

روشی جدید برای تشخیص عیب ناهم راستایی استاتیک در موتورهای القایی قفس سنجابی

مهدی احمدی^(۱) - جواد پشتمان^(۲) - سید مهدی میرایمانی^(۳)

(۱) دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

(۲) دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت

(۳) استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۹۱

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۱

خلاصه: در این مقاله به تشخیص عیب ناهم راستایی استاتیک در موتورهای القایی قفس سنجابی پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی موتور القایی در حالت سالم و معیوب از روش اجزاء محدود دو بعدی استفاده شده است و اعتبارسنجی روش ارائه شده با مقایسه سیگنال‌های جریان و سرعت شبیه سازی شده در حالت سالم با داده‌های عملی انجام شده است. برای تشخیص عیب در ابتدا از روش تبدیل فوری به سریع سیگنال جریان استفاده می‌شود. اگرچه نتایج حاصل از این روش، وقوع عیب را هشدار می‌دهند اما برای تحلیل لازم است از هارمونیک‌های مرتبه بالا استفاده شود و به دلیل دامنه کوچک این هارمونیک‌ها، مقایسه بسیار مشکل خواهد بود. برای رفع این مشکلات پیشنهاد می‌شود از دو سیم‌پیچ آزمایش متقارن در اطراف فاصله هوایی استفاده شود تا هرگونه تغییر در این ناحیه بتواند به خوبی قابل تشخیص باشد. به خاطر استفاده سیم‌پیچ‌ها در حالت مدار باز، این سیم‌پیچ‌ها بر دینامیک موتور تأثیری نمی‌گذارند و از طرفی نتایج نشان می‌دهند که تحلیل ولتاژ القا شده در آن‌ها می‌تواند وقوع عیب، نوع و درصد آن را به خوبی نشان دهد.

کلمات کلیدی: روش اجزاء محدود، تشخیص عیب استاتیک، سیم‌پیچ‌های آزمایش، موتورهای القایی.

۱- مقدمه

اصلی اینکه موتورهای القایی به هسته بسیاری از صنایع تبدیل شده‌اند نیز همین باشد. این دسته از ماشین‌های الکتریکی خود به دو دسته قفس سنجابی و حلقه لغزان تقسیم می‌شوند و در این میان، موتورهای القایی قفس سنجابی ساده‌تر، مقرون به صرفه‌تر ولی زمخت‌تر هستند [۲، ۳].

عیوب داخلی موتورهای القایی را می‌توان به دو گروه اصلی الکتریکی و مکانیکی دسته بندی کرد [۴، ۵]. عیوب الکتریکی به خاطر مشکلات عایق‌بندی سیم‌پیچ‌های استاتور و برخی از عیوب روتور به وجود می‌آیند. عیوب مکانیکی شامل عیوب بیرینگ، ناهم‌راستایی فاصله هوایی، عیوب بار و ناهم‌محوری شفت می‌شود و در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کل عیوب موتورهای القایی را به خود اختصاص می‌دهد. در این میان، عیب بیرینگ (۵۰٪-۴۰٪) و ناهم‌راستایی (۶۰٪) مهم‌ترین عیوب مکانیکی محسوب می‌شوند [۶]. از طرفی تقریباً ۸۰ درصد عیوب مکانیکی منجر به تولید عیب ناهم‌راستایی می‌شوند [۷].

ماشین‌های دوار مانند موتورهای الکتریکی و ژنراتورها در صنایع مختلف تجاری و نظامی نقش مهمی را ایفا می‌کنند و لذا خرابی آن‌ها می‌تواند موجب خسارت‌های سنگین از جمله کاهش خروجی، هزینه‌های نگهداری، کاهش بازدهی شده و حتی احتمالاً موجب تلفات انسانی گردد. صنعت در برابر این ریسک چاره‌ای جز به کار گرفتن سیستم‌های نگهداری که قبل از وقوع عیب هشدار بدهند را ندارد. در واقع می‌توان گفت به کارگیری یک سیستم پیش‌بینی کننده مطمئن رخداد عیب در ماشین‌های حساس می‌تواند از هزینه‌های هنگفت ناشی از خرابی‌های احتمالی جلوگیری کند [۱].

در میان ماشین‌های الکتریکی، موتورهای القایی یکی از ابزار مهم در صنعت هستند که به خاطر ساختار ساده و کارآیی 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 بیشتری می‌باشند. شاید دلیل

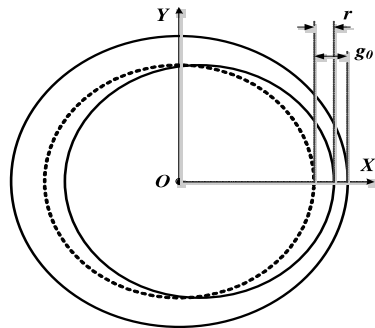
عیب ناهمراستایی منجر به کشش مغناطیسی نامتعادل شعاعی^۱ (UMP) میان محیط درونی استاتور و محیط بیرونی روتور می‌شود. جهت UMP چنان است که موجب تقویت درجه ناهمراستایی می‌گردد. بدین ترتیب وجود ناهمراستایی نوعی حلقه میان درصد ناهمراستایی و دامنه UMP تولید می‌کند. به دلیل اصطکاک میان استاتور و روتور، این موضوع می‌تواند به تدریج به موتور و متقابلاً به سیم‌پیچ‌های استاتور و قفسه روتور صدمه وارد کند. به علاوه، هر درصدی از عیب ناهمراستایی در موتورهای القایی فشار مکانیکی زیادی را به موتور وارد می‌کند که می‌تواند فرسودگی و سایش بیرینگ را سرعت بخشد. اندرکنش UMP با هسته روتور منجر به تولید لرزش‌های غیر عادی سیم‌پیچ‌های استاتور می‌شود که می‌تواند خطرناک باشد [۸].

بدون شک مدلسازی مناسب یکی از مهم‌ترین گام‌های تشخیص عیب است. هرچه مدل ارائه شده برای یک سیستم به واقعیت نزدیک‌تر باشد، نتایج حاصل از فرآیند شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. در موتورهای القایی معمولاً از سه روش برای مدلسازی استفاده می‌شود که عبارتند از تحلیل و مدلسازی پارامترهای فشرده در مدارات معادل و مدار مغناطیسی معادل، تحلیل تابع سیم‌پیچ اصلاح یافته و روش مبتنی بر تحلیل المان محدود. هرکدام از روش‌های EMC و MWFA دارای فرضیاتی هستند که در واقعیت رخ نمی‌دهند اما در روش المان محدود تمامی مدل‌های هندسی، الکتریکی، فیزیکی و مکانیکی قسمت‌های مختلف در نظر گرفته می‌شوند و مدلی جامع در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

