

شناسایی خطای اتصال کلاف به کلاف در موتورهای القایی سه فاز به روش تحلیل پاسخ فرکانسی

مهرداد صادقی^۱، هادی طاریمردی^۲

^۱ پژوهشگر مستقل، دانشگاه کردستان، کردستان، maneshtilam2016@gmail.com
^۲ استادیار، دانشگاه کردستان، کردستان، h.tarimoradi@uok.ac.ir

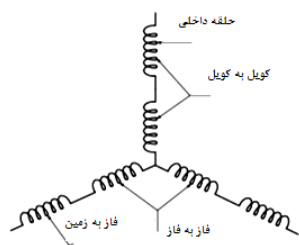
چکیده

صنعت ۷۰ درصد موتورهای القایی سه فاز هستند [۱]. از سویی شناسایی علت‌های خرابی، تحلیل موتورهای القایی سه فاز را ضروری می‌سازد [۲]. اگر خطاها در مراحل اولیه شکل‌گیری تشخیص داده نشوند، ممکن است آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به موتور وارد کنند و یا حتی موجب توقفات اضطراری در فرآیندهای صنعتی شوند. این تجهیزات به‌طور عمده دچار چهار دسته خطا با درصد احتمال رخداد مطابق آنچه که در شکل ۱ آمده است، می‌شوند [۳]. مطابق شکل ۱ سیم‌پیچ استاتور موتورهای القایی نیز همانند بلبرینگ‌ها و روتور می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی دچار خطا شود [۴].

در شکل ۲ انواع خطاهای اتصال کوتاه محتمل مربوط به سیم‌پیچی استاتور آورده شده است. اتصال کوتاه در موتورهای می‌تواند باعث ایجاد حرارت زیاد در سیم‌پیچی‌ها به‌علت افزایش جریان، نامتعادلی جریان، ایجاد حرارت نامتقارن و موضعی، کاهش راندمان و به مرور زمان اتصال زمین شدن سیم‌پیچی‌ها شود.



شکل ۱: احتمال رخداد خطا در موتورهای القایی سه فاز به‌طور عمده [۴]



شکل ۲: انواع خطاهای اتصال کوتاه سیم‌پیچی استاتور موتورهای سه فاز

چند نوع خطا برای سیم‌پیچ‌های استاتور گزارش شده‌اند که بیشتر آن‌ها ریشه در خرابی عایق سیم‌پیچ‌ها دارند [۵]. در شکل ۳ ضعف عایقی به‌عنوان عاملی اثرگذار در ایجاد خطاهای مربوط به سیم‌پیچ استاتور نشان داده شده است. این نارسایی‌های عایقی به مرور منجر به خطاهای اتصال کوتاه می‌شوند.

روش تحلیل پاسخ فرکانسی^۱ یک روش جدید تشخیص خطا در ترانسفورماتورها و موتورهای القایی سه فاز^۲ می‌باشد. این روش قادر به تشخیص خطاهای رایج در موتورهای القایی نظیر خطای سیم‌پیچی می‌باشد. این مقاله، از روش ذکر شده برای تشخیص خطای سیم‌پیچی استاتور موتورهای القایی سه فاز اعم از خطای اتصال کوتاه کلاف به کلاف و خطای اتصال کوتاه فاز به فاز استفاده می‌کند و وضعیت موتور را در حالات سالم بودن و خدادار بودن با نمایشی گرافیکی تحت مقایسه قرار می‌دهد. آزمایشات عملی با مدلسازی واقعی خطا در حالت کاری آفلاین روی یک موتور القایی سه فاز با دستگاه WK6500B صورت گرفته است. از آنجایی که این روش برای تحلیل بر مبنای مقایسه استوار است و متکی به نظرات کارشناسی افراد مجرب در این زمینه دارد، در این مقاله نتایج حاصل از رسم نمودارهای دامنه و فاز پاسخ فرکانسی نیز توسط چهار شاخص آماری ضریب همبستگی^۳، انحراف نرمالیزه شده جذر میانگین مربعات^۴، انحراف طیفی^۵ و انحراف استاندارد مقایسه‌ای^۶ مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

تشخیص خطای سیم‌پیچی، روش تحلیل پاسخ فرکانسی، شاخص‌های آماری، موتورهای القایی سه فاز.

