

تشخیص عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتور القایی با استفاده از هارمونیک‌های توان لحظه‌ای

منصور اوجاچی^۱، دانشیار، ناصر یزدان‌دوست^۲، کارشناس ارشد، شهریار گل‌محمدزاده^۳، کارشناس ارشد

۱- دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - mojaghi@znu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - n.yazdandost@znu.ac.ir

۳- شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران - تهران - ایران - shahriar_1353@yahoo.com

چکیده: عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی اگر به موقع تشخیص داده شود می‌توان از آثار مخرب آن جلوگیری کرد. در این مقاله پس از توصیف عیب مذکور، فرکانس هارمونیک‌های ناشی از آن در شکل موج توان لحظه‌ای موتور القایی به روش تحلیلی تعیین می‌شود. سپس با استفاده از تابع فاصله هوایی مناسب، از روش تابع سیم‌پیچ برای شبیه‌سازی موتور القایی قفس سنجایی با عیب گردش روغن یاتاقان استفاده می‌گردد. ترسیم طیف فرکانس توان لحظه‌ای موتور با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، ایجاد هارمونیک‌های تعیین شده را تأیید می‌کند. این گونه هارمونیک‌ها در توان لحظه‌ای یک موتور القایی فعال بر خط لوله انتقال نفت نیز مشاهده می‌شوند که تحلیل ارتعاشات حاکی از وجود عیب گردش روغن در یاتاقان آن است. در خاتمه با توجه به بزرگی دامنه هارمونیک‌ها و حساسیت آن‌ها به نوع عیب، شدت عیب، سطح بار موتور و عدم تعادلی ولتاژهای سه فاز استاتور، مناسب‌ترین دامنه هارمونیک به عنوان شاخص عیب گردش روغن با استفاده از شبیه‌سازی انتخاب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: موتور القایی، یاتاقان لغزشی، عیب گردش روغن، هارمونیک‌های توان لحظه‌ای

Oil Whirl Fault Detection in Sleeve Bearing of Induction Motor by Using Instantaneous Power Harmonics

M. Ojaghi, Associate Professor¹, N. Yazdandoost², Msc, S. Gholmohammadzadeh³, Msc

1- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, mojaghi@znu.ac.ir

2- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, n.yazdandost@znu.ac.ir

3- I.O.P.T.C, Tehran, Iran, shahriar_1353@yahoo.com

Abstract: Harmful impacts of oil whirl fault in sleeve bearing can be avoided by early detection of the fault. In this paper, after describing the oil whirl fault, an analytic approach is applied to determine frequency of the harmonics produced by the fault in instantaneous power waveform of induction motor. Then, using appropriate air gap function, winding function approach is used for simulating squirrel cage induction motor with bearing oil whirl fault. The instantaneous power spectrum, plotted using simulation results, approves creation of the proposed harmonics. These harmonics are also evident in instantaneous power of an induction motor that operates on oil pipe line, where vibration analysis shows presence of oil whirl fault in its bearing. Finally, the most appropriate harmonic as the oil whirl fault index is selected using simulation by considering their relative amplitudes as well as their sensitivity to the fault type, fault degree, motor load level and three-phase unbalance of the stator voltages.

Keywords: Induction motor, sleeve bearing, oil whirl fault, instantaneous power harmonics.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۶/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۹/۲۱ و ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱/۲۹

نام نویسنده مسئول: منصور اوجاچی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، گروه برق

۱- مقدمه

موتور القایی قفس سنجابی اسب محرک صنعت محسوب می شود. این موتور به طور گسترده در گرم کن ها، کولرها، یخچال ها، پمپ ها، آسیاب ها، نوارهای نقاله و نظایر آن مورد استفاده قرار می گیرد و سادگی، ساختار مستحکم، نگهداری و تعمیرات آسان و صرفه اقتصادی را هم زمان در اختیار مصرف کننده قرار می دهد. به همین دلیل بیش از ۹۰ درصد موتورهایی که در صنایع دنیا استفاده می شوند، موتور القایی هستند [۱] و تکنیک های پایش وضعیت با هدف تشخیص معایب در مراحل ابتدایی و ممانعت از ایجاد آسیب جدی به صورت تصادفی در این نوع موتورها مورد توجه ویژه صنعت قرار دارد [۲]. انتشارات پژوهشی در خصوص تشخیص عیوب موتور القایی حاکی از آن است که عمده این تحقیقات به تشخیص عیوب الکتریکی متمرکز بوده اند، که شامل عیوب سیم پیچی استاتور و شکستگی میله های روتور می شود. در حالی که گزارش IEEE حاکی از آن است که در ماشین های دوار بالای ۲۰۰ اسب بخار، که در آن ها به دلیل هزینه و مشکلات تعمیرات اساسی و ضرر و زیان بالای ناشی از توقف تولید، بحث پایش وضعیت از اهمیت مضاعفی برخوردار است، ۱۸۵ مورد از ۳۸۰ ماشین معیوب (۴۸/۶ درصد) دچار عیب مکانیکی بوده اند و از این میان ۱۶۶ مورد (۴۳ درصد) به طور خاص عیب یاتاقان داشته اند [۳]. عیب یاتاقان پس از پیدایش اگر به موقع شناسایی و رفع نشود، به تدریج گسترش یافته و باعث ازکارافتادن ماشین می گردد. این اتفاق معمولاً به دلیل توقف خط تولید، ضایعات تولید و هزینه های سنگین تعمیرات اساسی، خسارت مالی قابل توجهی در پی دارد [۴].

خوردگی و آلودگی محیط مهم ترین عوامل به وجود آمدن عیوب یاتاقان هستند. موتورهای القایی معمولاً در شرایط سخت محیطی کار می کنند به گونه ای که نفوذ عواملی نظیر آب، اسید و رطوبت هوا موجب خرابی یاتاقان آن ها می شود. روغن کاری نامناسب و استرس مضاعف ناشی از ناهم محوری روتور با استاتور عوامل دیگر خرابی یاتاقان ها به حساب می آیند [۵].

یاتاقان های به کار رفته در موتورها به لحاظ ساختاری به دو دسته اصلی یاتاقان های غلتشی و یاتاقان های لغزشی (ژورنال) تقسیم می شوند. در موتورهای کوچک تر از ۲۰۰ اسب بخار معمولاً از یاتاقان های غلتشی استفاده می شود. در قدرت های بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ اسب بخار هر دو نوع یاتاقان غلتشی و لغزشی کاربرد دارد. برای قدرت های بالاتر صرفاً از یاتاقان های لغزشی استفاده می شود [۶]. عمده مراجع قبلی در خصوص تشخیص عیب یاتاقان در موتورهای القایی به یاتاقان های غلتشی اختصاص دارند و تعداد مراجع علمی در مورد تشخیص عیب یاتاقان های لغزشی انگشت شمار است.

اگر چه اخیراً تلاش هایی در جهت مدل سازی و شبیه سازی کامپیوتری موتور القایی با عیب یاتاقان گزارش شده [۷-۸]، ولی به دلیل پیچیدگی موضوع، هنوز استفاده از روش های شبیه سازی کامپیوتری در تحلیل عیب یاتاقان و طراحی روش های تشخیص آن

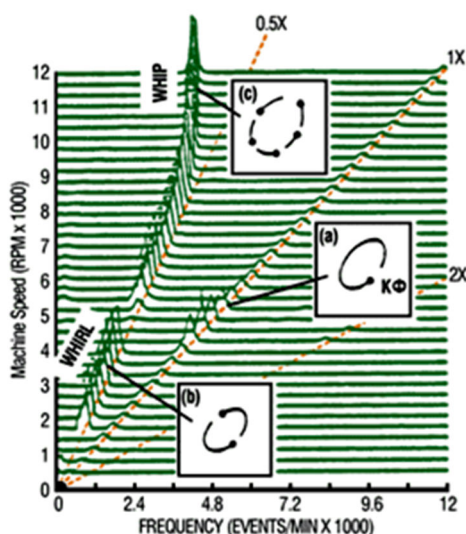
متداول نشده است. بنابراین اغلب مطالعات در خصوص تشخیص عیب یاتاقان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به انجام می رسد که انعطاف پذیری کمی دارد. به همین دلیل بسیاری از جنبه های مبحث تشخیص عیب یاتاقان، مانند عوامل جنبی تأثیرگذار بر شاخص های عیب و میزان تأثیر آن ها و نیز میزان تأثیر شدت عیب بر شاخص ها مجهول باقی مانده است.

