

پیشرفت‌های اخیر در زمینه عیب‌یابی و پایش وضعیت ماشین‌های الکتریکی دوار

سید محمد موسوی گزافرودی^۱، سید ابوالفضل مرتضوی زاده^۲

چکیده

ماشین‌های الکتریکی ستون فقرات صنعت را تشکیل می‌دهند. خرابی یک موتور می‌تواند منجر به توقف‌های ناخواسته در واحد صنعتی گردد. برای تشخیص سلامت هر یک از موتورهای روشن‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در این مقاله مروری بر روش‌های تشخیص خطا و عیب‌یابی در تجهیزات الکتریکی دوار ارائه خواهد شد. روش‌های عیب‌یابی در چهار دسته مورد بررسی قرار خواهند گرفت: روش‌های الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی و حرارتی. در هر گروه روش عیب‌یابی و عیوبی که به وسیله هر روش قابل تشخیص است معرفی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: پایش وضعیت، عیب‌یابی، موتورهای الکتریکی، مرور.

مقدمه

پایش وضعیت و عیب‌یابی در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. هدف از این کار جلوگیری از توقف‌های ناخواسته و هزینه بر و شناسایی حالات خطا در اسرع وقت است [۷-۱]. موتورهای الکتریکی در معرض خطاهای بسیاری هستند که بسیاری از آن‌ها خود منجر به خطاهای ثانویه می‌شوند. منشا خطاهای موتور می‌تواند داخلی، خارجی یا شرایط محیطی باشد. خطاهای با مرجع داخلی می‌تواند با توجه به محل بروز آن یعنی در استاتور یا روتور طبقه‌بندی شود. خطاهای رایج در بخش روتور به شرح زیر است [۸]: (۱) خطای بیرینگ (۲) شکستگی میله‌های روتور (۳) شکستگی بدنه روتور (۴) غیر هم محوری بیرینگ (۵) مشکل روغن‌کاری بیرینگ (۶) غیر هم محوری روتور (۷) نامتعادلی مکانیکی یا حرارتی روتور. هم‌چنین اشکالات رایجی که در بخش استاتور ظاهر می‌شود به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۸]: (۱) لرزش بدنه (۲) اتصال کوتاه به زمین (۳) آسیب‌دیدگی عایق‌ها (۴) اتصال کوتاه حلقه‌های استاتور (۵) اتصال کوتاه دو فاز در استاتور (۶) جا به جا شدن هادی‌ها (۷) خطا در اتصالات الکتریکی. این عیوب می‌تواند به کمک روش‌های مختلفی تشخیص داده شود. در این مقاله این روش‌ها به وسیله پارامتری که با آن شناسایی خواهند شد در چهار دسته طبقه‌بندی شده‌اند.

روش‌های عیب‌یابی

نشانگرهای مختلفی برای تشخیص عیوب ماشین‌های الکتریکی دوار وجود دارد که در تشخیص وضعیت ماشین ما را یاری خواهد کرد. در این مقاله روش‌های عیب‌یابی به کمک نشانگرهای خطا دسته‌بندی خواهند شد. به این ترتیب روش‌های پایش وضعیت می‌تواند در چهار گروه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱. بررسی پارامترهای الکتریکی

برخی از پارامترهای الکتریکی که می‌تواند به عنوان نشانگر حالت خطا مورد استفاده قرار گیرد عبارت‌اند از اختلاف پتانسیل الکتریکی، جریان، شار، توان و غیره. خطاهای احتمالی می‌تواند با مقایسه سیگنال‌های الکتریکی در دو حالت سالم و وضعیت کنونی شناسایی شوند.

بعضی از روش‌های الکتریکی مبتنی بر تزریق سیگنال و تحلیل پاسخ سیستم است. به عنوان مثال یک روش تزریق سیگنال با فرکانس بالا برای تشخیص خطا در درایو حلقه بسته در مرجع [۹] بررسی شده است ولی پیاده‌سازی آن به واسطه محدودیت‌های سخت‌افزاری و ساختاری دشوار است.