مقدمه

موتورهای القایی سه فاز در کاربردهای مختلف نقش موثری را در صنعت بازی می‌کنند. از این تجهیز برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی به‌صورت حرکت دورانی حول یک محور استفاده می‌شود. موتورهای القایی سه فاز به‌دلیل سادگی، هزینه نگهداری کم، مقاوم بودن و بازدهی نسبتاً خوب همواره مورد توجه بوده‌اند و به‌دلیل تنوع زیاد در اندازه و در دسترس بودن آن‌ها تقریباً در انواع صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از میان انواع موتورهای به‌کار رفته در

¹ FRA

² Three phase induction motor (TPIM)

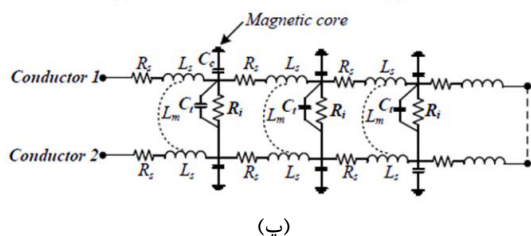
³ CC

⁴ SIGMA

⁵ NRMSD

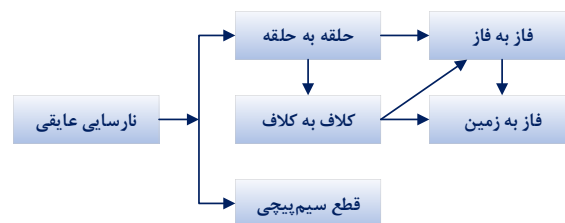
⁶ CSD

سیم پیچی استاتور به روش تحلیل پاسخ فرکانسی



امپدانس سیم‌پیچ‌های استاتور ترکیبی از مقاومت، اندوکتانس و خازن‌های پارازیتی است. مقاومت سیم‌پیچی مطابق رابطه (۱) به‌طور مستقیم به طول هادی که خود به تعداد دور سیم‌پیچ وابسته است، بستگی دارد [۲۲].

$$R \propto N \quad (1)$$

$$L_s = \frac{\mu_0 \mathcal{R} l_r \pi N_s^2}{q} \quad (2)$$
$$L_{mij} = k \sqrt{L_i L_j} \quad (3)$$
$$L = f_1(N) \quad (9)$$
$$C_t = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{l l_i}{2 e_i} \quad (5)$$


شکل ۳: روند ایجاد خطاهای اتصال در اثر نارسایی‌های عایقی

در مطالعات انجام شده تاکنون روش‌های متعددی برای تشخیص خطاهای سیم‌پیچ استاتور مطرح شده است [۶]. زیوبکیانگ و همکاران از اختلاف فاز میان جریان‌های سه فاز به‌عنوان شاخص خطای سیم‌پیچ استاتور استفاده کرده‌اند [۷]. پژوهشگران دیگری از الگوی جریان کنکوردیا در قاب مرجع ثابت به‌عنوان شاخصی برای شناسایی خطای سیم‌پیچ استاتور استفاده کرده‌اند [۸، ۹]. مطالعات بیشتری نیز در این زمینه انجام شده است که در آن‌ها یک مدل ریاضی برای موتور القایی دارای خطای اتصال کوتاه در سیم‌پیچی استاتور ارائه شده و از مولفه منفی جریان فاز در تشخیص این خطا استفاده شده است [۱۰]. در مطالعات دیگری، یک سیستم نرو-فازی تطبیقی با ورودی‌های جریان توالی منفی، جریان توالی مثبت و ولتاژ توالی منفی در راستای تشخیص خطای سیم‌پیچ به‌کار برده شده است [۱۱]. پژوهشگران دیگری نیز، برای تشخیص خطاهای سیم‌پیچ، موقعیت آن‌ها و تاثیرشان روی عملکرد موتور تحقیقاتی انجام داده‌اند [۱۲-۲۱]. در مقاله حاضر، از روش تحلیل پاسخ فرکانسی برای تشخیص خطای سیم‌پیچی استاتور موتورهای القایی سه فاز اعم از خطای اتصال کوتاه کلاف به کلاف و خطای اتصال کوتاه فاز به فاز استفاده شده است. با مقایسه پاسخ فرکانسی حالت مرجع TPIM و پاسخ فرکانسی حالت خطا در تحت مدلسازی واقعی خطا، وضعیت غیرنرمال قابل آشکارسازی است. برای تشخیص صحیح در این فرآیند مقایسه‌ای به متخصص در این زمینه نیاز است. بنابراین به‌منظور عدم اتکا به نظریه کارشناسی از شاخص‌های آماری استفاده شده است. این شاخص‌های آماری به تشخیص شرایط سلامت موتور کمک می‌کنند.