عیب گردش روغن یکی از معایب محتمل برای یاتاقان لغزشی است که اگر به موقع تشخیص داده شود می توان از آثار مخرب آن جلوگیری کرد. در این مقاله ضمن تعریف عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی، روشی برای توصیف چگونگی ارتعاشات شفت و نوسانات فاصله هوایی بین روتور و استاتور موتورهای القایی در زمان بروز عیب مزبور ارائه می شود. سپس به روش تحلیلی، فرکانس هارمونیک های ناشی از عیب گردش روغن یاتاقان در شکل موج توان لحظه ای موتور القایی تعیین می شود. در ادامه با استفاده از تابع فاصله هوایی به دست آمده و روش تابع سیم پیچ، یک موتور القایی واقعی فعال بر خط لوله انتقال نفت با عیب گردش روغن یاتاقان مدل سازی و شبیه سازی می شود و طیف فرکانس توان لحظه ای آن تعیین می گردد که حاکی از ظهور هارمونیک های تعیین شده به روش تحلیلی است. این هارمونیک ها بر روی طیف فرکانس توان لحظه ای حاصل از نمونه برداری عملی از این موتور القایی واقعی نیز مشاهده می شوند که آنالیز ارتعاشات حاکی از وجود عیب گردش روغن در یاتاقان آن است. دامنه هر کدام از این هارمونیک های توان لحظه ای می تواند به عنوان شاخص عیب گردش روغن مطرح شود. در ادامه با توجه به بزرگی دامنه هارمونیک ها و با بررسی حساسیت این دامنه به نوع و شدت عیب، سطح بار موتور و میزان عدم تعادلی ولتاژهای سه فاز استاتور از طریق شبیه سازی موتور مورد نظر، مناسب ترین هارمونیک به عنوان شاخص عیب گردش روغن انتخاب می شود. به دلیل تشابه ساختمان فیزیکی، انتظار می رود شاخص انتخاب شده در سایر موتورهای القایی هم قابل استفاده باشد. در غیر این صورت می توان به همین روش شاخص مناسب را برای هر موتور دیگر تعیین کرد.

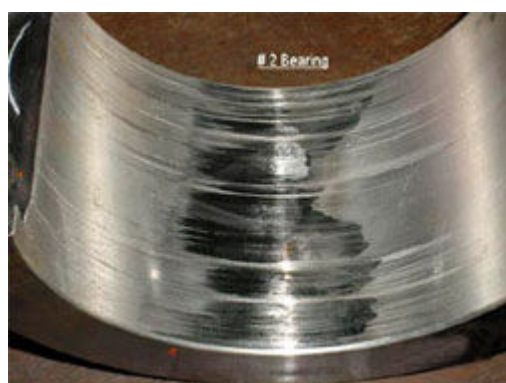
۲- یاتاقان ژورنال و پدیده های مخرب در آن

یاتاقان وسیله است که باری را بین دو جزء تحمل می کند. یاتاقان لغزشی باید این وظیفه را در حالی انجام دهد که شفت در داخل آن می چرخد و در این حال باید سایش بین قطعات را به حداقل برساند. این نوع یاتاقان علی رغم هزینه کم، ظرفیت بالایی برای تحمل بار دارد. در ساده ترین شکل، این یاتاقان یک سیلندر ساده با لقی معین نسبت به شفت است که این لقی با یک لایه روغن تحت فشار پر می شود. به دلیل نیروی وزن، مرکز شفت از مرکز یاتاقان در جهت زاویه قائم (روبه پایین) فاصله می گیرد و ضخامت لایه روغن حول شفت مانند فاصله هوایی حول روتور در موتور القایی با ناهم محوری استاتیکی، غیریکنواخت می شود. با گردش شفت، زاویه انحراف دو مرکز در جهت چرخش شفت

آسیب جدی نماید. شکل ۲ نمونه‌ای از یاتاقان لغزشی تخریب‌شده در اثر عیب گردش روغن را نشان می‌دهد. بنابراین پایش وضعیت موتور القایی جهت تشخیص بروز عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی حائز اهمیت است.



شکل ۱: a- ارتعاش سنکرون، b- ارتعاش ناشی از عیب گردش روغن، c- ارتعاش ناشی از عیب شلاق روغن [۱۰]



شکل ۲: تخریب یاتاقان لغزشی تحت تأثیر عیب گردش روغن

۳- تابع فاصله هوایی در شرایط گردش روغن

برای تبیین رفتار فاصله هوایی در موتور القایی در زمان بروز پدیده گردش روغن از اندازه‌گیری‌های دقیق ارتعاش شفت که در مرجع [۱۱] ارائه شده، استفاده می‌شود. شکل ۳ نتایج این اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود طیف ارتعاش شفت موتور در هر دو راستای افقی و عمودی شامل دو فرکانس عمده است: فرکانس ۱X که معادل سرعت کار شفت بوده و ناشی از ناهم‌محوری دینامیکی ذاتی می‌تواند باشد و فرکانس ۰/۴۷X که معادل ۴۷ درصد سرعت کار شفت بوده و نشان‌دهنده ارتعاش ناشی از عیب گردش روغن است.

در اثر ناهم‌محوری دینامیکی مرکز شفت حول مرکز یاتاقان (مرکز استاتور) مسیر دایره شکل را با همان سرعت کار روتور طی می‌کند. این امر با دامنه یکسان فرکانس ۱X در جهت‌های عمودی و افقی در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب تأیید می‌شود. اما در این شکل‌ها دامنه مؤلفه

قدری جابه‌جا می‌شود. به‌طور ایده‌آل باید لایه روغن با نصف سرعت شفت (۰/۵X) حول آن گردش نماید، اما در عمل به دلیل اصطکاک، سرعت گردش لایه روغن بین ۰/۴۸X-۰/۴۲X است [۹].

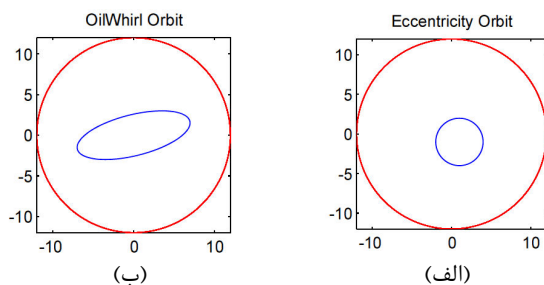
اگر فشار لایه روغن خیلی بیش‌تر از مقداری باشد که برای ثابت نگه‌داشتن شفت درون یاتاقان لازم است، فاصله مرکز شفت از مرکز یاتاقان کاهش یافته و مرکز شفت به مرکز یاتاقان نزدیک می‌شود. در این شرایط فشار لایه روغن می‌تواند شفت را به زاویه دیگری هدایت کند. این پروسه تداوم یافته و لذا شفت در داخل یاتاقان به‌طور مرتب به اطراف هل داده شده و دچار ارتعاش می‌شود. این پدیده ذاتاً ناپایدار بوده از آن به‌عنوان عیب گردش روغن (Oil whirl) یاد می‌شود [۹].

اگر سرعت شفت افزایش یافته و به حدود دو برابر اولین سرعت بحرانی ماشین برسد، فرکانس گردش روغن با اولین سرعت بحرانی ماشین تلاقی می‌کند. در این حالت ارتعاش شدیدتری با فرکانس ثابت معادل با اولین سرعت بحرانی ماشین پدید می‌آید که به پدیده شلاق روغن (Oil whip) معروف است [۱۰]. شکل ۱ برای نشان دادن ویژگی پدیده‌های گردش روغن و شلاق روغن ترسیم شده است. در این شکل محور افقی فرکانس ارتعاش شفت به سیکل بر دقیقه (cpm) و محور عمودی سرعت کار شفت به دور بر دقیقه (rpm) است. برجستگی‌های روی شکل که در امتداد خطوط افقی سبز رنگ مشاهده می‌شوند، نشان‌دهنده محتوای فرکانسی سیگنال ارتعاش شفت در سرعت کار متناظر با خط افقی مربوطه می‌باشند. این برجستگی‌ها حول خط اوریب ۱X نشان‌دهنده ارتعاش با فرکانس برابر با سرعت کار شفت است که به آن ارتعاش سنکرون می‌گویند. برجستگی‌ها در مجاورت خط اوریب ۰/۵X نشان‌دهنده ارتعاش با فرکانس نزدیک به نصف سرعت کار شفت هستند که ناشی از عیب گردش روغن است [۱۰].

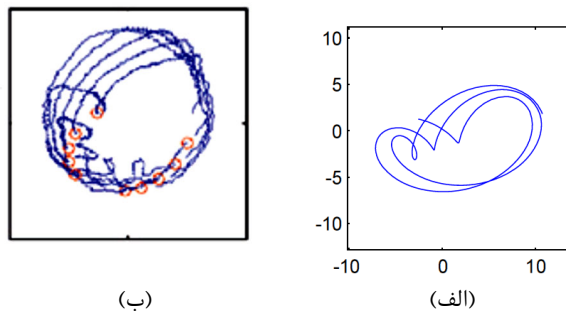
دقت در شکل ۱ حاکی از این است که با افزایش سرعت شفت از صفر، ابتدا فقط ارتعاش سنکرون (ارتعاش با فرکانس معادل با سرعت شفت) حول خط ۱X پدید می‌آید که ناشی از عدم تعادل بار و یا ناهم‌محوری است. با افزایش بیش‌تر سرعت، ارتعاش در مجاورت خط ۰/۵X با دامنه شدیدتر نیز شروع می‌شود که به دلیل پدیده گردش روغن است. دامنه این مؤلفه ارتعاش می‌تواند به حدی بالا باشد که کار ماشین را کاملاً نامطلوب جلوه دهد. با تداوم افزایش سرعت شفت و رسیدن به اولین سرعت بحرانی ماشین، افزایش قابل‌توجهی در دامنه ارتعاش حول خط ۱X مشاهده می‌شود و با عبور از این سرعت بحرانی، دامنه ارتعاش مذکور به حالت عادی برمی‌گردد. در سرعت‌های بالاتر، فرکانس ارتعاش زیرسنکرون از محدوده خط ۰/۵X منحرف شده و به فرکانس ثابتی که معادل با اولین سرعت بحرانی شفت است، مبدل می‌شود که به آن پدیده شلاق روغن می‌گویند. دامنه این ارتعاش کاملاً شدید است و لذا کار کردن ماشین با عیب شلاق روغن در یاتاقان لغزشی پرخطر بوده و باید از آن ممانعت به عمل آید [۱۰].