برای تشخیص عیب ناهمراستایی در موتورهای القایی روش‌های متعددی ارائه شده است. الیسون و یانگ در [۹] با استفاده از روش تحلیل طیف نویز و آکوستیک به تشخیص عیب ناهمراستایی پرداخته‌اند و برای جلوگیری از تأثیر نویز موجود در محیط اطراف از یک محفظه آکوستیکی استفاده کرده‌اند. مهم‌ترین ایراد این روش تأثیرگذاری نویزهای محیطی است. پنمن و همکارانش در [۱۰، ۱۱] با استفاده از یک سیم‌پیچ در اطراف شفت روتور نشان داده‌اند تغییرات در طیف شار هم‌قطبی محوری به‌خاطر عیب ناهمراستایی رخ می‌دهد. این روش برای دسته وسیعی از موتورهای القایی قابل استفاده است اما می‌بایست تأثیر محیط اطراف بر تضعیف دامنه شار محوری را در نظر گرفت. کامرون و همکارانش در [۱۲] با استفاده از تحلیل جریان خط و ارتعاشات به تشخیص عیب ناهمراستایی پرداخته‌اند. با استفاده از تحلیل تئوری و داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است که مشخصه‌هایی در طیف جریان و ارتعاشات وجود دارد که تنها به عیب ناهمراستایی وابسته‌اند. واس در [۱۳] فرمولی ارائه کرده است که ارتباط میان عیب ناهمراستایی و محتوای فرکانسی سیگنال جریان را نشان می‌دهد. در همین راستا، تولید و همکارانش در [۱] با ارائه مدل جدیدی برای موتور القایی به تشخیص عیب ناهمراستایی با استفاده از تحلیل جریان خط پرداخته‌اند. درل و همکارانش در [۱۴] با انجام کار مشابهی با تحلیل شار فاصله

هوایی، جریان و ارتعاشات به تشخیص عیب ناهمراستایی استاتیک و دینامیک در موتورهای القایی پرداخته‌اند. البته با این تفاوت که پیشنهاد کرده‌اند تأثیر عیوب استاتیک و دینامیک بایستی همزمان بررسی شود. در ادامه، مرجع [۱۵] با استفاده از روش نفوذپذیری MMF به محاسبه چگالی شار و هارمونیک‌های آن و متناظراً هارمونیک‌های سیگنال جریان می‌پردازد. تحلیل تئوری ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده است و نشان داده شده است که با افزایش درجه ناهمراستایی استاتیک دامنه مؤلفه‌های جریان افزایش می‌یابد. در مراجع ذکر شده، محققین از تحلیل حالت دائم استفاده نموده‌اند. در مراجع [۱۶، ۱۷] محققین با استفاده از تحلیل حالت گذرا و روش تبدیل موجک به بررسی و تشخیص عیب ناهمراستایی پرداخته‌اند اما در کاربردهای عملی دستیابی به داده‌های حالت گذرا مقدور نیست. در سال‌های اخیر مراجع [۶، ۱۸، ۱۹] به تشخیص عیب ناهمراستایی با استفاده از روش‌های مبتنی بر سیگنال پرداخته‌اند. در این تحقیقات، از روش المان محدود برای مدلسازی موتور القایی استفاده شده است. روش المان محدود به دلیل دقت و کارایی مناسب در مدلسازی و تحلیل ماشین‌های دوار، به روشی محبوب در میان محققین تبدیل شده است. محقق در مراجع [۲۰، ۲۱] با استفاده از نصب سیم‌پیچ‌های آزمایش در اطراف فاصله هوایی به تشخیص عیب ناهمراستایی در موتورهای شار محوری پرداخته است و نشان داده است استفاده از این روش می‌تواند ابزار بسیار مناسبی در تشخیص وقوع عیب و درصد آن باشد.

در این تحقیق به تشخیص عیب ناهمراستایی استاتیک پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی موتور القایی از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار FLUX استفاده می‌شود. موتور القایی در حالت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. برای تشخیص عیب، در ابتدا با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع (FFT) تحلیل طیفی سیگنال جریان استاتور انجام می‌شود. اگرچه نتایج حاصل از این روش امکان تشخیص عیب را ممکن می‌کند اما استفاده از سیگنال جریان برای تشخیص عیب مستلزم استفاده از مولفه‌های فرکانسی بالاست که دامنه کمی دارند و این موضوع امکان تشخیص عیب را کاهش می‌دهد. همچنین تشخیص عیب زمانی مفهوم پیدا می‌کند که بتوان درصد وقوع عیب و نوع آن را تشخیص داد. بنابراین لازم است روشی ارائه شود که بتوان با تحلیل هارمونیک‌های پایین به تشخیص عیب مبادرت ورزید و این موضوع مستلزم تأثیر مستقیم تغییرات فاصله هوایی بر روش مورد نظر است. در همین راستا برای به دست آوردن نتایج بهتر و دقیق‌تر از ایده سیم‌پیچ آزمایش در اطراف فاصله هوایی استفاده می‌شود تا تغییرات شار فاصله هوایی متأثر از رخداد عیب بهتر نشان داده شوند. در این روش یک سیم‌پیچ در اطراف فاصله هوایی نصب می‌شود و ولتاژ آن اندازه‌گیری شده و تحلیل طیفی می‌گردد. از آن جایی که جریانی از این سیم‌پیچ عبور نمی‌کند بر رفتار دینامیکی موتور تأثیری نخواهد گذاشت و از طرفی ولتاژ القاء شده در آن کاملاً متأثر از تغییرات فاصله هوایی است و این نکته در تشخیص عیب ناهمراستایی کمک شایانی خواهد



شکل (۱): شماتیک نشان دهنده عیب ناهمراستایی استاتیک: سالم (...)، معیوب (-)

Fig. (1): Schematic representation of static eccentricity: faultless condition (...) and faulty condition (-)

۳- مدلسازی موتور القایی به روش اجزاء محدود

ماشین الکتریکی مدل شده یک موتور القایی قفس سنجابی سه فاز، ۷/۵ کیلو وات، ۳۸۰ ولت با اتصال ستاره است. این موتور دارای ۲۰ شیار روتور و ۲۴ شیار استاتور می‌باشد. مشخصات موتور القایی قفس سنجابی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار FLUX 2D در جدول (۱) نشان داده شده است. نمای دو بعدی موتور القایی تحت آزمایش به صورت شکل (۲) است.

کرد. بنابراین مهم‌ترین ویژگی‌های روش‌های مورد استفاده در این بخش را می‌توان تشخیص وقوع، نوع و میزان عیب ناهمراستایی با استفاده از تحلیل ولتاژ سیم‌پیچ‌های آزمایش و توانایی تشخیص عیوب با درصد کم عنوان نمود.

۲- تعریف عیب ناهمراستایی استاتیک

غالباً عیب ناهمراستایی در طول پروسه ساخت اتفاق می‌افتد و خرابی‌های مکانیکی منشا تولید آن هستند. عیب ناهمراستایی در سه گروه استاتیک، دینامیک و ترکیبی دسته‌بندی می‌شود. در عیب استاتیک، مراکز چرخشی و هندسی روتور بر یکدیگر منطبق هستند اما با مرکز هندسی استاتور متفاوت می‌باشند که در شکل (۱) نشان داده شده است. در عیب ناهمراستایی استاتیک محل کوچکترین فاصله هوایی ثابت است.