⁷Resistance-self inductance-capacity-mutual (RLCM)

و خازن سیم‌پیچی با هسته و زمین مطابق رابطه (۶) است [۲۳].

$$C_c = \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{l_c}{2e_m} \quad (6)$$

در اینجا l طول هادی است و با تعداد دور سیم‌پیچی متناسب است [۲۲]. بنابراین خازن پارازیتی کل مطابق رابطه (۷) تابعی از تعداد دور سیم‌پیچی است.

$$C_g = f_2(N) \quad (7)$$

اگر امپدانس سیم‌پیچی موتور القایی سه فاز به صورت رابطه (۸) در نظر گرفته شود، امپدانس به مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت خازنی بستگی خواهد داشت. با استفاده از روابط (۱)، (۴) و (۷) امپدانس در رابطه (۹) به تعداد حلقه‌های سیم‌پیچی وابسته است [۲].

$$Z = R + (X_l - X_c) \quad (8)$$

$$Z = f_3(N) \quad (9)$$

شاخص‌های آماری

معمولاً تغییرات در نمودارها به شکل‌های مختلفی نظیر کاهش یا افزایش در مقادیر دامنه و فاز پاسخ فرکانسی، ظاهر شدن یا ناپدید شدن فرکانس‌های رزونانسی در یک محدوده و جابجایی‌ها در محور فرکانسی ایجاد می‌شوند. برای پایش تغییرات صورت گرفته و بالا بردن دقت در تحلیل از پارامترهای آماری استفاده می‌شود. در این مقاله از چهار شاخص آماری ضریب همبستگی، انحراف نرمالیزه شده جذر میانگین مربعات، انحراف طیفی و انحراف استاندارد مقایسه‌ای به ترتیب مطابق روابط (۱۰) تا (۱۳) استفاده شده است.

$$CC_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left[\frac{X_i - A_i}{A_i} \right]^2 + \left[\frac{Y_i - A_i}{A_i} \right]^2}, A_i = \frac{X_i + Y_i}{2} \quad (11)$$

$$NRMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} / \bar{Y} \quad (12)$$

$$CSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X}) - (Y_i - \bar{Y})]^2}{N - 1}} \quad (13)$$

روش کار

سیم‌پیچی هر فاز از فازهای مختلف استاتور TPIM از چندین کلاف تشکیل شده است. برای ایجاد کردن این نوع خطای راجع بعد از سیم‌پیچی مجدد موتور و بیرون کشیدن تپ‌های مختلف جهت مدلسازی واقعی خطا، دو عدد از کلاف‌های مربوط به یک‌فاز به میزان ۳۰ درصد تعداد حلقه‌ها اتصال کوتاه در نظر گرفته شد. شرایط این آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

از طرفی، در خطای اتصال فاز به فاز دیگر نمی‌توان فقط امپدانس دو سر یک فاز را اندازه گرفت؛ یعنی خطای اتصال فاز به فاز تنها از دو سر یک فاز دقیقاً قابل تشخیص نبوده و نیاز است بدین منظور سیم‌پیچی‌های دو فاز از فازهای موتور در این آزمایش وارد شوند. در