پدیده گردش روغن در صورت تداوم، به‌ویژه اگر دامنه ارتعاش فراتر از ۵۰ درصد لقی یاتاقان برود، ممکن است سطح داخلی یاتاقان را دچار

است. به این معنی که مرکز شفت تا مرز این دایره قرمز امکان جابجایی دارد. مسیرهای بسته آبی رنگ نقاط موقعیت مرکز شفت حین چرخش آن را نشان می‌دهند. در شکل ۴-الف این مسیر با مؤلفه‌های ناهم‌محوری بدون گردش روغن ($OW_x = OW_y = 0$) و در شکل ۴-ب مسیر مزبور با گردش روغن بدون مؤلفه‌های ناهم‌محوری ($SE_x = SE_y = DE = 0$) ترسیم شده است. عبارت $\pi/6$ در رابطه ۱ باعث کج شدن بیضی مسیر گردش مرکز شفت در شکل ۴-ب می‌شود و برای انطباق با نتایج عملی در نظر گرفته شده است [۱۱]. اضافه شدن این عبارت تأثیری در نتایج بعدی مقاله در خصوص تشخیص عیب گردش روغن ندارد. در صورت وجود ناهم‌محوری ذاتی همراه با گردش روغن، برای مسیر گردش مرکز شفت فرم خاصی مانند شکل ۵-الف پدید می‌آید. شکل ۵-ب هم نتایج مشابه حاصل از اندازه‌گیری عملی را ارائه می‌دهد [۱۱]. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج محاسبات قابل مقایسه با نتایج اندازه‌گیری عملی است.



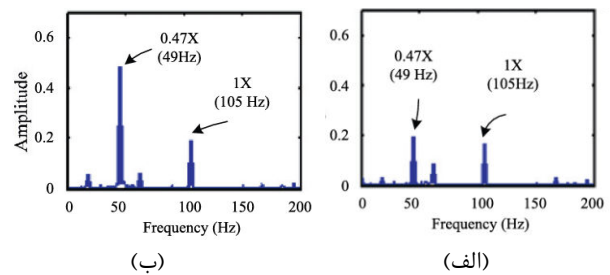
شکل ۴: نتیجه محاسبه موقعیت مرکز شفت با گردش آن؛ الف- با ناهم‌محوری و بدون گردش روغن، ب- با گردش روغن بدون ناهم‌محوری



شکل ۵: مسیر حرکت مرکز شفت با وجود ناهم‌محوری و گردش روغن به صورت هم‌زمان؛ الف- نتایج محاسبه، ب- نتایج عملی [۱۱]

۴- هارمونیک‌های توان لحظه‌ای در اثر عیب گردش روغن

از هارمونیک‌های توان لحظه‌ای در مراجع مختلف به‌عنوان شاخص برای آشکارسازی انواع عیب موتورهای القایی استفاده شده است [۱۳-۱۶]. عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی هم می‌تواند باعث ایجاد هارمونیک‌هایی با فرکانس معین در شکل موج توان لحظه‌ای ماشین شود. در این بخش فرکانس این هارمونیک‌ها به روش تحلیلی تعیین می‌شود. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد عیب گردش روغن باعث ارتعاش شفت داخل یاتاقان و در نتیجه نوسان سرعت آن می‌شود. با استفاده از بسط فوری می‌توان سرعت لحظه‌ای شفت را مانند رابطه ۶



شکل ۳: طیف فرکانسی ارتعاش شفت؛ الف- در جهت عمودی و ب- در جهت افقی [۱۱]

فرکانس $0.47X$ در جهت افقی بسیار بزرگ‌تر از دامنه آن در جهت عمودی است که به معنی گردش مرکز شفت حول مرکز یاتاقان در یک مسیر بیضی در اثر عیب گردش روغن است.

در حالت عمومی با فرض وجود مؤلفه‌های ناهم‌محوری ذاتی استاتیکی و دینامیکی همراه با عیب گردش روغن، می‌توان مختصات مرکز شفت را نسبت به مرکز یاتاقان از روابط زیر تعیین کرد:

$$C_x(\theta_r) = SE_x + DE \cos(\theta_r) + OW_x \cos(\theta_r OWF + \pi/6) \quad (1)$$

$$C_y(\theta_r) = SE_y + DE \sin(\theta_r) + OW_y \sin(\theta_r OWF) \quad (2)$$

در این روابط C_x و C_y مختصات مرکز شفت نسبت به مرکز یاتاقان، SE_x و SE_y دامنه ناهم‌محوری استاتیکی در محورهای x و y ، DE دامنه ناهم‌محوری دینامیکی، OW_x و OW_y دامنه ارتعاش ناشی از گردش روغن در محورهای x و y ، θ_r زاویه موقعیت روتور و OWF ضریب فرکانس گردش روغن است که ممکن است عددی بین 0.42 تا 0.48 باشد. پس از تعیین مختصات مرکز شفت، از روابط زیر برای تعیین تابع فاصله هوایی استفاده می‌گردد.

$$R_c = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad (3)$$

$$\theta_c = \tan^{-1}(C_y / C_x) \quad (4)$$

$$g(\theta_s, \theta_r) = g_0 - R_c \cos(\theta_s - \theta_c) \quad (5)$$

که در آن R_c فاصله مرکز شفت از مرکز استاتور (یاتاقان)، θ_c زاویه موقعیت مرکز شفت، θ_s زاویه نقاط در مرجع ثابت استاتور، $g(\theta_s, \theta_r)$ تابع فاصله هوایی در نقاط مختلف استاتور که به موقعیت روتور هم بستگی دارد و g_0 فاصله هوایی مؤثر در موتور القایی سالم است. اگرچه مطابق تجربه قبلی مؤلفین، امکان اعمال اثر شیارها و اشباع دندانه‌های روتور و استاتور در تابع فاصله هوایی وجود دارد [۱۲]، اما با توجه به تمایز فرکانس هارمونیک‌های ناشی از شیارها در شکل موج جریان و توان لحظه‌ای موتور و برای حفظ سادگی، در رابطه ۵ از اثر شیارهای روتور و استاتور صرف‌نظر شده است. با این حال میانگین اثر شیارها و اشباع دندانه‌ها با استفاده از مفهوم فاصله هوایی مؤثر در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۴ نتایج حاصل از محاسبه روابط ۱ تا ۴ را نشان می‌دهد. در این شکل دایره قرمز رنگ نشان‌دهنده لقی موجود بین شفت و یاتاقان

رابطه ۱۲ مقدار متوسط شکل موج توان لحظه‌ای را نشان می‌دهد که همان توان حقیقی جذب‌شده توسط موتور القایی در هر فاز است. رابطه ۱۳ یک مؤلفه توان لحظه‌ای با فرکانس $2f_s$ را نشان می‌دهد. دو مؤلفه توان مذکور در ماشین سالم هم وجود دارند. اما رابطه ۱۴ حاکی از پدید آمدن هارمونیک‌هایی با فرکانس kf_c و رابطه ۱۵ حاکی از پدید آمدن هارمونیک‌هایی با فرکانس $|2f_s \pm kf_c|$ در شکل موج توان لحظه‌ای است که در اثر نوسان سرعت ناشی از عیب گردش روغن پدید آمده و می‌توانند به‌عنوان شاخص عیب مذکور در نظر گرفته شوند. دامنه این هارمونیک‌ها متناسب با M_k یعنی دامنه مؤلفه k بسط فوریه سرعت شفت است. بنابراین هرچه عیب گردش روغن شدیدتر و دامنه نوسان سرعت شفت ناشی از آن بیش‌تر باشد، دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای ناشی از آن در حالت عمومی بزرگ‌تر خواهد بود.

۵- شبیه‌سازی موتور القایی با عیب گردش روغن

یکی از روش‌های کارآمد در تحلیل عملکرد موتورهای القایی، به‌ویژه در شرایط عیب، با استفاده از نظریه تابع سیم‌پیچ حاصل می‌شود. این نظریه نخستین بار برای محاسبه اندوکتانس‌های مغناطیسی موتور القایی ارائه شد. قابلیت اساسی این نظریه محاسبه اندوکتانس‌های موتور با توزیع واقعی سیم‌بندی استاتور و روتور و توزیع واقعی فاصله هوایی است که مطالعات متعدد در زمینه تحلیل ماشین‌های الکتریکی را با استفاده از آن موجب شده است. برای این منظور پس از محاسبه اندوکتانس‌های موتور، از آن‌ها در تشکیل و حل معادلات ولتاژ و حرکت دینامیکی استفاده می‌شود. هرچه توزیع سیم‌بندی و شکل فاصله هوایی دقیق‌تر در نظر گرفته شود، دقت محاسبات افزایش یافته و نتایج شبیه‌سازی به نتایج عملی نزدیک‌تر می‌شود [۱۸].