بر اساس گزارش‌ها [۱۰] نظریه قاب مرجع گردان که مستقیماً به بخش کنترل موتور اضافه شده، می‌تواند برای تشخیص خطای موتور حتی در شرایط غیر ایده‌آل مانند وجود غیر متعادلی به تعیین دامنه و فاز خطای ماشین الکتریکی بپردازد. در تست روتور با شار نامی با اعمال یک منبع ولتاژ ac به هر یک از سمت‌های شفت موتور، جریان شفت و شار هسته به دست خواهد آمد. این تحریک باعث ایجاد جریان گردشی بین میله‌های روتور و شفت می‌شود. جریان یا شار هر یک از میله‌ها با استفاده از ناظر مغناطیسی یا دوربین‌های حرارتی به صورت غیرمستقیم نظارت می‌شود. اثر شکستگی یا ترک در میله روتور یا اتصال کوتاه در ورقه‌های روتور با این روش قابل تشخیص است [۱۱]. این تست‌ها در حالت توقف انجام می‌شوند و برای پایش وضعیت آنلاین مناسب به نظر نمی‌رسند.

یک روش خودکار برای پایش وضعیت روتور ماشین‌های القایی تغذیه شده با اینورتر منبع ولتاژ در شرایط ایستا معرفی شده است [۱۱] که در آن موتور با میدان‌های پالسی در زوایای مختلف تحریک شده و با بررسی تغییر امپدانس شکستگی میله روتور تشخیص داده خواهد شد. این تست از هر نوع سخت‌افزار اضافه‌ای بی‌نیاز است ولی اشکال آن آفلاین بودن آن است.

الف. تجزیه و تحلیل جریان موتور

با توجه به بدون حس گر بودن روش تحلیل جریان موتور، این روش یکی از محبوب‌ترین روش‌های عیب‌یابی به شمار می‌رود. تحلیل جریان موتور نیازمند اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده‌های بسیار و هم‌چنین اندازه‌گیری یا تخمینی دقیق از سرعت موتور است. این روش ارزیابی قابل‌اعتماد و با دقتی انجام می‌دهد ولی برای کاربردهای با بار موتور متغیر مناسب نیست.

روش‌های اولیه تحلیل جریان موتور، سیگنالی ایستا و با نویز بالا را مورد ارزیابی قرار می‌داد. غیر ایستایی سیگنال‌های جریان استاتور با روش‌های رایج پنجره‌ای (Windowing) قابل اصلاح است [۱۲]. طبیعت نوسانی جریان استاتور در حالت‌های خطا نیازمند روش‌های تحلیلی‌ای است که بتواند این حالت غیر ایستا و نوسانی سیگنال را بررسی کند، روش‌هایی مانند تبدیل ویولت (Wavelet). استفاده از روش‌های جدید پردازش سیگنال مانند پردازش طیف سیگنال در فرکانس‌های بالا [۱۳]، پردازش‌های با دقت بالا یا روش‌های زیر فضایی [۱۴] و تبدیل ویولت [۱۵ و ۱۶] انقلابی در زمینه پردازش سیگنال برای عیب‌یابی موتورهای الکتریکی ایجاد کردند.

پایش جریان استاتور معمولاً به دنبال ردیابی فرکانس‌های $(1-2s)f$ و $(1+2s)f$ است که به ترتیب باند جانبی پایین و باند جانبی بالا نامیده می‌شوند [۱۷] که در آن s لغزش و f فرکانس پایه است. دامنه بار، توان، مشخصات موتور و غیریک‌نواختی در ساخت موتور اندازه باندهای جانبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۸].

به خاطر نزدیکی فرکانس اصلی به مؤلفه‌های باندهای جانبی، ردیابی شکستگی میله‌های روتور با این روش دشوار خواهد بود [۱۹]. هم‌چنین این مشکل برای موتور در حال با شرایط لغزش پایین نیز وجود دارد. از آن جایی که در ردیابی عیب شکستگی موتور به وسیله روش پایش جریان استاتور به خاطر تنظیمات جریان بسیاری از فرکانس‌ها از بین خواهد رفت این روش برای

ردیابی این عیب کارآمد به نظر نمی‌رسد. به علاوه این که روش‌های آنلاین برای عیب‌یابی در شرایطی که فرکانس کار به واسطه سرعت بار پیوسته تغییر می‌کند مناسب به نظر نمی‌رسد. در مرجع [۲۲ و ۲۱] تحلیل طیف فرکانسی کنترلر سرعت متغیر برای ردیابی عیب شکستگی میله روتور برای درایوهای با کنترل برداری پیشنهاد شده است ولی این روش‌ها تنها برای طرح‌های کنترلی خاصی قابل پیاده‌سازی هستند و به شدت تحت تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده می‌باشند [۲۳].