با توجه به شکل (۱)، درجه عیب ناهمراستایی استاتیک (SEF) به صورت زیر تعریف می‌شود.

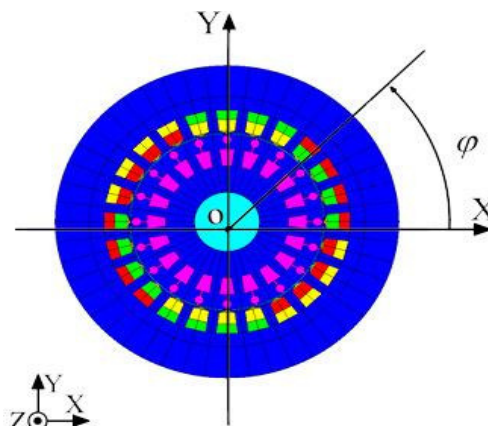
$$SEF = \frac{r}{g_0} \times 100 \% \quad (1)$$

که در آن، g_0 طول فاصله هوایی در حالت سالم و r میزان انحراف فاصله هوایی از حالت سالم در محل فاصله هوایی بیشینه یا کمینه است.

Table (1): Electrical and geometrical characteristics of simulated motor

جدول (۱): مشخصات هندسی و الکتریکی موتور القایی شبیه‌سازی شده

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
120 میلی‌متر	قطر داخلی استاتور	7.5 کیلووات	توان نامی
119 میلی‌متر	قطر خارجی روتور	380 ولت	ولتاژ
40 میلی‌متر	قطر داخلی هسته روتور	50 هرتز	فرکانس کاری
0.5 میلی‌متر	ضخامت فاصله هوایی	24	تعداد شیارهای استاتور
125 میلی‌متر	طول هسته روتور و استاتور	20	تعداد شیارهای روتور
		212 میلی‌متر	قطر خارجی هسته استاتور



شکل (۲): نمای دو بعدی موتور القایی قفس سنجابی

Fig. (2): Cross section of the squirrel cage induction motor

تحلیل رفتار دینامیکی موتورهای القایی نیازمند تحلیل مغناطیسی حالت گذرا در حضور کوپل الکترومکانیکی است یعنی معادلات مکانیکی حرکت روتور به مدل مغناطیسی یا الکترومغناطیسی موتور اضافه می‌شود. این معادله در حالت کلی به صورت معادله (۲) است:

$$J\dot{\omega} = M_e - M_r - f\omega \quad (2)$$

که در آن J ممان اینرسی، $\dot{\omega}$ شتاب زاویه‌ای، M_e گشتاور الکترومغناطیسی، M_r گشتاور بار، f ضریب اصطکاک متناظر با تلفات مکانیکی حاصل از اصطکاک و ω سرعت زاویه‌ای است. بدین ترتیب با کوپل شدن معادلات مکانیکی با معادلات الکترومغناطیسی می‌توان رفتار دینامیکی موتور را در هر لحظه به دست آورد و با حل معادلات، سرعت روتور و موقعیت آن را در هر گام زمانی محاسبه کرد.

۴- شبیه‌سازی رفتار دینامیکی موتور سالم

در ابتدا برای بررسی صحت شبیه‌سازی، برخی از خروجی‌های مدل از قبیل سرعت، گشتاور، جریان استاتور و توزیع شار را در حالت فاصله هوایی به هم فشردنی را با نتایج ذکر شده در [۲۲] مورد مقایسه قرار داده می‌شود.

نتایج مربوط به شکل‌های (۴) و (۵) موید صحت شبیه‌سازی موتور القایی سالم است.

۵- بررسی تأثیر عیب استاتیک بر چگالی شار فاصله هوایی

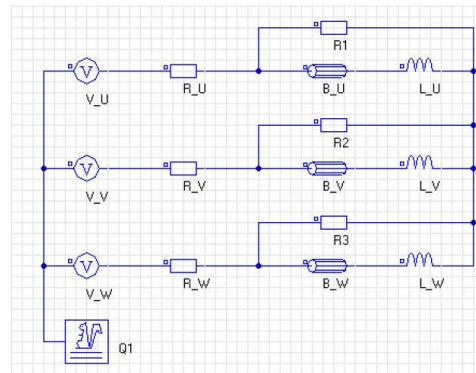
با توجه به شکل (۲) ناهم‌محوری ایستا از جابجایی مرکز تقارن روتور نسبت به مرکز تقارن استاتور بر روی محور مختصات X حاصل شده است. به این معنی که روتور به میزان دلخواه به سمت راست منتقل شده است. در نتیجه فاصله هوایی مینیمم و ماکزیمم به ترتیب در موقعیت $\theta = 0$ و $\theta = \pi$ قرار دارند.

از آن جایی که هرگونه تغییر در چگالی شار فاصله هوایی بر رفتار بقیه قسمت‌ها تأثیر می‌گذارد، این سیگنال در ماشین‌های الکتریکی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این منظور، چگالی شار فاصله هوایی در یک مسیر دایروی درون فاصله هوایی به شعاع $59/75$ میلی‌متر بر حسب موقعیت روتور محاسبه و در شکل (۶) نشان داده شده است.

شبیه‌سازی کامل موتور القایی شامل چندین مرحله است که لازم است این مراحل به ترتیب و پشت سر هم انجام شوند. این مراحل را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

a. شبیه‌سازی هندسی: در این مرحله پارامترهای موردنیاز، دستگاه‌های مختصات، نقاط تشکیل دهنده کوچک‌ترین سطح غیرقابل تعمیم، پارامترهای تعمیم سطح، مش‌بندی و بی‌نهایت فیزیکی ایجاد می‌شوند.

b. تعیین مدل الکتریکی: منظور از مدل الکتریکی تعیین مواردی از قبیل منبع ولتاژ، تعداد میله‌های روتور و نحوه اتصال آن‌ها، سیم‌پیچ‌های استاتور و تعداد حلقه‌های آن‌ها در هر فاز، مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها و میله‌های روتور و ... می‌باشد. شکل (۳) نشان دهنده مدل الکتریکی مورد استفاده در این مقاله است.