اگرچه مدل تابع سیم‌پیچ برای موتور القایی قفس سنجابی با معادلات دیفرانسیل ساده‌ای بیان می‌شود، ولی به دلیل تعداد زیاد این معادلات (یک معادله مکانیکی، سه معادله ولتاژ برای سه فاز استاتور به‌اضافه معادلات ولتاژ مش‌های روتور به تعداد میله‌های قفسه روتور)، وابستگی بسیاری از اندوکتانس‌های خودی و متقابل به موقعیت روتور به‌ویژه در شرایط عیب و عدم وجود نرم‌افزار ویژه، مثل نرم‌افزارهایی که برای روش اجزاء محدود وجود دارد، حل عددی آن‌ها به‌سادگی میسر نبوده نیازمند برنامه‌نویسی کامل و دقیق است. دقت و فایده مدل تابع سیم‌پیچ در شبیه‌سازی ماشین‌های الکتریکی معیوب برای اهداف پایش وضعیت و تشخیص عیب در مراجع مختلف به اثبات رسیده و لذا محققین بسیاری از این روش بهره برده و می‌برند.

در این مقاله هم برای شبیه‌سازی موتور القایی از روش تابع سیم‌پیچ استفاده می‌شود. معادلات دینامیکی موتور القایی برای شبیه‌سازی به روش تابع سیم‌پیچ در مراجع مختلف ارائه شده است [۸]. مهم‌ترین پارامترهای این معادلات اندوکتانس‌های خودی و متقابل مدارهای استاتور و روتور است. مطابق نظریه تابع سیم‌پیچ اصلاح‌شده، اندوکتانس‌های مذکور از رابطه انتگرالی زیر به دست می‌آیند [۱۹]:

به‌صورت مجموع سرعت متوسط و یک سری اجزاء سرعت نوسانی نوشت [۱۷].

$$n_m(t) = N_m \left[1 + \sum_k M_k \sin(2\pi k f_c t) \right] \quad (6)$$

که در آن N_m سرعت متوسط شفت برحسب دور بر دقیقه، M_k ضریب دامنه مؤلفه k بسط فوریه سرعت شفت و f_c فرکانس اصلی نوسان سرعت شفت است. مطابق مباحث گذشته، در شرایط عیب گردش روغن $f_c = OWF \times f_m$ می‌شود که در آن f_m همان سرعت متوسط شفت برحسب دور بر ثانیه است.

حین کار پایدار با لغزش کم، مقاومت شاخه روتور در مدار معادل موتور القایی به‌قدری است که با تقریب می‌توان مدار معادل را در حد همان مقاومت شاخه روتور ساده کرد [۱۷]. نوسان سرعت روتور در اثر عیب گردش روغن یاتاقان باعث نوسان لغزش و درنتیجه نوسان مقدار مقاومت شاخه روتور می‌شود. با فرض اتصال استاتور به منبع ولتاژ سینوسی، ولتاژ فاز آن را با رابطه زیر می‌توان توصیف کرد:

$$v(t) = V \cos(2\pi f_s t) \quad (7)$$

که در آن V دامنه ولتاژ فاز تغذیه و f_s فرکانس آن است. حال با استفاده از مدار معادل تقریبی ذکرشده، برای توان لحظه‌ای موتور القایی در هر فاز می‌توان رابطه ۸ را نوشت.

$$p(t) = \frac{v(t)^2}{R_r/s} = \frac{v(t)^2}{R_r} s \quad (8)$$

در این رابطه s همان لغزش است که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$s = \frac{N_s - n_m(t)}{N_s} \quad (9)$$

که در آن N_s سرعت سنکرون است. با قرار دادن از رابطه ۶ در رابطه ۹ و سپس قرار دادن از روابط ۷ و ۹ در رابطه ۸ و انجام بعضی عملیات ریاضی نتیجه زیر حاصل می‌گردد:

$$p(t) = \frac{V^2}{2R_r} [1 + \cos(4\pi f_s t)] \left[\frac{N_s - N_m}{N_s} - \frac{N_m}{N_s} \sum_k M_k \sin(2\pi k f_c t) \right] \quad (10)$$

با استفاده از رابطه ۱۰ توان لحظه‌ای بر فاز موتور را می‌توان حاصل مجموع چهار مؤلفه به شرح زیر نوشت:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) \quad (11)$$

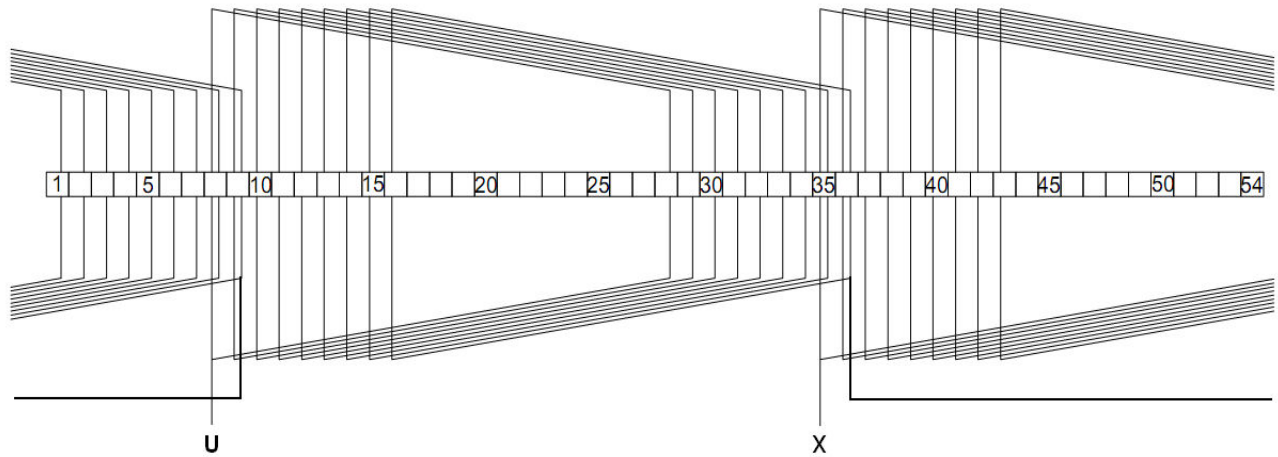
که در آن:

$$p_1(t) = \frac{V^2}{2R_r} \cdot \frac{N_s - N_m}{N_s} \quad (12)$$

$$p_2(t) = \frac{V^2}{2R_r} \cdot \frac{N_s - N_m}{N_s} \cos(4\pi f_s t) \quad (13)$$

$$p_3(t) = -\frac{V^2}{2R_r} \cdot \frac{N_m}{N_s} \sum_k M_k \sin(2\pi k f_c t) \quad (14)$$

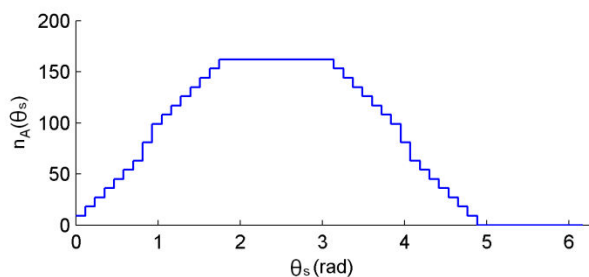
$$p_4(t) = -\frac{V^2}{2R_r} \cdot \frac{N_m}{N_s} \cos(4\pi f_s t) \sum_k M_k \sin(2\pi k f_c t) \quad (15)$$



شکل ۶: طرح سیم‌پیچی یک فاز استاتور در موتور القایی مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات کامل موتور القایی واقعی شبیه‌سازی شده

نام کمیت	مشخصات یا مقدار کمیت
قدرت نامی	۵۱۰ kW
ولتاژ نامی	۶۰۰۰ V
فرکانس نامی	۵۰ Hz
تعداد فاز و نوع اتصال	سه فاز - ستاره
تعداد قطب	۲
جریان نامی	۵۹ A
ضریب قدرت نامی	۰/۸۹
طول هسته روتور و استاتور	۳۹۸ mm
قطر هسته روتور	۴۲۰ mm
تعداد شیار استاتور	۵۴
تعداد میله‌های روتور	۴۶
طول فاصله هوایی مؤثر	۱/۹۵ mm
تعداد حلقه در هر کلاف استاتور	۹ حلقه
مقاومت اهمی سیم‌پیچی استاتور در هر فاز	۰/۱۸ Ω
مقاومت اهمی هر میله روتور	۴۸ μΩ
مقاومت اهمی هر قطعه حلقه انتهایی	۴/۲ μΩ
اندوکتانس نشتی استاتور	۳ mH
اندوکتانس نشتی هر میله روتور	۵ nH
اندوکتانس نشتی هر قطعه حلقه انتهایی	۲ nH
اینرسی روتور	۳۹/۳۶ kg.m²
زاویه تورب میله‌های روتور	۰



شکل ۷: تابع دور سیم‌پیچی فاز A استاتور

$$L_{BA} = \mu_o . r . l \int_0^{2\pi} \frac{N_A(\theta_s) . n_B(\theta_s)}{g(\theta_s, \theta_r)} d\theta_s \quad (۱۶)$$

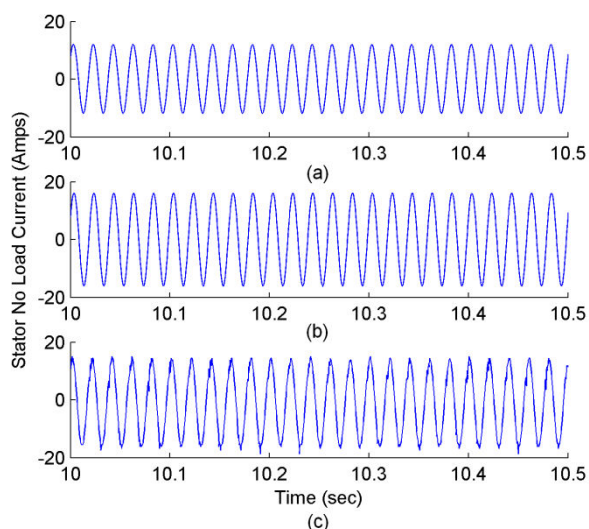
در این رابطه L_{BA} اندوکتانس متقابل بین مدارهای A و B ، μ_o پرماییلیتی هوا، r شعاع متوسط فاصله هوایی، l طول هسته، $N_A(\theta_s)$ تابع سیم‌پیچ اصلاح شده مدار A و $n_B(\theta_s)$ تابع دور مدار B است.