در مرجع [۱۷] بعضی از نشانه‌های جدید مشکل خطای میله روتور شکسته پیشنهاد شده است که مبنای آن دنبال کردن هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان فاز موتور است. نسبت‌های $I_{(5+2s)f}/I_{1f}$ و $I_{(7-2s)f}/I_{5f}$ نمونه‌هایی از این نشانه‌ها هستند که از گشتاور بار و اینرسی درایو مستقل هستند. این روش هم‌چنین به پارامترهای ماشین وابستگی کم و با بزرگی خطا نسبت مستقیم دارد.

یک روش آنلاین پیشرفته [۲۴] مبتنی بر پایش جریان استاتور که از الگوریتم تخمین لغزش بهنیه، الگوریتم نمونه برداری مناسب و الگوریتم جستجوی خودکار فرکانس برای بهره‌وری بالاتر بهره می‌برد نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با مقایسه روش‌های مختلف عیب‌یابی مانند بردار جریان بردار سه فاز، گشتاور لحظه‌ای، و میدان مغناطیسی خارجی روش پایش جریان استاتور بهترین روش برای تشخیص عیوب مختلف روتور پیشنهاد شده است [۲۵].

در مطالعات جدید کاربردهای مختلف نظریه قاب مرجع به عنوان یک ابزار اصلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که با برخی روش‌ها مانند توالی منفی جریان استاتور و یا تشخیص فرکانس منفی روتور در شرایط غیر متعادل تحت شرایط ایستا به عیب‌یابی می‌پردازند.

تحلیل‌های حوزه زمان-فرکانس در سال‌های اخیر به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند ولی پیچیدگی و نیازهای سخت‌افزاری محدودیت‌های این روش‌ها برای استفاده در سیستم‌های با درایو ساده و ارزان قیمت است.

برای مقایسه سیگنال‌ها در حالات مختلف روش‌های متعددی وجود دارد مانند: روش کولموگوروف-سیمورنوف (Kolmogorov-Smirnov) یا KS، الگوریتم پلاتیو (Plateau)، روش هالف وینترز (Half-Winters) یا HW و روش مارک-بورگز (Mark-Burgess) یا MB. اگر دو سری داده یا توزیع زمانی دارای واریانس یکسانی باشند روش KS که یک روش غیرپارامتریک و مستقل از توزیع است بهترین انتخاب خواهد بود. این روش برای مقایسه سیگنال جریان موتور با سیگنال مرجع مورد استفاده قرار خواهد گرفت. سیگنال مرجع، سیگنال جریان موتور در حالت سلامت است. پارامترهای KS با تفاضل برداری دو توزیع داده تحت تست است. الگوریتم پلاتیو برای کاربردهای دارای خطای زیاد مناسب به نظر نمی‌رسد و به همین دلیل برای پایش وضعیت مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. الگوریتم HW یک روش پیش‌بینی‌کننده است که نیازمند ردیابی اتفاقات به صورت لحظه‌ای است و تکنیک MB مستلزم ردیابی تغییرات در حوزه زمان است. روش KS بهترین روش از بین تکنیک‌های مستقل از خود توزیع است که اختلافات کلی بین توزیع داده‌ها را مشخص می‌کند. این موضوع برای کاربردهایی که به توزیع داده‌ها وابسته‌اند بسیار ارزشمند است [۱۲].

در شرایط غیرپایدار یا موتورهای با سرعت متغیر به جای ردیابی فرکانس خاص، فرکانس‌ها بر اساس ضریبی از یک فرکانس پایه بیان می‌شوند که این فرکانس پایه معمولاً فرکانس تغذیه است. به عنوان مثال در مرجع [۳۳] ردیابی عیب اتصال کوتاه بین حلقه‌های استاتور موتور سنکرون آهنربای دائم با این روش انجام شده است. در مرجع [۳۳] با اعمال یک فیلتر کالمن [۳۴] برای ردیابی فرکانس دور برای هارمونیک‌های ولتاژ و جریان مشخص شده و در نتیجه عیب‌یابی موتور سنکرون آهنربای دائم استفاده کرده است. مزیت ردیابی فرکانس دور با فیلتر کالمن این است که اجازه استخراج و تحلیل اندازه و فاز داده‌ها را در هر لحظه و مستقیماً از داده‌های اصلی فراهم می‌کند. به علاوه این که عملکرد ردیابی آن وابسته به نرخ تغییرات سرعت گردشی نیست و ردیابی دور را در سیگنال‌های پر نویز نیز امکان‌پذیر می‌کند.