واقع حالت مرجع برای مدلسازی این نوع خطا شرایطی است که امپدانس دو فاز مختلف از سیم‌پیچی استاتور با هم سری شده‌اند و روند ایجاد حالت خطا بدین گونه است که از تپ‌های ۵۰ درصدی که برای سیم‌پیچ‌های R و T موتور مهیا شده است، استفاده شود. نخست بایستی حالت مرجع را که همان پاسخ فرکانسی مجموعه سری شده دو سیم‌پیچ بدون خطا می‌باشد اندازه‌گیری شود، سپس از تپ‌های ۵۰ درصدی که برای سیم‌پیچ‌های موتور مهیا شده است استفاده شود. این نوع خطا با هر مقدار اتصال در فاز مربوطه می‌تواند مدل شود، اما علت انتخاب تپ‌های ۵۰ درصدی در این مقاله، سهولت در مدلسازی و حالت خاصی از میان تپ‌های تدارک دیده شده برای این الگوی آزمایشگاهی موجود است که شدیدترین حالت خطا را ایجاد کرده است. بنابراین در حالت مرجع سرهای Rb و Ta به هم متصل شده و مقدار امپدانس نیز از دو سر Ra و Tb به دست آورده می‌شود. برای حالت خطادار نیز سرهای Tپ ۵۰ درصد فاز R و Tپ ۵۰ درصد فاز T را به هم متصل شده و اندازه‌گیری از دو سر Ra و Tb انجام می‌گردد. خلاصه‌ای از شرایط آزمایش مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات آزمایش تشخیص خطای اتصال کوتاه کلاف به کلاف

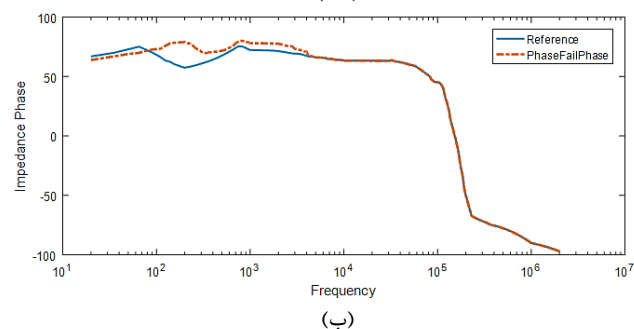
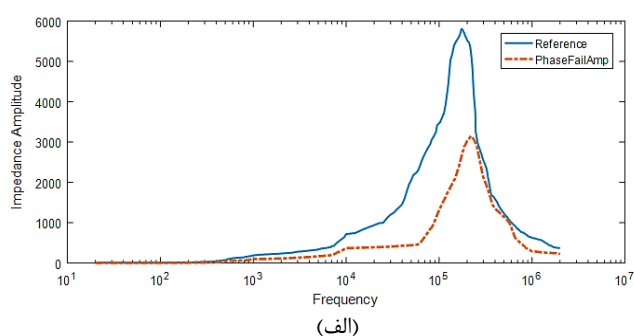
هدف	مشخصات
تابع تبدیل	امپدانس فاز S سیم‌پیچی استاتور در شرایط اتصال کوتاه تپ‌های Sa و ۷۰ درصد S
پارامتر متغیر	فرکانس
محدوده تغییرات متغیر	۲ مگاهرتز
وضعیت روتور	سالم و در حالت ایستا
وجود خطا در استاتور	خطای اتصال کوتاه کلاف به کلاف
قدرت موتور	۷٫۵ کیلووات
وضعیت فازهای دیگر R و T	مدار باز

جدول ۲: مشخصات امکان سنجی تشخیص خطای اتصال کوتاه فاز به فاز

هدف	مشخصات
تابع تبدیل	امپدانس دو سر مجموعه سری Ra و Tb سیم‌پیچی‌های استاتور در شرایطی که تپ‌های Rb و Ta اتصال کوتاه شده‌اند.
پارامتر متغیر	فرکانس
محدوده تغییرات متغیر	۲ مگاهرتز
وضعیت روتور	سالم و در حالت ایستا
وجود خطا در استاتور	خطای اتصال کوتاه فاز به فاز هنگامی که تپ‌های ۵۰ درصد R و ۵۰ درصد T به هم متصل شده‌اند.
قدرت موتور	۷٫۵ کیلووات
وضعیت فاز دیگر S	مدار باز

