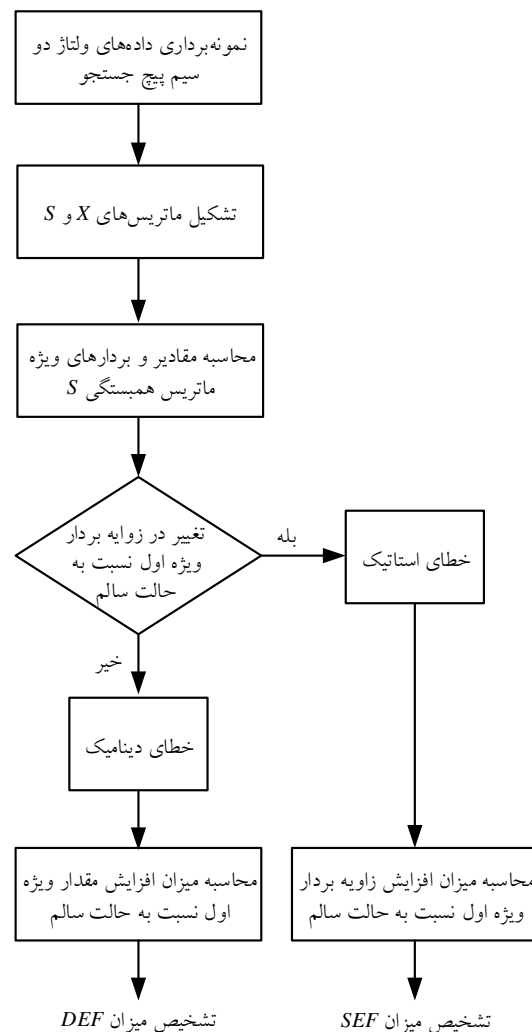
با دقت در جدول (۳) مشاهده می‌شود با وقوع خطای ناهمراستایی دینامیک بردارهای ویژه تغییری نمی‌کنند که در شکل (۶) به خوبی مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که پراکندگی داده‌های نمونه برداری شده نسبت به حالت سالم منحرف نشده‌اند و فقط میزان پراکندگی متناسب با درجه خطا افزایش یافته است. همچنین، تغییر منظم مقدار ویژه اول متناسب با درجه خطا (افزایش پراکندگی داده‌ها در راستای

همچنین موضوع تمییز میان دو حالت خطای استاتیک و دینامیک بررسی شد. روش مدل‌سازی FEM با استفاده از نرم‌افزار FLUX 2D به کار گرفته شد تا مدل‌سازی دقیق‌تری از سیستم در اختیار باشد. مراجع موجود بیشتر بر تشخیص رخداد خطای ناهم‌راستایی آمیخته با استفاده از سیگنال جریان متمرکزند؛ به دلیل اینکه این خطا موجب به وجود آمدن دو مؤلفه فرکانسی در اطراف فرکانس اصلی می‌شود و نیازی به تحلیل مؤلفه‌های فرکانس بالا ندارد؛ درحالی‌که برای تشخیص دو حالت استاتیک و دینامیک، تحلیل فرکانس‌های بالا نیاز است که مرتبط به ساختمان موتورند؛ به همین دلیل در این مقاله، روش نصب دو سیم پیچ جستجو در اطراف فاصله هوایی به کار گرفته شد که ولتاژ القاشده در آنها کاملاً وابسته به شکل و تقارن فاصله هوایی است. برای یافتن یک الگوی منظم و وابسته به رخداد نوع خطا، روش PCA به کار گرفته شد که مبتنی بر تحلیل پراکندگی داده‌ها است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد رخداد خطای استاتیک بر مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس همبستگی داده‌ها تأثیر می‌گذارد؛ اما در حالتی که خطای دینامیک رخ داده است، تنها مقدار ویژه اول (نماینده میزان افزایش پراکندگی داده‌ها در راستای بردار ویژه اول) دچار تغییرات منظم می‌شود. بر همین مبنا الگوریتم تشخیص خطا و تمییز انواع آن در پایان پژوهش ارائه شد.

مراجع

- [1] H. A. Toliyat, M. S. Arefeen, and A. G. Parlos, "A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, 1996.
- [2] N. A. Al-Nuaim and H. Toliyat, "A novel method for modeling dynamic air-gap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 2, pp. 156-162, 1998.
- [3] S. Balamurugan, R. Arumugam, S. Paramasivam, and M. Malaiappan, "Transient analysis of induction motor using finite element analysis," 30th Annual Conference of IEEE in Industrial Electronics Society, South Korea, Vol. 2, pp. 1526-1529, 2004.
- [4] N. Mehala, "Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis," Doctor of philosophy, Electrical Engineering, National Institute of

صورت وجود خطای آمیخته، میزان خطای استاتیک به‌راحتی با تعیین تغییر زاویه، اندازه‌گیری می‌شود؛ اما تعیین میزان خطای دینامیک به دلیل تغییر مقادیر ویژه در هر دو حالت استاتیک و دینامیک مشکل خواهد بود. موضوع تمییز خطاهای استاتیک و دینامیک در صورت رخداد خطای آمیخته، شایان توجه پژوهشگر است و در پژوهش‌های آتی به آن پرداخته خواهد شد.



شکل (۷): الگوریتم تشخیص خطای ناهم‌راستایی و تمییز دو حالت استاتیک و دینامیک از یکدیگر.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تشخیص خطای ناهم‌راستایی روتور و استاتور در موتورهای القایی قفس سنجابی پرداخته شد.