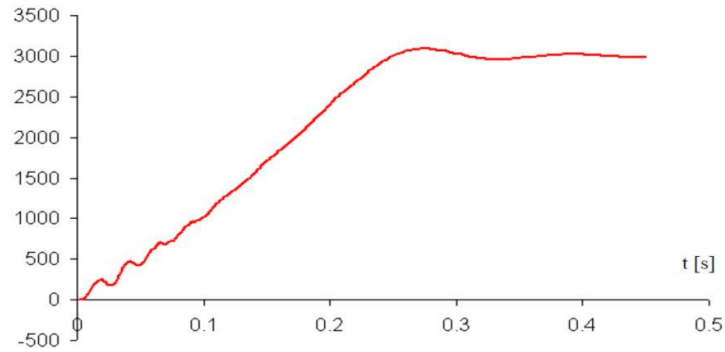
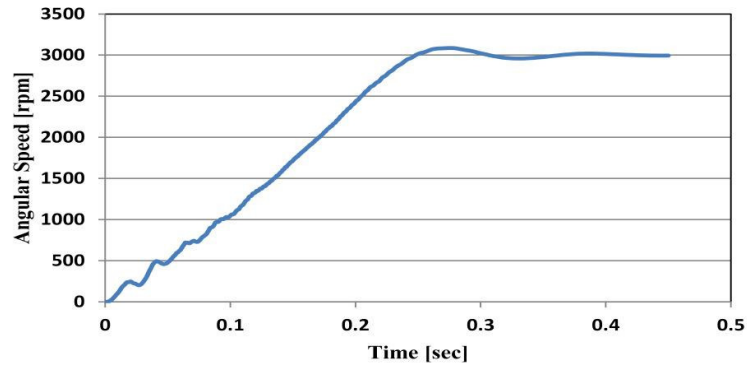


شکل (۳): مدل الکتریکی موتور القایی قفس سنجابی

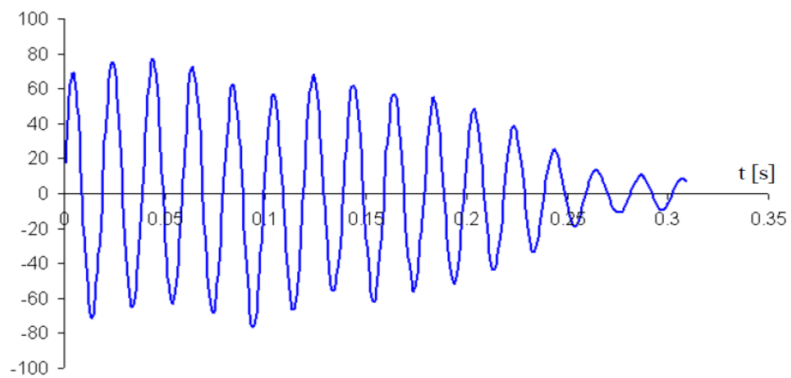
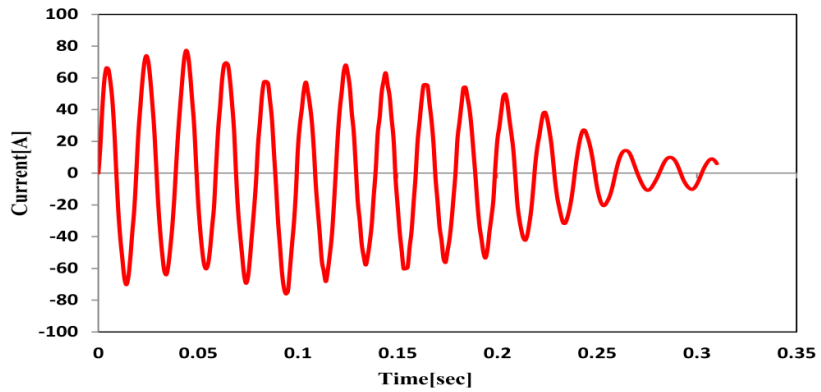
Fig. (3): Electrical model of squirrel cage induction motor

c. تعیین خواص فیزیکی: لازم است خواص فیزیکی قسمت‌های مختلف مشخص شود. برای نمونه می‌بایست اطلاعاتی از قبیل جنس میله‌های روتور و خواص فیزیکی مانند محدوده دمای کاری، مقاومت ویژه ایزوتروپیک و ... را دانست و منحنی $B-H$ هسته‌های مغناطیسی روتور و استاتور را تعیین نمود.

d. تعیین رفتار مکانیکی اجزا: زمانی که یکی از اجزای تشکیل دهنده سیستم دارای حرکت باشد، می‌بایست رفتار مکانیکی کل اجزا تعریف گردد.

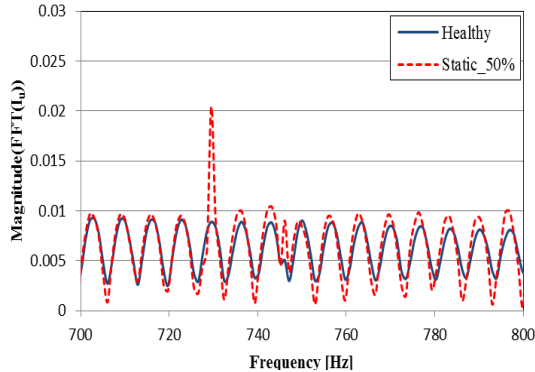


شکل (۴): خروجی سرعت حاصله از شبیه‌سازی (شکل بالا)، خروجی سرعت ذکر شده در مرجع (شکل پایین)
 Fig. (4): Angular speed: simulation (top fig.), experimental (bottom fig.)



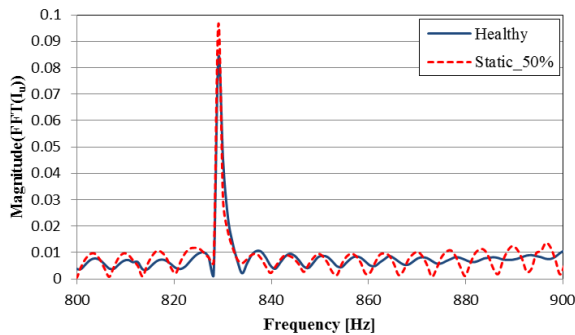
شکل (۵): خروجی جریان فاز U حاصله از شبیه‌سازی (شکل بالا)، خروجی جریان فاز U ذکر شده در مرجع (شکل پایین)
 Fig. (5): Current of phase U: simulation (top fig.), experimental (bottom fig.)

همان طور که از شکل (۷) برمی آید، مؤلفه اصلی سیگنال جریان از وقوع عیب استاتیک تأثیری نمی پذیرد. در گام بعد طیف فرکانسی سیگنال جریان در دو حالت سالم و معیوب در اطراف هارمونیک های بالاتر مقایسه می شوند. در این حالت از هارمونیک های ۱۵، ۱۷ و ۲۱ استفاده می شود.