نتایج آزمایشگاهی

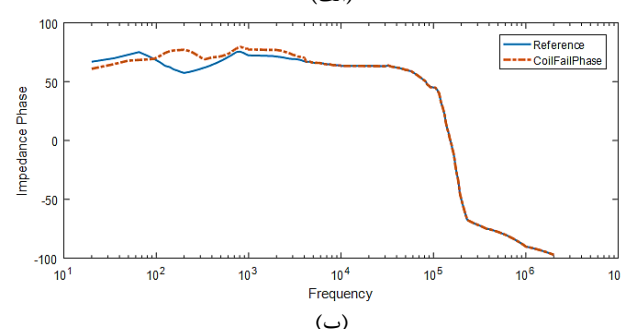
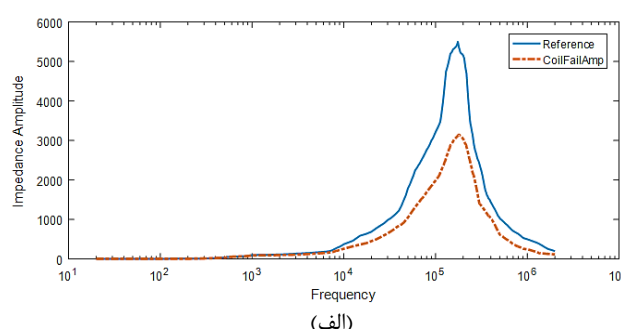
به حالت مرجع وجود دارد و به دلیل سری شدن مجموعه دو سیم‌پیچی چنین مسئله‌ای دور از انتظار نیست. با کمی توجه می‌توان دریافت که اختلاف میان نمودارهای اندازه قابل رویت و شدت تغییرات ملموس است. در نمودار اندازه اختلاف از فرکانس تقریبی ۵ کیلوهرتز آغاز شده و به آهستگی به شیب افزایش آن افزوده شده است و در نقطه اوج نمودار در فرکانس ۱۹۴ کیلوهرتز به مقدار ماکزیمم رسیده است. در نمایش این نوع خطا دیده می‌شود که در اختلاف بین دو نمودار، اندازه از وضوح بیشتری برخوردار بوده و علاوه بر تغییرات در محدوده بیشتری از فرکانس‌های پایین (تا ۵ کیلوهرتز) نسبت به حالت خطای کلاف به کلاف، محدوده فرکانس بالا را شامل می‌شود.



شکل ۶: پاسخ فرکانسی مربوط به مدل‌سازی خطای فاز به فاز، الف) نمودار اندازه، ب) نمودار فاز

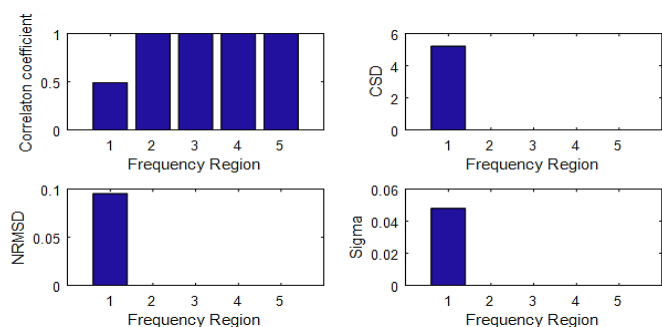
در تحلیل نمودارهای فاز هم می‌توان عنوان کرد که خطای واقع شده باعث انحراف نمودار از حالت مرجع در فرکانس زیر ۴ کیلوهرتز شده است، با این تفاوت نسبت به حالات خطای قبلی میزان تغییرات زاویه فاز بیشتر بوده است. برحسب داده‌های عددی که در روند آزمایشات ثبت شده است، نقاط اوج نمودارهای اندازه تقریباً به میزان ۱۴ کیلوهرتز جابجا شده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که برای فرکانس‌های بالا در محدوده ۱ تا ۲ مگاهرتز تغییرات محسوس‌تری نسبت به حالات خطای قبلی وجود دارد. مقدار تغییرات در هر دو بعد نمودارها تابعی از شدت خطا شده و در این نوع خطا بیشترین میزان جابه‌جایی نمودار اتفاق افتاده است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهند که روش تحلیل پاسخ فرکانسی قابلیت تشخیص خطاهای ذکر شده را دارد. جهت تحلیل عددی و دقیق نمودارها، ابتدا بازه فرکانسی ۲ مگاهرتز، به پنج محدوده فرکانسی ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز، ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز، ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوهرتز، ۴۰۰ تا ۱ مگاهرتز و ۱ تا ۲ مگاهرتز تقسیم شده است و میزان اختلاف‌ها در شکل‌های ۷ تا ۱۰