- [17] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin, and H. A. Toliyat, "Dynamic analysis of mixed eccentricity signatures at various operating points and scrutiny of related indices for induction motors," *IET Electric Power Applications*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-16, 2010.
- [18] B. M. Ebrahimi, M. Etemadrezaei, and J. Faiz, "Dynamic eccentricity fault diagnosis in round rotor synchronous motors," *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 5, pp. 2092-2097, 2011.
- [19] M. Ojaghi, R. Aghmasheh, and M. Sabouri, "Model-based exact technique to identify type and degree of eccentricity faults in induction motors," *IET Electric Power Applications*, Vol. 10, No. 8, pp. 706-713, 2016.
- [20] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, pp. 2082-2093, 2011.
- [21] A. M. Cardoso and E. S. Saraiva, "Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by Park's vector approach," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 29, No. 5, pp. 897-901, 1993.
- [22] J. Cameron, W. Thomson, and A. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors," *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, Vol. 133, No. 3, pp. 155-163, 1986.
- [23] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, and S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33, No. 1, pp. 24-34, 1997.
- [24] S. Nandi, R. M. Bharadwaj, and H. A. Toliyat, "Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 3, pp. 392-399, 2002.
- [25] W. T. Thomson and A. Barbour, "On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 4, pp. 347-357, 1998.
- [26] D. Hyun, S. Lee, J. Hong, S. B. Lee, and S. Nandi, "Detection of airgap eccentricity for induction motors using the single-phase rotation test," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 3, pp. 689-696, 2012.
- [27] A. Choudhary, D. Goyal, S. L. Shimi, and A. Akula, "Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 1221-1238, 2019.
- [28] J. Faiz and S. Moosavi, "Eccentricity fault detection—From induction machines to DFIG—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 169-179, 2016.
- [29] S. M. Mirimani, A. Vahedi, and F. Marignetti, "Effect of Inclined Static Eccentricity Fault in Technology Kurukshetra, India, 2010.
- [5] M. El Hachemi Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, pp. 984-993, 2000.
- [6] S. Nandi, H. A. Toliyat, and L. Xiaodong, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, pp. 719-729, 2005.
- [7] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin, and H. A. Toliyat, "Finite-Element Transient Analysis of Induction Motors Under Mixed Eccentricity Fault," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 1, pp. 66-74, 2008.
- [8] A. Nasiri, J. Poshtan, M. H. Kahaei, and F. Taringoo, "A new scheme in model-based fault detection in three-phase induction motors," *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Turkey, pp. 19-24, 2004.
- [9] H. Henao, C. Martis, and G. A. Capolino, "An equivalent internal circuit of the induction machine for advanced spectral analysis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, No. 3, pp. 726-734, 2004.
- [10] A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz, J. F. S. Carvalho, and E. S. Saraiva, "Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach," *IAS 95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 642-646, 1995.
- [11] A. J. M. Cardoso and E. S. Saraiva, "Predicting the level of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors, by Park's vector approach," *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Conference Record of the IEEE*, Vol. 1, pp. 132-135, 1992.
- [12] J. Milimonfared, H. Meshgin Kelk, A. Der Minassians, S. Nandi, and H. A. Toliyat, "A novel approach for broken rotor bar detection in cage induction motors," *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Conference Record of the IEEE*, Vol. 1, pp. 286-290, 1998.
- [13] J. Faiz and I. Tabatabaei, "Extension of winding function theory for nonuniform air gap in electric machinery," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, No. 6, pp. 3654-3657, 2002.
- [14] M. Ahmadi, J. Poshtan, and M. Poshtan, "Static eccentricity fault detection in induction motors using wavelet packet decomposition and Gyration radius," *1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, China, pp. 1-5, 2013.
- [15] M. Ahmadi, J. Poshtan, and M. Poshtan, "A Novel Approach for Eccentricity Fault Detection in Squirrel Cage Induction Motors," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 4, No. 13, pp. 53-63, 2013.
- [16] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin, and H. A. Toliyat, "Comprehensive eccentricity fault diagnosis in induction motors using finite element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 3, pp. 1764-1767, 2009.

- [32]V. F. Pires, J. F. Martins, and A. J. Pires, "Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 5, pp. 901-907, 2010.
- [33]M. Ahmadi, J. Poshtan, and M. Poshtan, "Modelling squirrel cage induction motors using finite element method," *IEEE International Conference on Intelligent Control, Automatic Detection and High-End Equipment (ICADE)*, 2012, pp. 186-191, 2012.
- Single Stator-Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 1, pp. 143-149, 2012.
- [30]S. M. Mirimani, A. Vahedi, F. Marignetti, and E. De Santis, "Static Eccentricity Fault Detection in Single Stator-Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. PP, No. 99, pp. 1-1, 2012.
- [31]J. F. Martins, V. F. Pires, and A. J. Pires, "PCA-Based On-Line Diagnosis of Induction Motor Stator Fault Feed by PWM Inverter," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 3, pp. 2401-2405, 2006.

زیرنویس‌ها

-
- ¹ Bearing
² Eccentricity
³ Equivalent Electric Circuit
⁴ Equivalent Magnetic Circuit
⁵ Modified Winding Function Approach
⁶ Principle Slot Harmonic
⁷ Fast Fourier Transform
⁸ Online
⁹ Pearson
¹⁰ Unbalanced Magnetic Pull
¹¹ Feature