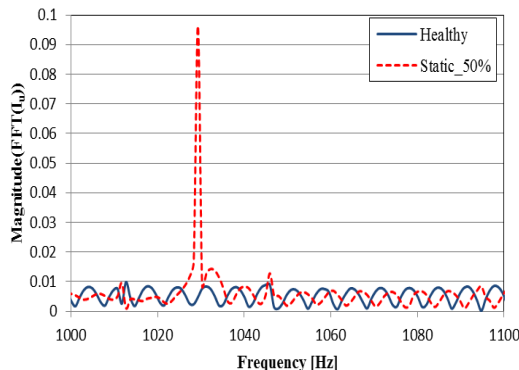
شکل (۸): تبدیل فوریه سیگنال جریان (فاز U) در دو حالت سالم و معیوب در اطراف هارمونیک ۱۵ ام

Fig. (8): Frequency spectrum of current signal around the 15th harmonic in two cases: faultless and faulty condition



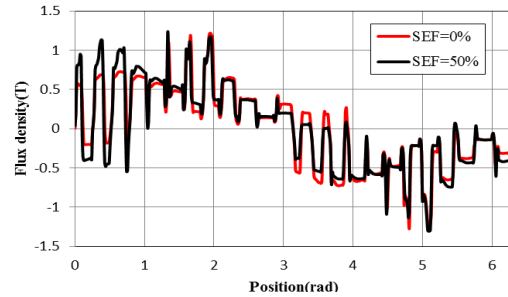
شکل (۹): تبدیل فوریه سیگنال جریان (فاز U) در دو حالت سالم و معیوب در اطراف هارمونیک ۱۷ ام

Fig. (9): Frequency spectrum of current signal around the 17th harmonic in two cases: faultless and faulty condition



شکل (۱۰): تبدیل فوریه سیگنال جریان (فاز U) در دو حالت سالم و معیوب در اطراف هارمونیک ۲۱ ام

Fig. (10): Frequency spectrum of current signal around the 21th harmonic in two cases: faultless and faulty condition



شکل (۶): چگالی شار فاصله هوایی محاسبه شده در مسیر دایروی به شعاع ۵۹/۷۵ میلی متر بر حسب موقعیت روتور

Fig. (6): Radial component of magnetic flux density at radius of 59.75 mm

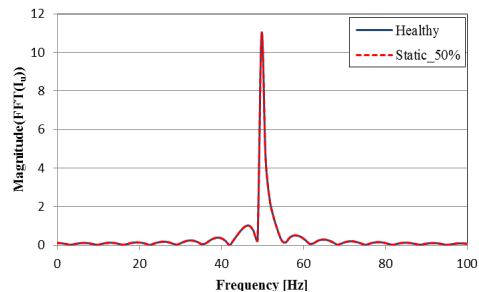
از آن جایی که کوچک شدن فاصله هوایی افزایش چگالی شار را به همراه دارد، با توجه به شکل (۶) دیده می شود که در موقعیت های صفر و π رادیان که به ترتیب متناظر با کمترین و بیشترین فاصله هوایی است، چگالی شار در حالت معیوب به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.

۶- تشخیص عیب ناهمراستایی استاتیک

تشخیص مبتنی بر تحلیل حالت دائمی سیگنال جریان

در حالتی که عیب ناهمراستایی وجود دارد علاوه بر مؤلفه اساسی مربوط به میدان فاصله هوایی، باندهای جانبی نشأت گرفته از هارمونیک های MMF و نفوذپذیری شیار روتور و استاتور، در طیف سیگنال جریان دیده می شوند. دامنه باندهای جانبی با نوع و درصد ناهمراستایی تغییر می کند. محاسبات میدانی نشان می دهند که باندهای جانبی در فرکانس های خاصی از سیگنال چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی رخ می دهند و به تعداد شیارهای روتور و استاتور، نوع و درصد ناهمراستایی بستگی دارند [۱۸].

برای بررسی تأثیر عیب ناهمراستایی استاتیک بر سیگنال جریان، ابتدا طیف فرکانسی سیگنال در اطراف فرکانس منبع (50 Hz) برای دو حالت سالم و معیوب (استاتیک ۵۰٪) مورد مطالعه قرار داده می شود. شکل (۷) مؤید تطبیق کامل طیف فرکانسی دو حالت سالم و معیوب در اطراف فرکانس اصلی است.



شکل (۷): تبدیل فوریه سیگنال جریان (فاز U) در دو حالت سالم و معیوب در اطراف هارمونیک اصلی

Fig. (7): Frequency spectrum of current signal around the source frequency (50 Hz) in two cases: faultless and faulty condition

شار می‌تواند روش مناسبی برای این حالت باشد. اما می‌بایست در نظر داشت که اندازه‌گیری شار مغناطیسی در عمل امکان‌پذیر نبوده و تنها در حالت شبیه‌سازی در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

۷- معرفی روش مبتنی بر سیم‌پیچ آزمایش

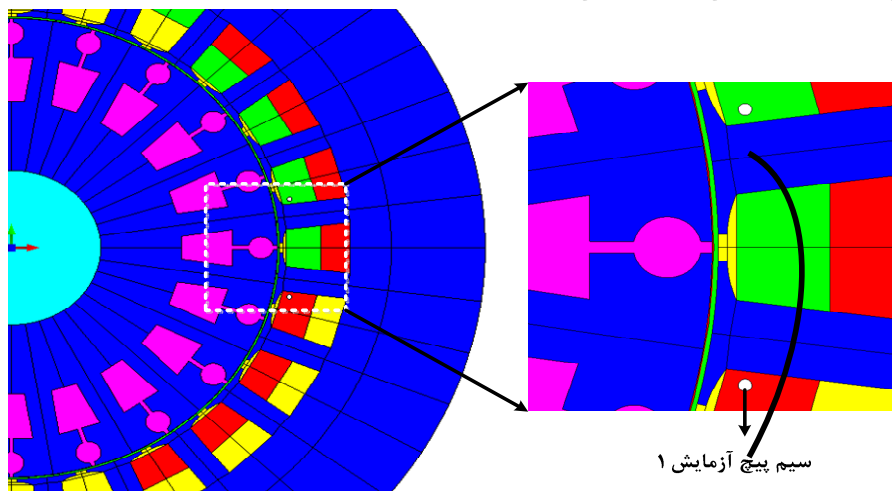
برای رفع مشکلات ناشی از استفاده از سیگنال جریان، روشی پیشنهاد می‌شود که در آن از دو سیم‌پیچ چند حلقه‌ای با مقاومت بسیار ناچیز به صورت مدار باز استفاده می‌شود که در دو طرف فاصله هوایی و در نزدیک‌ترین محل ممکن نصب می‌شوند تا تأثیرات شار مغناطیسی فاصله هوایی کاملاً بتواند به آن‌ها انتقال یابد. البته از آنجایی که در این روش از ولتاژ سیم‌پیچ‌ها برای تشخیص عیب استفاده می‌شود، اندازه‌گیری آن‌ها در عمل امکان‌پذیر خواهد بود.

در واقع در این روش با استفاده از تحلیل ولتاژ القا شده بر سیم‌پیچ‌های آزمایش کار گذاشته شده در اطراف فاصله هوایی به تشخیص عیب پرداخته می‌شود. در [۲۰، ۲۱] از همین روش برای تشخیص عیب ناهم‌راستایی در موتورهای الکتریکی شار محوری استفاده شده است.