هر تغییر مکانیکی و الکتریکی منجر به تغییر در پاسخ فرکانسی TPIM می‌شود که این تغییرات در تابع انتقال ظاهر می‌گردد؛ TPIM می‌تواند به روش گرافیکی تحلیل شود که این روش به نظرات کارشناسی وابسته است. در این مقاله، تحلیل به دو روش انجام شده است، نخست با استفاده از روش تحلیل گرافیکی و دیگری به روش‌های آماری که برای پشتیبانی و تکمیل روش تحلیل گرافیکی به کار گرفته شده‌اند. موضوع اصلی در این مقاله، تشخیص خطای سیم‌پیچی در TPIM است. پاسخ فرکانسی TPIM برای حالت‌های خطای اتصال کلاف به کلاف و اتصال فاز به فاز به ترتیب مطابق شکل‌های ۵ و ۶ ترسیم شده‌اند که مقایسه‌ای بین حالت مرجع و حالت خطادار را نشان می‌دهد. موارد (الف) و (ب) در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب، مربوط به نمودارهای اندازه و فاز هستند.



شکل ۵: پاسخ فرکانسی مربوط به مدل‌سازی خطای کلاف به کلاف، الف) نمودار اندازه، ب) نمودار فاز

با دقت در شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف میان نمودارهای اندازه آشکار است. اختلاف از فرکانس تقریبی ۷ کیلوهرتز آغاز شده و به آهستگی به شیب افزایش آن افزوده شده است و در نقطه اوج نمودار در فرکانس ۱۸۰ کیلوهرتز به مقدار ماکزیمم رسیده است. در نمایش این نوع خطا دیده می‌شود که در اختلاف بین دو نمودار، اندازه از وضوح بیشتری برخوردار بوده و محدوده فرکانس بالا را نیز شامل می‌شود. بر حسب داده‌های عددی که در روند آزمایشات ثبت شده است، نقاط اوج نمودارهای اندازه تقریباً به میزان ۱۰ کیلوهرتز جابه‌جا شده‌اند. در تحلیل نمودارهای فاز هم می‌توان عنوان کرد که خطای واقع شده باعث انحراف نمودار از حالت مرجع در فرکانس زیر ۴ کیلوهرتز شده است. با مقایسه نمودارهای شکل ۶ با نمودارهای شکل ۵ می‌توان دریافت که در این حالت تغییرات شدیدتری نسبت



شکل ۱۰: مقادیر چهار شاخص آماری در پنج محدوده فرکانسی برای مقایسه نمودار فاز پاسخ فرکانسی خطای فاز به فاز نسبت به حالت مرجع

نتیجه‌گیری

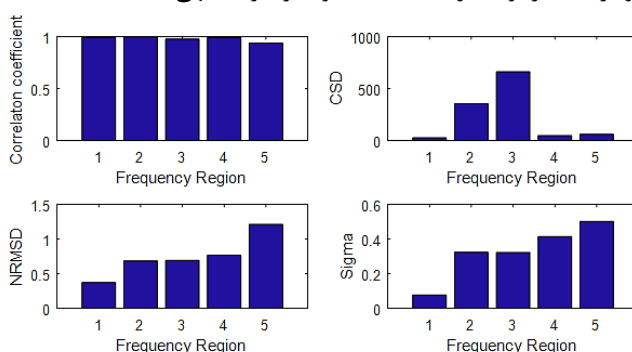
روش تحلیل پاسخ فرکانسی در تشخیص خطای موتورهای القایی سه فاز، یک روش جدید و کارآمد است. جذابیت‌های این روش کارشناسان زیادی را مجذوب خود کرده است. این روش قادر به تشخیص خطاهای رایج در موتورهای القایی نظیر خطای سیم‌پیچی می‌باشد. در مقاله حاضر، از روش ذکر شده برای تشخیص خطای سیم‌پیچی استاتور موتورهای القایی سه فاز اعم از خطای اتصال کوتاه کلاف به کلاف و خطای اتصال کوتاه فاز به فاز استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که نمودار اندازه پاسخ فرکانسی نسبت به نمودار فاز پاسخ فرکانسی در تشخیص خطای نقش بیشتری ایفا می‌کند و تغییرات در نمودارها اغلب به‌صورت تغییر در دامنه و جابه‌جایی نمودار ظاهر می‌شوند. این روش به‌گونه‌ای نسبت به وقوع خطاهای سیم‌پیچی حساس است که متناظر با شدت آن می‌توان حتی نوع خطای اتصال را تشخیص داد. از آنجایی که تحلیل گرافیکی به شدت تابع نظر شخص تحلیل‌گر است، لذا استفاده از شاخص‌های آماری جهت کاهش خطا می‌تواند بسیار موثر واقع شود.