موتور القایی مورد مطالعه در این مقاله یک موتور واقعی فعال بر روی خط لوله انتقال نفت و از نوع قفس سنجابی با مقادیر نامی ۵۱۰ کیلووات، ۶ کیلوولت، ۲ قطب، سه فاز و ۵۰ هرتز است. مشخصات فنی کامل این موتور در جدول ۱ ارائه شده است. همان گونه که سطر آخر جدول نشان می‌دهد، میله‌های روتور در این موتور فاقد تورب است. با توجه به وجود تعداد ۶ موتور القایی از این نوع در خطوط انتقال نفت مجاور هم، کمیت‌های ابعادی استاتور و روتور و ابعاد شمش‌های مسی که به عنوان میله و حلقه انتهایی روتور به کار رفته‌اند، در زمان دمونتاژ یکی از موتورها برای تعمیر، اندازه‌گیری شد. مقاومت اهمی هر میله روتور و هر قطعه از حلقه انتهایی که بین میله‌های مجاور هم قرار دارد، با استفاده از مقاومت مخصوص مس و کمیت‌های ابعادی اندازه‌گیری شده، محاسبه گردید. اما محاسبه اندوکتانس‌های نشتی میله‌ها و حلقه‌های انتهایی به سادگی میسر نیست و لذا از مقادیر نوعی که در مراجع مختلف برای این اندوکتانس‌ها استفاده می‌شود، در این مقاله نیز استفاده شده است.

استاتور این موتور با ۵۴ شیار حاوی سیم‌پیچ سه فاز دوطبقه با گام کسری است. شکل ۶ طرح سیم‌پیچی یک فاز استاتور را برای این موتور نشان می‌دهد. با توجه به طرح سیم‌پیچی شکل ۶، تابع دور فاز A (فاز U-X) استاتور به صورت شکل ۷ ترسیم می‌شود. با انتقال دادن طرح سیم‌پیچ شکل ۶ به میزان ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه به سمت راست به ترتیب طرح سیم‌پیچی فازهای B و C استاتور به دست می‌آید. به همین ترتیب تابع دور فازهای B و C استاتور با انتقال دادن تابع دور شکل ۷ به میزان ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه به سمت راست حاصل می‌گردد.

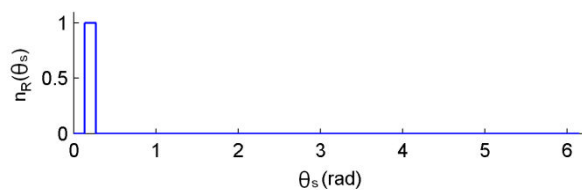
بعضی اندوکتانس‌های متقابل بین مش‌های روتور و فاز A استاتور را در پی دارد.

با شبیه‌سازی عملکرد موتور القایی سالم در بی‌باری، ملاحظه شد که جریان حالت پایدار استاتور بسیار کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده روی موتور واقعی است. دلیل این امر بالا بودن راکتانس مغناطیس کننده به دلیل عدم احتساب اثر شکستگی شار در لبه دندانه‌ها و نیز عدم احتساب اثر رلوکتانس هسته روتور و استاتور است. دو اثر مذکور با استفاده از مفهوم فاصله هوایی مؤثر که قدری بزرگ‌تر از فاصله هوایی مکانیکی است، قابل احتساب است [۲۰]. شبیه‌سازی‌های متعدد با افزایش تدریجی طول فاصله هوایی نشان داد که به ازای فاصله هوایی مؤثر معادل با ۱/۹۵ برابر طول فاصله هوایی مکانیکی، انطباق لازم بین جریان‌های بی‌باری حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی برقرار می‌گردد. شکل ۱۰ جریان بی‌باری حاصل از شبیه‌سازی را به ازای فاصله هوایی مکانیکی و فاصله هوایی مؤثر در کنار شکل موج مشابه حاصل از اندازه‌گیری روی موتور واقعی نشان می‌دهد.

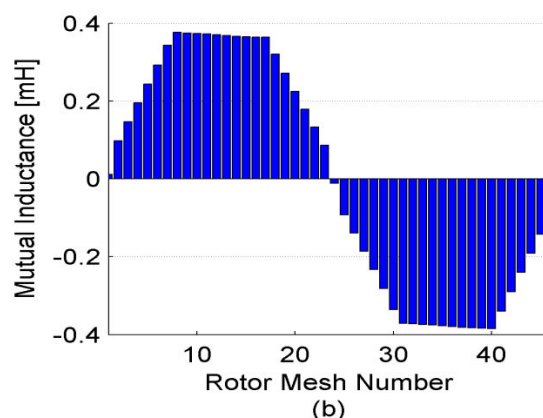
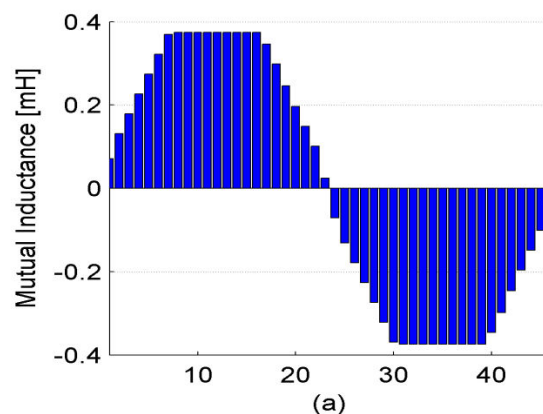


شکل ۱۰: شکل موج جریان بی‌باری حاصل از: a- شبیه‌سازی به ازای فاصله هوایی مکانیکی، b- شبیه‌سازی به ازای فاصله هوایی مؤثر و c- اندازه‌گیری روی موتور واقعی

شکل ۱۱ طیف فرکانس نرمالیزه توان لحظه‌ای موتور القایی را در شرایط سالم و عیب گردش روغن نشان می‌دهد که از شبیه‌سازی حاصل شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود عیب گردش روغن باعث ظهور هارمونیک‌های تعیین‌شده در بخش ۴ مقاله شده است. شکل ۱۲ نیز طیف فرکانس نرمالیزه توان لحظه‌ای را برای دو موتور القایی واقعی مشابه با موتور شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که در خط لوله انتقال نفت فعال هستند. در این مقاله نمونه‌برداری عملی از کمیت‌های الکتریکی موتور القایی واقعی با استفاده از اسیلوسکوپ دیجیتال Fluke ScopeMeter 190C انجام گرفته است. این اسیلوسکوپ دیجیتال دارای تفکیک‌پذیری قائم ۸ بیت است. هر نمونه‌برداری به مدت ۱۲ ثانیه در شرایط کار پایدار موتور با ۲۵۰۰ نمونه بر ثانیه انجام شده است. طیف فرکانس توان لحظه‌ای در شکل ۱۲-a عاری از



شکل ۸: تابع دور یک مش روتور



شکل ۹: اندوکتانس متقابل بین فاز A استاتور و ۴۶ مش روتور در یک موقعیت معین روتور در: a- موتور القایی سالم و b- موتور القایی با عیب گردش روغن در یاتاقان با ۴۷ OWF= و ۷ mils OWx= و ۳ mils OWy= و SEy = -1 mils و SEx = DE= 1 mils

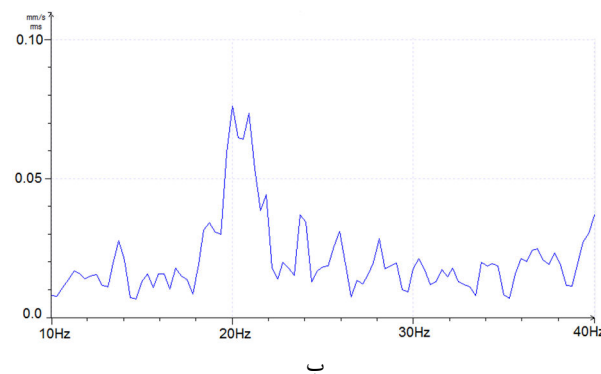
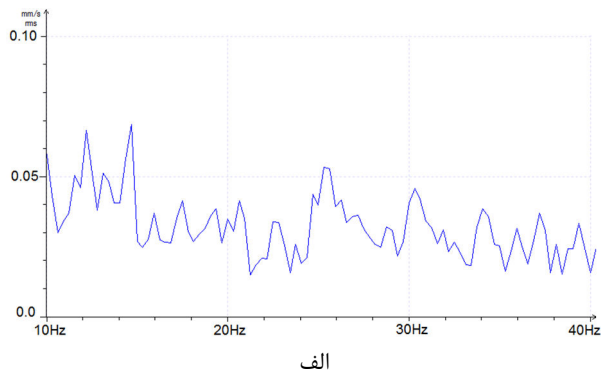
در روش تابع سیم‌پیچ، حلقه‌های حاصل از میله‌های مجاور هم در روتور به عنوان یک مش مداری در نظر گرفته می‌شوند. لذا روتور به تعداد میله‌های قفسه خود دارای مش مداری اتصال کوتاه است. شکل ۸ تابع دور یک مش روتور را نشان می‌دهد. برای یافتن تابع دور مش‌های دیگر روتور کافی است که تابع دور مش اول آن به اندازه $(n_b - 1)\Delta\alpha$ به سمت راست انتقال داده شود. در این عبارت n_b شماره مش روتور و $\Delta\alpha$ زاویه بین دو میله مجاور روتور است.