شکل (۱۱) موقعیت سیم‌پیچ آزمایش شماره (۱) را نشان می‌دهد. سیم‌پیچ آزمایش دوم به همین صورت و به صورت کاملاً متقارن در سمت چپ روتور قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود سیم‌پیچ آزمایش در نزدیک‌ترین محل ممکن فاصله هوایی قرار گرفته است تا تغییرات شار مغناطیسی در این قسمت بیشترین تأثیر را بر روی ولتاژ این سیم‌پیچ‌ها داشته باشند و به خوبی بیانگر میزان تأثیرپذیری این ملاک تشخیص خطا باشد. سیم‌پیچ مورد استفاده برای این امر، از ۷ حلقه تشکیل شده است.

شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) کاملاً مؤید افزایش دامنه باند جانبی هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تأثیر عیب ناهم‌راستایی بر سیگنال جریان بسیار کم می‌باشد به گونه‌ای که تنها با تحلیل هارمونیک‌های مرتبه بالا می‌توان وقوع عیب را تشخیص داد. همچنین در این روش امکان تشخیص عیوب با درصد پایین وجود ندارد و نتایج فوق تنها برای عیب استاتیک ۵۰٪ ذکر شده‌اند. در حالت کلی، تحلیل سیگنال جریان دارای معایبی به شرح زیر است:

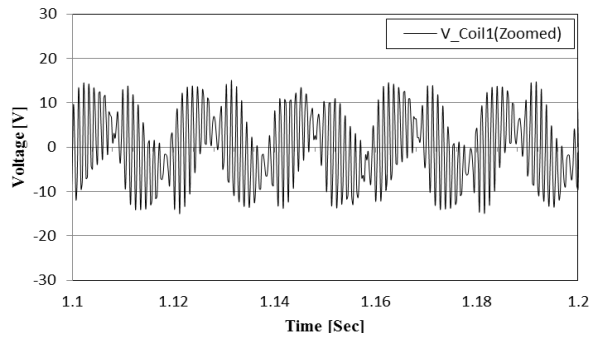
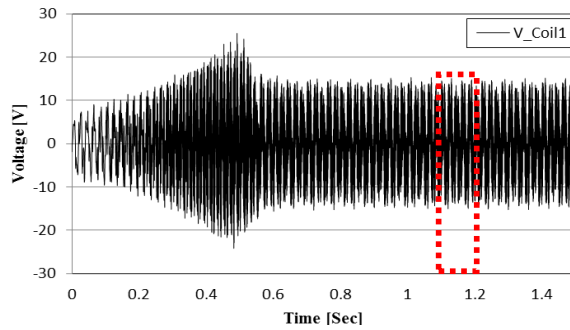
- برای تحلیل مولفه‌های فرکانس بالا لازم است سیگنال جریان فرکانس بالا نمونه‌برداری شود.
 - از آنجایی که هارمونیک‌های مرتبه بالای سیگنال جریان دامنه کوچکی دارند، مقایسه میان حالت سالم و معیوب در عمل و در حضور نویز اندازه‌گیری مشکل می‌شود.
 - تفکیک و تشخیص عیوب استاتیک و دینامیک از یکدیگر با استفاده از سیگنال جریان مستلزم دانش در مورد پارامترهایی از قبیل تعداد شیارهای روتور و استاتور، لغزش و ... است. بدین ترتیب با مشخص نبودن این پارامترها تنها می‌توان وقوع عیب را تشخیص داد.
 - از آنجایی که رخداد عیب ناهم‌راستایی یک حلقه افزایشی میان دامنه UMP و درصد ناهم‌راستایی ایجاد می‌کند، تشخیص عیوب با درصد پایین بسیار اهمیت دارد. درحالی‌که نتایج حاصل از تحلیل حالت دائم سیگنال جریان نشان می‌دهند برای عیوب با درصد پایین، مقایسه میان حالت سالم و معیوب بسیار مشکل می‌شود.
- برای اینکه بتوان بر این مشکلات فائق شد لازم است به دنبال روشی بود که از بین رفتن تقارن فاصله هوایی بتواند بیشترین نمود را داشته باشد. از آنجایی که با از بین رفتن تقارن فاصله هوایی، اولین مؤلفه‌ای که تأثیر مستقیم می‌پذیرد شار مغناطیسی این قسمت می‌باشد، تحلیل



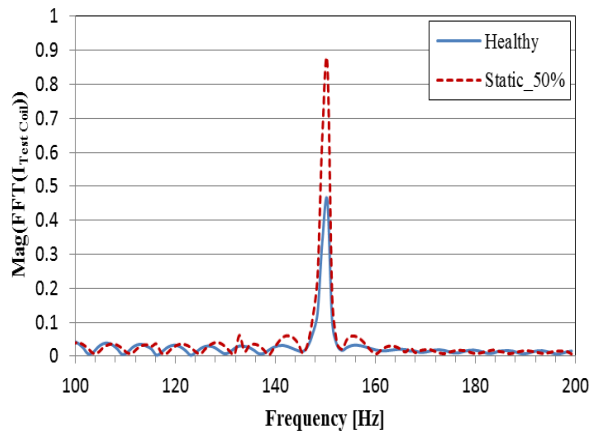
شکل (۱۱): موقعیت سیم‌پیچ آزمایش شماره (۱)

Fig. (11): Position of the test coil (1)

ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ آزمایش ۱ در حالت‌های گذرا و دائم در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): ولتاژ سیم‌پیچ‌های آزمایش ۱: ولتاژ در دو حالت گذرا و دائم (چپ)، ولتاژ در حالت دائم (راست)
 Fig. (12): Voltage of test coil (1): transient and steady state (left), steady state voltage (right)

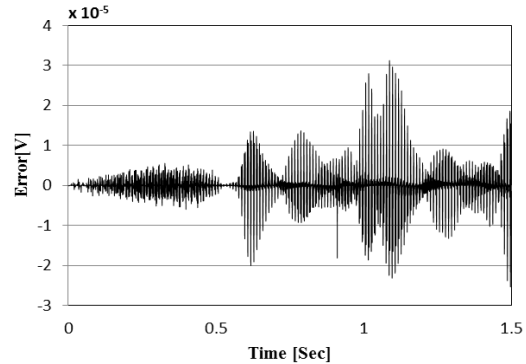


شکل (۱۴): تبدیل فوریه سیگنال ولتاژ در دو حالت سالم و عیب استاتیک (۵۰٪) در اطراف هارمونیک سوم

Fig. (14): Frequency spectrum of voltage signal around the 3rd harmonic in two cases: faultless and static eccentricity (50%)

موفقیت روش سیم‌پیچ آزمایش از شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به خوبی نمایان است. همان طور که ذکر شد در روش تحلیل حالت دائم سیگنال جریان، تشخیص عیب تنها از تحلیل هارمونیک‌های مرتبه بالاتر امکان‌پذیر بوده در حالیکه در روش تحلیل ولتاژ سیم‌پیچ‌های آزمایش، هارمونیک‌های مرتبه سوم، پنجم و هفتم به خوبی وقوع عیب را نشان می‌دهند که با توجه به دامنه بیشتر در این هارمونیک‌ها نسبت به هارمونیک‌های مراتب بالاتر، کار تشخیص عیب آسانتر و با خطای کمتر صورت می‌پذیرد.