مراجع و منابع

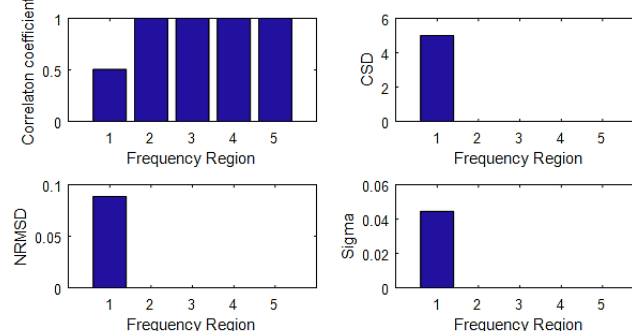
- [1] Bonnett, A.H. and Soukup, G.C., 1992. "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(4), pp. 921-937.
- [2] Vilhekar, T.G., Ballal, M.S. and Umre, B.S., 2016. "Application of Sweep Frequency Response Analysis for the detection of winding faults in induction motor", in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. pp. 1458-1463.
- [3] Bhowmik, P.S., Pradhan, S. and Prakash, M., 2013. "Fault diagnostic and monitoring methods of induction motor: a review". *International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE)*, 1(1), pp. 1-18.
- [4] Bonnett, A.K. and Soukup, G.C., 1991. "Cause and analysis of stator and rotor failures in 3-phase squirrel cage induction motors", in *Conference Record of 1991 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*. pp. 22-42.

برحسب شاخص‌های آماری مذکور محاسبه و مشخص شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود برای این حالت خطا، تغییرات برای نمودار فاز محدود به بازه اول ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد، با این تفاوت مطابق مقدار شاخص‌ها این تغییرات شدیدتر شده است. استفاده از چند شاخص با حساسیت‌های مختلف نسبت به تغییرات شکل گرفته بین نمودارها در هنگام خطا و با رفتاری معکوس نسبت به هم در یک بازه، می‌تواند در تشخیص خطا نقش برجسته‌تری داشته باشد. رفتار شاخص‌ها در شکل ۸ تأیید کننده این موضوع است.

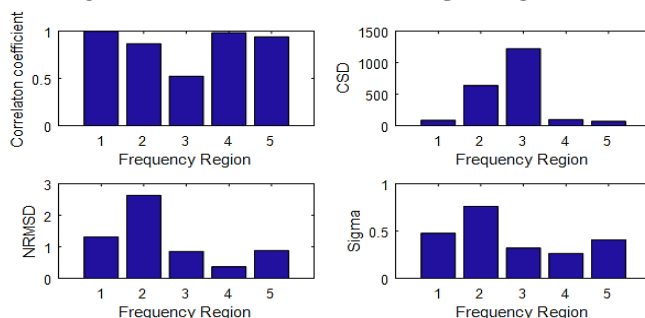
شاخص‌ها در شکل ۹ نشان می‌دهند که در حالت خطای فاز به فاز نمودار تقریباً در تمامی بازه‌های فرکانسی دستخوش تغییر قرار گرفته است. همچنین در تحلیل شاخص‌ها برای نمودارهای فاز شکل ۱۰ می‌توان دریافت نسبت به حالت خطای کلاف به کلاف تغییرات واضح نبوده و تحلیل نمودارهای فاز نمی‌تواند در تشخیص دقیق خطا کمک کننده باشد، زیرا مقدار شاخص‌ها بیانگر این موضوع است که نمودارهای فاز برای دو حالت خطا تقریباً رفتار مشابهی داشته‌اند.