شکل ۹ اندوکتانس متقابل فاز A استاتور با ۴۶ مش روتور را در یک موقعیت معین روتور در موتور القایی سالم و موتور القایی با عیب گردش روغن در یاتاقان نشان می‌دهد که با اعمال توابع ذی‌ربط در رابطه ۱۶ و انتگرال‌گیری به دست آمده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود عیب گردش روغن که باعث غیریکنواخت شدن فاصله هوایی می‌شود، تغییر

جدول ۲: دامنه و فرکانس هارمونیک‌های توان لحظه‌ای ناشی از عیب گردش

روغن یاتاقان در شکل ۱۲- b

ضریب k	فرکانس هارمونیک (Hz)	دامنه هارمونیک (db)
-۳	۳۴/۹	-۳۸/۹۱
+۳	۱۶۵/۱	-۳۶/۶۲
-۴	۱۵/۰	-۳۳/۶۵
+۴	۱۸۵/۰	-۳۲/۸۳
-۵	۶/۵	غیر قابل تشخیص
+۵	۲۰۶/۷	-۴۴/۸۷
-۶	۳۰/۱	-۴۸/۲۱
+۶	۲۳۰/۳	-۴۳/۵۲

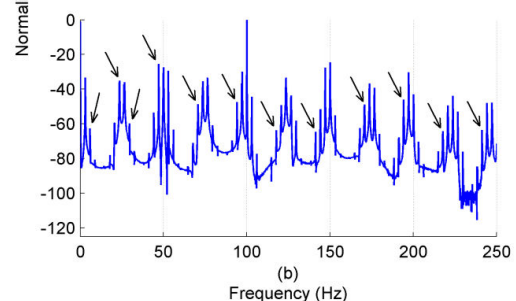
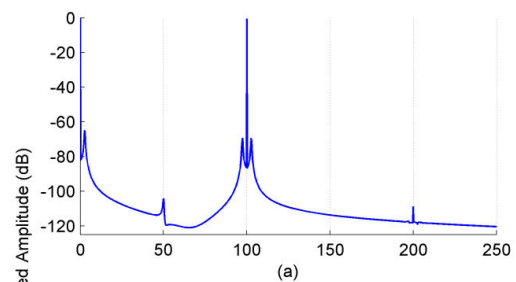


شکل ۱۳: طیف فرکانس ارتعاش دو موتور القایی فعال در خط لوله انتقال نفت؛ الف- موتور سالم، ب- موتور معیوب

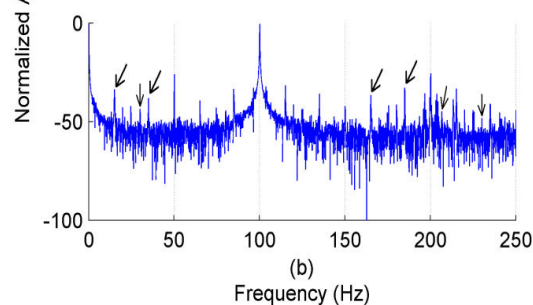
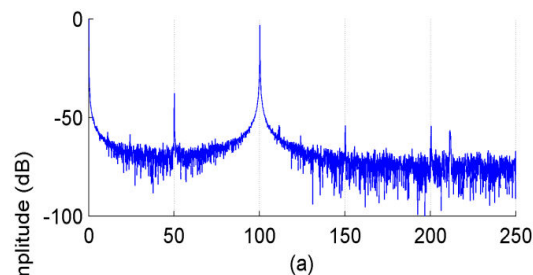
تمامی هارمونیک‌های مشخص شده در شکل ۱۲- b و جدول ۲ از گروه $|2f_s \pm kf_c|$ هستند. به دلیل انحراف جزئی فرکانس شبکه از ۵۰ Hz، در این شکل $2f_s = 100/1$ Hz بوده و فرکانس f_c بین ۲۱/۲۵ تا ۲۱/۷ هرتز متغیر است که متناظر با OWF بین ۰/۴۲۵ تا ۰/۴۳۵ می‌شود. ماهیت ناپایدار عیب گردش روغن این تغییر جزئی OWF را توجیه می‌کند.

برای اطمینان از نتایج حاصل شده برای یاتاقان موتورهای واقعی سالم و معیوب نسبت به آنالیز ارتعاشات در آن‌ها اقدام می‌شود. برای این منظور از دستگاه Vibrotest 60 مجهز به حسگر شتاب با مدل AS-065 استفاده به عمل می‌آید. شکل ۱۳ طیف فرکانس ارتعاش این موتورها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، ارتعاشاتی در محدوده تغییرات به دست آمده برای f_c در موتور واقعی معیوب وجود دارد.

هارمونیک‌های شاخص عیب گردش روغن است. بنابراین یاتاقان موتور واقعی مربوط به این طیف فرکانسی سالم است. این موتور بعد از این موتور واقعی سالم نامیده می‌شود. اما در طیف فرکانس توان لحظه‌ای شکل ۱۲- b می‌توان هارمونیک‌های شاخص عیب گردش روغن در یاتاقان را ملاحظه نمود. این هارمونیک‌ها با علامت فلش مشخص شده و اطلاعات فرکانس و دامنه دقیق آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. این موتور بعد از این موتور واقعی معیوب نامیده می‌شود.



شکل ۱۱: طیف فرکانس نرمالیزه توان لحظه‌ای موتور القایی حاصل از شبیه‌سازی در شرایط بدون بار؛ a- برای موتور القایی سالم و b- برای موتور القایی با عیب گردش روغن در یاتاقان $OWF = 0/425$ و $OWF = 0/435$ و $SEy = -1$ mils و $Sex = DE = 1$ mils و $OWy = 3$ mils



شکل ۱۲: طیف فرکانس نرمالیزه توان لحظه‌ای در موتورهای القایی فعال در خط لوله انتقال نفت؛ a- موتور سالم، b- موتور معیوب

گردش روغن است. سطر آخر جدول انحراف معیار مقادیر سه سطر ماقبل (سطور سوم تا پنجم) را در هر ستون نشان می‌دهد. مقدار پایین انحراف معیار به معنی تأثیرپذیری کم دامنه هارمونیک از حضور مؤلفه‌های ناهم‌محوری هم‌زمان با عیب گردش روغن است و بالعکس. بنابراین مقاوم‌ترین هارمونیک‌ها نسبت به مؤلفه‌های ناهم‌محوری در فرکانس‌های $|2f_s \pm 4f_c|$ ، $|2f_s \pm 6f_c|$ و $2f_c$ قرار دارند. هارمونیک $|2f_s - 6f_c|$ هم انحراف معیار کمی دارد ولی این هارمونیک اساساً حساسیتی به عیب گردش روغن نشان نداده است.

جدول ۴ برای بررسی اثر شدت عیب گردش روغن بر دامنه هارمونیک‌ها تدوین شده است. در سطرهای متوالی این جدول، در حالی که مؤلفه‌های ناهم‌محوری ثابت و معادل ۱ میلی (یک‌هزارم اینچ) هستند، شدت عیب گردش روغن از طریق افزایش مؤلفه افقی آن (OW_x) افزایش داده می‌شود. سطر آخر این جدول هم به انحراف معیار مقادیر سطور ماقبل اختصاص دارد. مقدار زیاد انحراف معیار نشان‌دهنده تأثیرپذیری بیش‌تر از شدت عیب گردش روغن است. بنابراین در میان هارمونیک‌های انتخاب‌شده از جدول ۳، هارمونیک $|2f_s + 6f_c|$ و سپس هارمونیک $|2f_s + 4f_c|$ از حساسیت بهتری نسبت به شدت عیب برخوردار هستند.

برای بررسی اثر سطح بار مکانیکی بر دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای، شبیه‌سازی موتور القایی در شرایط عیب متناظر با سطر دوم از جدول ۴ و در سطوح بار از بی‌باری تا ۹۰ درصد بار کامل صورت گرفته و نتایج حاصله در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کم‌ترین انحراف معیار در هارمونیک‌های با فرکانس $|2f_s \pm 4f_c|$ و $|2f_s + 6f_c|$ حاصل می‌شود. پس دامنه این هارمونیک‌ها کم‌ترین حساسیت را به تغییرات سطح بار موتور دارند. در این میان هارمونیک با فرکانس $|2f_s + 4f_c|$ دامنه به‌مراتب بزرگ‌تری دارد و لذا آشکارسازی آن از سطح نویز ساده‌تر است.