در فرآیند تشخیص عیب با کمک سیگنال جریان، به دلیل همپوشانی حالت سالم و معیوب بر روی یکدیگر تنها حالت عیب استاتیک ۵۰٪ بررسی شد اما با کمک این روش به راحتی می‌توان عیوب با درجات پایین‌تر را هم بررسی نمود. برای نمونه شکل‌های (۱۶) و (۱۷) تبدیل فوریه سیگنال ولتاژ را برای حالت سالم و معیوب (استاتیک ۳۰٪) در اطراف هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم نشان می‌دهند و افزایش دامنه در این هارمونیک‌ها کاملاً بارز و مشخص است.



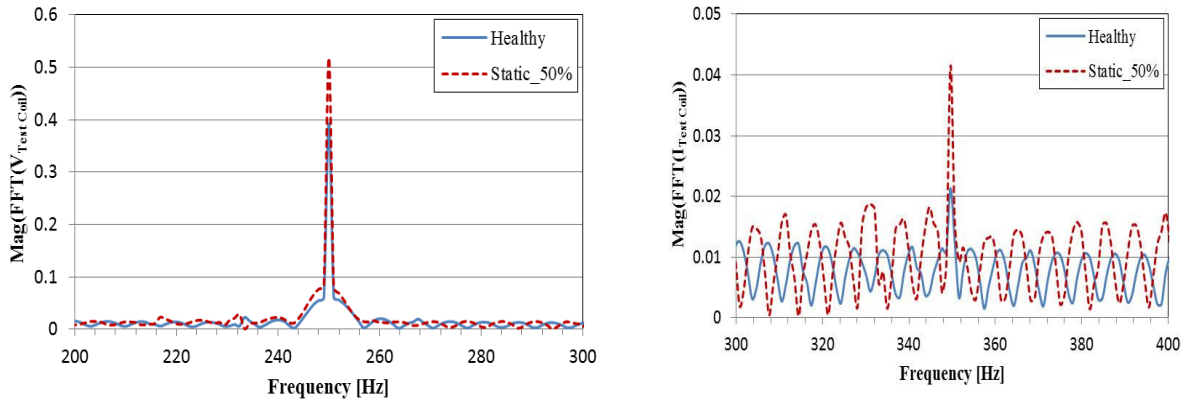
شکل (۱۳): اختلاف ولتاژ دو سیم‌پیچ آزمایش
 Fig. (13): Voltage difference of two test coils

از آن جایی که دو سیم‌پیچ آزمایش به صورت کاملاً متقارن در دو طرف روتور قرار گرفته‌اند، انتظار می‌رود که در حالت سالم، ولتاژ القا شده در آن‌ها با یکدیگر یکسان بوده و اختلافی میان آن‌ها وجود نداشته باشد. اختلاف ولتاژ القا شده در دو سیم‌پیچ آزمایش در شکل (۱۳) نشان داده شده است که این موضوع را تأیید می‌کند.

همان طور که شکل (۱۳) نشان می‌دهد اختلافی در حدود 10^{-5} وجود دارد که بسیار ناچیز است. از آن جایی که سیم‌پیچ آزمایش به صورت مدار باز کار گذاشته می‌شود، جریانی از آن عبور نمی‌کند. بنابراین وجود سیم‌پیچ آزمایش بر دینامیک موتور تأثیری نخواهد گذاشت.

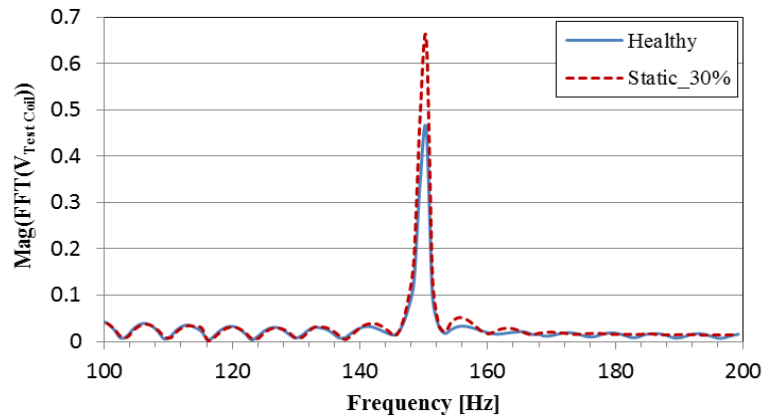
۸- تشخیص عیب ناهم‌راستایی استاتیک مبتنی بر سیم‌پیچ آزمایش

همان طور که برای تحلیل سیگنال جریان استاتور از روش تحلیل فوریه (FFT) استفاده می‌شود، برای تحلیل ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ‌های آزمایش نیز از همین روش استفاده خواهد شد و با مورد بررسی قرار دادن دامنه FFT سیگنال ولتاژ سیم‌پیچ آزمایش، به بررسی بروز عیب در موتور القایی پرداخته خواهد شد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) تبدیل فوریه ولتاژ سیم‌پیچ آزمایش (۱) را برای حالت سالم و معیوب (استاتیک ۵۰٪) در اطراف هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم نشان می‌دهند.



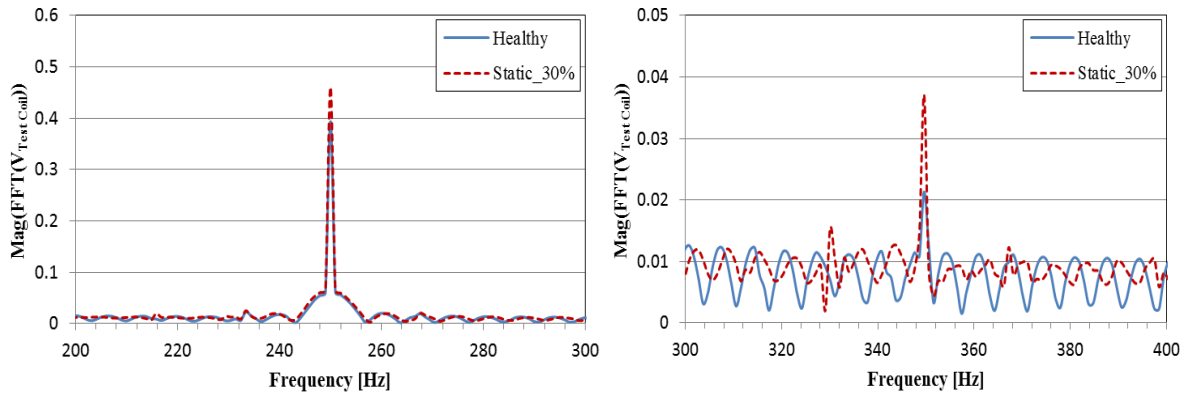
شکل (۱۵): تبدیل فوریه سیگنال ولتاژ در حالت سالم و عیب استاتیکی (۵۰٪) در اطراف هارمونیک‌های پنجم و هفتم

Fig. (15): Frequency spectrum of voltage signal around the 5th and 7th harmonic in two cases: faultless condition and static eccentricity of (50%)



شکل (۱۶): تبدیل فوریه سیگنال ولتاژ در دو حالت سالم و عیب استاتیکی (۳۰٪) در اطراف هارمونیک سوم

Fig. (16): Frequency spectrum of voltage signal around the 3th harmonic in two cases: faultless condition and static eccentricity of (30%)



شکل (۱۷): تبدیل فوریه سیگنال ولتاژ در دو حالت سالم و عیب استاتیکی (۳۰٪) در اطراف هارمونیک پنجم و هفتم

Fig. (17): Frequency spectrum of voltage signal around the 5th and 7th harmonic in two cases: faultless condition and static eccentricity of (30%)

حتی برای درجات پایین‌تر با استفاده از هارمونیک‌های مرتبه پایین‌تر به راحتی تشخیص داد.

شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به خوبی افزایش دامنه را در اطراف هارمونیک‌های مرتبه پایین نشان می‌دهند. بنابراین برخلاف روش تحلیل حالت دائمی سیگنال جریان می‌توان وقوع عیب استاتیکی را

۹- نتیجه گیری

این روش مقدر نمی‌باشد. برای رفع این مشکل از دو سیم پیچ آزمایش متقارن در اطراف فاصله هوایی استفاده شد و نشان داده شد که تغییرات فاصله هوایی ناشی از ناهم محوری به خوبی در سیگنال ولتاژ این کویل‌ها ظاهر می‌شود. همچنین به خاطر استفاده سیم پیچ‌ها در حالت مدار باز، این سیم پیچ‌ها بر دینامیک موتور تأثیری نمی‌گذارند و از طرفی نتایج نشان می‌دهند که تحلیل ولتاژ القا شده در آن‌ها می‌تواند وقوع عیب، نوع و درصد آن را به خوبی نشان دهد.

پی‌نوشت:**1- Radial Unbalanced Magnetic Pull**

در این مقاله به تشخیص عیب ناهم‌راستایی استاتیک در موتورهای القایی قفس سنجایی پرداخته شد. برای دستیابی به یک ملاک مناسب تشخیص خطا در این موتورها از روش اجزاء محدود که دقیق‌ترین روش در مدل‌سازی موتورهای الکتریکی است استفاده شده است و اعتبارسنجی روش ارائه شده نیز با مقایسه نتایج شبیه سازی و داده‌های عملی صورت پذیرفته است. در این مقاله نشان داده شده است که سیگنال جریان ملاک مناسبی برای تشخیص عیب ناهم‌راستایی نمی‌باشد زیرا تأثیرات خطای ناهم‌محوری، در هارمونیک‌های بالاتر جریان ظاهر می‌شوند و با توجه به دامنه کم تغییرات این هارمونیک‌ها، در عمل و در حضور نویز اندازه‌گیری، تشخیص عیب با

References

- [1] H.A. Toliyat, M.S. Arefeen, A.G. Parlos, "A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, 1996.
- [2] S. Balamurugan, R. Arumugam, S. Paramasivam, M. Malaiappan, "Transient analysis of induction motor using finite element analysis", *IEEE/ IECON*, Vol. 2, pp. 1526-1529, 2004.
- [3] N. Mehala, "Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis", Doctor of philosophy Thesis, Electrical Engineering, National Institute of Technology Kurukshetra, India, Oct. 2010.
- [4] M. El Hachemi Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 47, No. 5, pp. 984-993, 2000.
- [5] S. Nandi, H.A. Toliyat, L. Xiaodong, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review", *IEEE Trans. on Ene. Con.*, Vol. 20, No. 4, pp. 719-729, 2005.
- [6] J. Faiz, B.M. Ebrahimi, B. Akin, H.A. Toliyat, "Finite-element transient analysis of induction motors under mixed eccentricity fault", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 44, No. 1, pp. 66-74, 2008.
- [7] A. Nasiri, J. Poshtan, M.H. Kahaei, F. Taringoo, "A new scheme in model-based fault detection in three-phase induction motors", *IEEE/ ICM*, pp. 19-24, 2004.
- [8] J. Faiz, M. Ojaghi, "Different indexes for eccentricity faults diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motors: A review", *Mechatronics*, Vol. 19, No. 1, pp. 2-13, 2009.
- [9] A. J.E.a.S.J. Yang, "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines", *IEEE/IEEE*, Vol. 118, No. 1, pp. 930-933, 1971.
- [10] J.G.H.J. Penman, A.F. Stronach, "Protection strategy against the occurrence of faults in electrical machines", presented at the IEE Conf. Publ, 1980.
- [11] M.N.D.J. Penman, J.R. Smith, "A new approach to the protection of industrial drives", *IEEE/Presented at the IEEE Conf. Rec. Ind. Applicat. Annu. Meeting*, 1982.
- [12] W.T.T.J.R. Cameron, A.B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors", *IEE/EPE*, Vol. 133, No. 3, pp. 155-163, May 1986.
- [13] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*: Clarendon Press, 1993.
- [14] D.G. Dorrell, W.T. Thomson, 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 Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 33, No. 1, pp. 24-34, 1997.
- [15] H. Guldemir, "Detection of airgap eccentricity using line current spectrum of induction motors", *Elec. Pow. Sys. Res.*, Vol. 64, No. 2, pp. 109-117, 2003.
- [16] Y. Zhongming, W. Bin, A. Sadeghian, "Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition", *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 50, No. 6, pp. 1217-1228, 2003.
- [17] H. Hamidi, A.R. Nasiri, F. Nasiri, "Detection and isolation of mixed eccentricity in three phase induction motor via wavelet packet decomposition", *IEEE/ACC*, Vol. 2, , pp. 1371-1376, July 2004.
- [18] J. Faiz, B.M. Ebrahimi, B. Akin, H.A. Toliyat, "Dynamic analysis of mixed eccentricity signatures at various operating points and scrutiny of related indices for induction motors", *IET Elec. Pow. Appl.*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-16, 2010.
- [19] B.M. Ebrahimi, M. Etemadrezai, J. Faiz, "Dynamic eccentricity fault diagnosis in round rotor synchronous motors", *Ene. Con. and Man.*, Vol. 52, No. 5, pp. 2092-2097, 2011.

- [20] S.M. Mirimani, A. Vahedi, F. Marignetti, "Effect of inclined static eccentricity fault in single stator-single rotor axial flux permanent magnet machines", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 48, No. 1, pp. 143-149, 2012.
- [21] S.M. Mirimani, A. Vahedi, F. Marignetti, E. De Santis, "Static eccentricity fault detection in single-stator single-rotor axial-flux permanent-magnet machines", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1838-1845, 2012.
- [22] Flux2D User's Guide, Ver. 10.3.3, CEDRAT Group, Meylan, France, 2011.