شکل ۷: مقادیر چهار شاخص آماری در پنج محدوده فرکانسی برای مقایسه نمودار دامنه پاسخ فرکانسی خطای کلاف به کلاف نسبت به حالت مرجع



شکل ۸: مقادیر چهار شاخص آماری در پنج محدوده فرکانسی برای مقایسه نمودار فاز پاسخ فرکانسی خطای کلاف به کلاف نسبت به حالت مرجع



شکل ۹: مقادیر چهار شاخص آماری در پنج محدوده فرکانسی برای مقایسه نمودار دامنه پاسخ فرکانسی خطای فاز به فاز نسبت به حالت مرجع

- windings", in 2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMMD), pp. 1-8.
- [16] Patel, D.C. and Chandorkar, M.C., 2014. "Modeling and Analysis of Stator Interturn Fault Location Effects on Induction Machines". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(9), pp. 4552-4564.
- [17] Blázquez, F.R., Platero, C.A., Rebollo, E., et al., 2015. "Field-winding fault detection in synchronous machines with static excitation through frequency response analysis". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, pp. 229-239.
- [18] Guezmil, A., Berriri, H., Pusca, R., et al., 2017. "Detecting Inter-Turn Short-Circuit Fault in Induction Machine Using High-Order Sliding Mode Observer: Simulation and Experimental Verification". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 28(4), pp. 532-540.
- [19] Bednarz, S.A., Dybkowski, M. and Wolkiewicz, M., 2018. "Identification of the Stator Faults in the Induction Motor Drives Using Parameter Estimator", in 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), pp. 688-693.
- [20] Bednarz, S.A. and Dybkowski, M., 2019. "Induction motor windings faults detection using flux-error based MRAS estimators". *Diagnostyka*, 20.
- [21] Teguiá, J.B., Kenne, G., Kammogne, A.T.S., et al., 2021. "The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Sensorless Operating Induction Motors". *World Journal of Engineering and Technology*, 9(3), pp. 653-681.
- [22] Ballal, M.S., Ballal, D.M., Suryawanshi, H.M., et al., 2012. "Wing technique: A novel approach for the detection of stator winding inter-turn short circuit and open circuit faults in three phase induction motors". *Journal of power electronics*, 12(1), pp. 208-214.
- [23] Perisse, F., Werynski, P. and Roger, D., 2007. "A new method for AC machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 14(5), pp. 1308-1315.
- [5] Thomson, W.T. and Fenger, M., 2001. "Current signature analysis to detect induction motor faults". *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(4), pp. 26-34.
- [6] Zhang, P., Du, Y., Habetler, T.G., et al., 2011. "A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), pp. 34-46.
- [7] Xu, B.-q., Li, H.-m. and Sun, L.-l., 2004. "Detection of stator winding inter-turn short circuit fault in induction motors", in 2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. pp. 1005-1009 Vol.2.
- [8] Cardoso, A.J.M., Cruz, S.M.A. and Fonseca, D.S.B., 1999. "Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3), pp. 595-598.
- [9] Patel, D.C. and Chandorkar, M.C., 2010. "On-line load test for induction machine stator inter-turn fault detection under stator electrical asymmetries", in IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. pp. 933-938.
- [10] Williamson, S. and Mirzoian, K., 1985. "Analysis of Cage Induction Motors with Stator Winding Faults". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(7), pp. 1838-1842.
- [11] Ahmed, S.M., Abu-Rub, H., Refaat, S.S., et al., 2013. "Diagnosis of stator turn-to-turn fault and stator voltage unbalance fault using ANFIS". *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(1), pp. 129.
- [12] Joksimovic, G.M. and Penman, J., 2000. "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5), pp. 1078-1084.
- [13] Xianrong, C., Cocquempot, V. and Christophe, C., 2003. "A model of asynchronous machines for stator fault detection and isolation". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(3), pp. 578-584.
- [14] Florkowski, M. and Furgal, J., 2009. "Modelling of winding failures identification using the frequency response analysis (FRA) method". *Electric Power Systems Research*, 79(7), pp. 1069-1075.
- [15] Gandhi, K.R. and Badgujar, K.P., 2014. "Artificial neural network based identification of deviation in frequency response of power transformer