۶- حساسیت هارمونیک‌های توان لحظه‌ای به نوع و شدت عیب، سطح بار موتور و عدم تعادلی ولتاژهای تغذیه استاتور

دامنه هرکدام از هارمونیک‌های توان لحظه‌ای ناشی از عیب گردش روغن یاتاقان ممکن است به‌عنوان یک شاخص برای آشکارسازی و تعیین شدت این عیب به کار رود. برای این منظور لازم است دامنه هارمونیک، حساسیت قابل قبولی به‌شدت عیب داشته و درعین حال از سایر عوامل جنبی کم‌تر متأثر شود. در این بخش میزان حساسیت دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای به نوع و شدت عیب، سطح بار مکانیکی موتور و میزان عدم تعادلی ولتاژهای سه فاز تغذیه استاتور با استفاده از نتایج شبیه‌سازی برای موتور موردنظر بررسی می‌شود.

جدول ۳ برای ارزیابی میزان تأثیر مؤلفه‌های ناهم‌محوری و گردش روغن در دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای با استفاده از نتایج شبیه‌سازی تدوین شده است. این جدول (و جداول بعدازآن) برای فرکانس‌های $|2f_s \pm kf_c|$ به ازای مقادیر k بین ۳ تا ۶ و برای فرکانس‌های kf_c به ازای مقادیر k معادل ۱ و ۲ تنظیم شده است زیرا نتایج شبیه‌سازی‌های متعدد و نمونه‌برداری‌های عملی حاکی از محسوس‌تر بودن دامنه هارمونیک‌های متناظر با این مقادیر k است. در ستون‌های ذیل نوع عیب در جدول ۳ علامت + حاکی از وجود مؤلفه عیب موردنظر و علامت - حاکی از عدم وجود مؤلفه عیب موردنظر در شبیه‌سازی است. بنابراین سطر اول جدول ۳ حاکی از دامنه ناچیز هارمونیک‌ها در موتور سالم است. سطر دوم این جدول نیز نشان می‌دهد که مؤلفه‌های ناهم‌محوری استاتیکی و دینامیکی ذاتی اثر قابل توجهی بر دامنه هارمونیک‌ها ندارند. اما برعکس، عیب گردش روغن حتی بدون مؤلفه‌های ناهم‌محوری موجب افزایش چشم‌گیر دامنه بعضی از هارمونیک‌های توان لحظه‌ای در سطر سوم می‌شود. سطور چهارم و پنجم جدول هم حاکی از تأثیرپذیری تعدادی از هارمونیک‌ها از وجود مؤلفه استاتیکی یا دینامیکی ناهم‌محوری به‌طور هم‌زمان با عیب

جدول ۳: مقایسه دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای به ازای انواع مؤلفه‌های عیب

kf_c (dB)		$2f_s \pm kf_c$ (dB)										نوع عیب		
k=۲	k=۱	k=+۶	k=-۶	k=+۵	k=-۵	k=+۴	k=-۴	k=+۳	k=-۳			DE	SE	OW
۴۷/۰ Hz	۲۳/۵ Hz	۲۴۱/۳ Hz	۴۱۳ Hz	۲۱۷/۷ Hz	۱۷/۷ Hz	۱۹۴/۲ Hz	۵/۷ Hz	۱۷۰/۶ Hz	۲۹/۳ Hz					
-۶۵/۹	-۸۵/۵	-۹۹/۳	-۷۵/۳	-۹۸/۳	-۸۷/۱	-۹۷/۲	-۸۷/۴	-۹۵/۹	-۸۳/۳	-	-	-	-	-
-۶۵/۱	-۸۴/۵	-۹۸/۸	-۷۴/۵	-۹۷/۷	-۸۵/۸	-۹۳/۷	-۸۵/۳	-۹۴/۷	-۸۲/۳	+	+	-	-	-
-۵۰/۷	-۵۵/۹	-۶۵/۰	-۷۷/۷	-۸۴/۹	-۸۹/۵	-۴۷/۳	-۶۳/۶	-۷۱/۸	-۸۰/۳	-	-	+	-	+
-۵۱/۲	-۳۴/۲	-۶۴/۱	-۷۶/۱	-۶۴/۰	-۷۴/۸	-۴۶/۸	-۶۱/۳	-۵۲/۴	-۶۴/۱	+	-	+	-	+
-۴۹/۸	-۴۴/۴	-۶۰/۰	-۷۵/۹	-۵۷/۰	-۷۶/۹	-۴۴/۵	-۶۲/۰	-۴۴/۷	-۶۵/۴	-	+	+	+	+
۰/۷۱	۱۰/۸	۲/۶	۰/۹	۱۴/۵	۷/۹	۱/۴	۱/۱	۱۳/۹	۸/۹	انحراف معیار				

جدول ۴: مقایسه دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای به ازای تغییر OW_x

kf_c (dB)		$2f_s \pm kf_c$ (dB)										شدت عیب (mils)			
k=۲	k=۱	k=+۶	k=-۶	k=+۵	k=-۵	k=+۴	k=-۴	k=+۳	k=-۳			DE	SE	OWy	OWx
۴۷/۰ Hz	۲۳/۵ Hz	۲۴۱/۳ Hz	۴۱/۳ Hz	۲۱۷/۷ Hz	۱۷/۷ Hz	۱۹۴/۲ Hz	۵/۷ Hz	۱۷۰/۶ Hz	۲۹/۳ Hz						
-۵۳/۸	-۳۹/۷	-۷۴/۴	-۸۰/۰	-۷۲/۹	-۷۹/۹	-۵۳/۰	-۶۹/۰	-۵۳/۵	-۷۰/۳	۱	۱	۳	۳	۶	۶
-۵۱/۰	-۳۶/۱	-۶۳/۶	-۷۶/۸	-۶۴/۳	-۷۸/۰	-۴۶/۱	-۶۲/۷	-۴۹/۰	-۶۲/۲	۱	۱	۳	۳	۷	۷
-۵۱/۴	-۳۲/۸	-۵۲/۸	-۷۳/۱	-۵۷/۲	-۷۰/۳	-۳۹/۲	-۵۷/۴	-۴۴/۸	-۶۵/۸	۱	۱	۳	۳	۸	۸
-۵۴/۳	-۳۰/۱	-۴۳/۸	-۶۰/۴	-۴۹/۲	-۶۸/۰	-۳۳/۵	-۵۱/۱	-۴۰/۶	-۵۷/۹	۱	۱	۳	۳	۹	۹
۱/۷	۴/۱	۱۱/۹	۷/۶	۸/۷	۵	۷/۷	۶/۷	۴/۸	۴/۷	انحراف معیار					

جدول ۵: مقایسه دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای به ازای تغییرات بار

$k f_c$ (dB)		$\sum f_s \pm k f_c$ (dB)								سطح بار (/.)
$k=2$	$k=1$	$k=+6$	$k=-6$	$k=+5$	$k=-5$	$k=+4$	$k=-4$	$k=+3$	$k=-3$	
۴۷/۰ Hz	۲۳/۵ Hz	۲۴۱/۳ Hz	۴۱/۳ Hz	۲۱۷/۷ Hz	۱۷/۷ Hz	۱۹۴/۲ Hz	۵/۷ Hz	۱۷۰/۶ Hz	۲۹/۳ Hz	
-۵۱/۰	-۳۶/۱	-۶۳/۶	-۷۶/۸	-۶۴/۳	-۷۸/۰	-۴۶/۱	-۶۲/۷	-۴۹/۰	-۶۲/۲	۰
-۵۰/۱	-۵۴/۶	-۶۵/۵	-۷۱/۸	-۶۵/۴	-۷۳/۷	-۴۷/۰	-۶۲/۷	-۴۶/۳	-۶۲/۸	۳۰
-۴۷/۷	-۵۶/۵	-۶۳/۶	-۷۴/۶	-۶۱/۷	-۷۳/۹	-۴۸/۷	-۶۵/۰	-۴۵/۳	-۶۱/۹	۶۰
-۲۳/۵	-۶۳/۸	-۶۲/۵	-۷۳/۴	-۶۱/۷	-۶۹/۵	-۴۷/۹	-۶۴/۸	-۴۵/۹	-۶۴/۸	۹۰
۱۳/۱	۱۱/۸	۱/۲	۲/۱	۱/۸	۳/۴	۱/۱	۱/۲	۱/۶	۱/۳	انحراف معیار

جدول ۶: مقایسه دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای به ازای تغییرات نامتعادلی ولتاژ

$k f_c$ (dB)		$\sum f_s \pm k f_c$ (dB)								درصد عدم تعادلی ولتاژ تغذیه
$k=2$	$k=1$	$k=+6$	$k=-6$	$k=+5$	$k=-5$	$k=+4$	$k=-4$	$k=+3$	$k=-3$	
۴۷/۰ Hz	۲۳/۵ Hz	۲۴۱/۳ Hz	۴۱/۳ Hz	۲۱۷/۷ Hz	۱۷/۷ Hz	۱۹۴/۲ Hz	۵/۷ Hz	۱۷۰/۶ Hz	۲۹/۳ Hz	
-۵۱/۰	-۳۶/۱	-۶۳/۶	-۷۶/۸	-۶۴/۳	-۷۸/۰	-۴۶/۱	-۶۲/۷	-۴۹/۰	-۶۲/۲	۰
-۴۹/۶	-۳۶/۶	-۶۴/۹	-۷۶/۶	-۶۳/۰	-۷۸/۰	-۴۶/۶	-۶۱/۲	-۴۸/۴	-۶۲/۷	۱
-۵۰/۹	-۳۶/۹	-۶۴/۰	-۷۴/۴	-۶۴/۳	-۷۴/۷	-۴۶/۵	-۶۲/۶	-۴۹/۳	-۶۱/۷	۲
-۵۲/۰	-۳۷/۱	-۶۴/۳	-۷۵/۸	-۶۴/۱	-۷۸/۴	-۴۶/۹	-۶۲/۲	-۴۹/۳	-۶۶/۰	۳
۱/۰	۰/۴	۰/۵	۱/۰	۰/۶	۱/۷	۰/۳	۰/۶	۰/۳	۱/۹	انحراف معیار

جدول ۷: امتیاز دامنه هارمونیک‌های توان لحظه‌ای به‌عنوان شاخص عیب گردش روغن

$k f_c$ (dB)		$\sum f_s \pm k f_c$ (dB)								عامل مورد بررسی
$k=2$	$k=1$	$k=+6$	$k=-6$	$k=+5$	$k=-5$	$k=+4$	$k=-4$	$k=+3$	$k=-3$	
۴۷/۰ Hz	۲۳/۵ Hz	۲۴۱/۳ Hz	۴۱/۳ Hz	۲۱۷/۷ Hz	۱۷/۷ Hz	۱۹۴/۲ Hz	۵/۷ Hz	۱۷۰/۶ Hz	۲۹/۳ Hz	
+	-	۰	-	-	۰	+	+	-	-	حساسیت به نوع عیب
-	-	+	۰	+	-	+	۰	-	-	حساسیت به شدت عیب
-	-	+	-	-	-	+	+	۰	۰	حساسیت به تغییرات بار
۰	+	+	۰	۰	-	+	۰	+	-	حساسیت به نامتعادلی
-۱	-۲	+۳	-۲	-۱	-۳	+۴	+۲	-۱	-۳	جمع امتیاز

از میان هارمونیک‌های ذی‌ربط در طیف فرکانس توان لحظه‌ای موتور تعیین نمود. برای این منظور هارمونیک‌های مذکور مطابق جدول ۷ امتیازدهی می‌شوند. در این جدول اگر دامنه یک هارمونیک در برابر یک عامل عملکرد مطلوب داشته باشد، در سطر مربوط به آن عامل علامت + (مثبت) برای آن هارمونیک ثبت می‌شود. علامت - (منفی) برای عملکرد نامطلوب در برابر عوامل اختصاص دارد و علامت ۰ (نقطه) حاکی از عملکرد بینابین است. با فرض خنثی شدن یک امتیاز مثبت با یک امتیاز منفی در هر ستون، سطر آخر جدول ۷ حاصل جمع‌بندی نتایج را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هارمونیک با فرکانس $|2f_s + 4f_c|$ با ۴ امتیاز مثبت در رتبه نخست به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص برای عیب گردش روغن یاتاقان قرار دارد. در تأیید این نتیجه‌گیری، جدول ۲ نشان می‌دهد که در موتور واقعی معیوب دامنه این هارمونیک بیش‌ترین مقدار را در میان دامنه هارمونیک‌های دیگر توان لحظه‌ای دارد و لذا آشکارسازی آن ساده‌تر خواهد بود.

در خاتمه معلوم می‌شود که بعضی مؤلفه‌های هارمونیک توان لحظه‌ای قوی‌تر از بعضی دیگر از آن‌ها عیب گردش روغن را نشان می‌دهند و برای یافتن آن مؤلفه‌های هارمونیک در هر موتور معین از شبیه‌سازی آن موتور خاص به روش تابع سیم‌پیچ می‌توان کمک گرفت.

ولتاژ شبکه سراسری که برای تغذیه موتورهای القایی مورد استفاده قرار می‌گیرد همواره حاوی درجه‌ای از عدم تعادلی سه‌فاز است. میزان عدم تعادلی ولتاژ به موقعیت مجموعه صنعتی و میزان بارهای نامتعادل (مثل بارهای تک‌فاز) در مجاورت آن بستگی دارد. بنابراین بررسی میزان تأثیرپذیری هارمونیک‌های توان لحظه‌ای از عدم تعادلی ولتاژ تغذیه ضروری می‌نماید. در این راستا شبیه‌سازی موتور القایی با شرایط عیب متناظر با سطر دوم از جدول ۴ و به ازای درجات مختلف نامتعادلی سه‌فاز در ولتاژ تغذیه انجام گرفته و نتایج حاصله در جدول ۶ منعکس گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در میان هارمونیک‌های مقاوم نسبت به نامتعادلی ولتاژ که از مقدار کم انحراف معیار آن‌ها مشخص می‌شود، هارمونیک با فرکانس $|2f_s + 4f_c|$ دامنه بزرگ‌تری نیز دارد. لذا این هارمونیک شاخص مناسب‌تری برای تشخیص عیب گردش روغن از نقطه‌نظر عدم تأثیرپذیری از نامتعادلی ولتاژ تغذیه استاتور به حساب می‌آید.

۷- انتخاب بهترین شاخص عیب گردش روغن

با جمع‌بندی نتایج حاصل از جداول ارائه‌شده در بخش قبل می‌توان مناسب‌ترین شاخص برای عیب گردش روغن یاتاقان در موتور القایی را

۸- نتیجه گیری

شکل موج توان لحظه‌ای بستر مناسبی برای استخراج علائم معایب مختلف موتور القایی با هدف تشخیص زودهنگام معایب است. بررسی تحلیلی، شبیه‌سازی کامپیوتری و همچنین نمونه‌گیری عملی نشان می‌دهد که عیب گردش روغن یاتاقان لغزشی نیز هارمونیک‌هایی با فرکانس معین در این شکل موج ایجاد می‌کند. دامنه بعضی از این هارمونیک‌ها اندازه بزرگ‌تری داشته، حساسیت خوبی به شدت عیب دارد و در مقابل مؤلفه‌های عیب ناهم‌محوری، سطح بار و نامتعادلی ولتاژهای تغذیه استاتور مقاوم است. بنابراین دامنه این هارمونیک‌های توان لحظه‌ای شاخص خوبی برای تشخیص زودهنگام عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتور القایی به حساب می‌آید.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد است که با حمایت شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران به مرحله انجام رسیده است. نویسندگان مقاله بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را به مدیریت و کارکنان این شرکت ابلاغ می‌نمایند.

مراجع

- [10] G. Oliver, "An introduction to oil whirl and oil whip," *A Quarterly Publication from Turbo Components & Engineering*, vol. 3, no. 2, 2001.
- [11] C. C. Fan, J. W. Syu, M. C. Pan, and W. C. Tsao, "Study of start-up vibration response for oil whirl, oil whip and dry whip," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 8, pp. 3102-3115, 2011.
- [12] M. Ojaghi, and S. Nasiri, "Modeling eccentric squirrel cage induction motors with slotting effect and saturable teeth-reluctances," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 29, no. 3, pp. 619-627, 2014.
- [13] S. F. Legowski, A. H. M. Sadrul Ula, and A. M. Trzynkowski, "Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motor," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 32, no. 4, pp. 904-909, 1996.
- [14] A. M. Trzynkowski, M. Ghassemzadeh, and S. F. Legowski, "Diagnosis of mechanical abnormalities in induction motors using instantaneous electric power," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1417-1423, 1999.
- [15] Z. Liu, X. Yin, Z. Zhang, D. Chen, and W. Chen, "Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 3, pp. 485-490, 2004.
- [16] J. Faiz, and M. Ojaghi, "Instantaneous-power harmonics as indexes for mixed eccentricity fault in mains-fed and open/closed-loop drive-connected squirrel-cage induction motors," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4718-4726, 2009.
- [17] G. B. Kliman, and J. Stein, "Methods of motor current signature analysis," *Electric Machines and Power Systems*, vol. 20, no. 5, pp. 463-474, 1992.
- [18] J. Faiz, I. T. Ardekane, and H. A. Toliyat, "An evaluation of inductances of a squirrel-cage induction motor under mixed eccentric conditions," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 252-258, 2003.
- [19] J. Faiz, and I. Tabatabaei, "Extension of winding function theory for non-uniform air gap in electric machinery," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 38, no. 6, pp. 3654-3657, 2002.
- [20] G. Madescu, M. Greconici, M. Biriescu, and M. Mot, "Effects of stator slot magnetic wedges on the induction motor performances," *13th Int. Conf. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 489-492, 2012.
- [1] M. J. Devaney, and L. Eren, "Detecting motor bearing faults," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 30-50, 2004.
- [2] A. M. Knight, and S. P. Bertani, "Mechanical fault detection in a medium-sized induction motor using stator current monitoring," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 753-760, 2005.
- [3] *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE Std. 493-1997, 1998.
- [4] M. S. Ballal, Z. J. Khan, H. M. Suryawanshi, and R. L. Sonolikar, "Adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 250-258, 2007.
- [5] I. Y. Onel, and M. E. H. Benbouzid, "Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and Concordia transform approaches comparative study," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 13, no. 2, pp. 257-262, 2008.
- [6] P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, and B. Lu, "A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 34-46, 2011.
- [7] Y. Shao, W. Tu, and F. Gu, "A simulation study of defects in a rolling element bearing using FEA," *Int. Conf. Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 596-599, 2010.
- [8] M. Ojaghi, and N. Yazdandoos, "Winding function approach to simulate induction motors under sleeve bearing fault," *Int. Conf. Industrial Technology (ICIT)*, pp. 158-163, 2014.
- [9] P. Girdhar, and C. Scheffer, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, Elsevier Ltd., 2004.