برای استفاده از تبدیل فوریه محدودیت‌های وجود دارد. به عنوان مثال این روش برای سیگنال‌های غیرمتناوب و غیر ایستا نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در غیر این صورت نتیجه طیف فرکانسی دریافت‌اندکی از واقعیت خواهد داشت [۳۵، ۱۵، ۳۶]. به هر حال برای ماشین‌هایی که تحت شرایط غیر پایدار کار می‌کنند به خاطر تغییر سرعت و بار حتی اگر موتور در شرایط کار نامی باشد طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشات همواره در سیگنال حوزه زمان نمونه برداری شده در حال

تغیر است. هنگامی که یک سیگنال حوزه زمان به حوزه فرکانس برده می شود بیشتر اطلاعات حالت گذرای آن از بین می رود [۳۷]. از این رو یک روش ترکیبی در مرجع [۳۸] ارائه شده است.

روش های مبتنی بر تحلیل حوزه زمان و فرکانس [۳۹] می تواند هر دوی اطلاعات حوزه زمان و حوزه فرکانس سیگنال را به دست دهد. بنابراین در مطالعات بعدی روش های تحلیل حوزه زمان و فرکانس به طور گسترده ای برای تشخیص عیوب مورد استفاده قرار گرفته اند زیرا نه تنها قادرند زمان وقوع را مشخص کنند بلکه بازه فرکانسی آن محل وقوع را مشخص می کنند [۴۰]. تحلیل های حوزه زمان و فرکانس عمدتاً برای تحلیل سینگال های ارتعاشات موتور یا جریان استاتور استفاده می شوند.

روش های حوزه زمان و فرکانس متعددی معرفی شده اند مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT)، تحلیل ویولت (WA)، و توزیع وینگر ویل (WVD) که می تواند برای پایش وضعیت موتورهای الکتریکی در حالت گذرا مورد استفاده قرار گیرد. این روش های حوزه زمان و فرکانس در مراجع [۴۱، ۴۲] برای پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته اند. هم چنین تبدیل هیلبرت (Hilbert) و توزیع ژائو-اطلس-مارکز (Zhao-Atlas-Marks) در مرجع [۴۳] برای عیب یابی موتور در شرایط غیر ایستا استفاده شده است که روش آن مطابق موارد قبلی است.

در زمینه پایش وضعیت ماشین آلات، تحلیل ویولت به طور گسترده ای در زمینه تشخیص عیوب بیرینگ های غلتشی، جعبه دنده و کمپرسورها مورد استفاده قرار گرفته است. این روش هم چنین برای استخراج اطلاعات و حذف نویز بسیاری از سیگنال ها مورد استفاده قرار می گیرد [۴۱، ۴۴].

در هر یک از مراجع [۴۱، ۴۵-۴۶] یک روش عیب یابی برای ماشین های الکتریکی دوار بر مبنای تبدیل ویولت گسسته زمان زمان دنبال شده است. در مرجع [۴۶] تحلیل ویولت بر مبنای میانگین زمانی و بر اساس تبدیل ویولت پیوسته مورلت (Morlet) برای تشخیص عیوب یک جعبه به کار گرفته شده است. هم چنین در مرجع [۴۷] ترکیب تبدیل ویولت پیوسته و KS برای تشخیص عیوب جعبه دنده در شرایط گذرا استفاده شده است. در مراجع [۴۴ و ۴۸] از تحلیل ویولت پیوسته زمان برای استخراج اطلاعات سیگنالهای خطای بیرینگ غلتشی استفاده شده است. مرجع [۴۹] این روش را برای عیب یابی یک موتور احتراق درونی به کار برده است.

در مرجع [۵۰] از کاربرد توزیع وینگر-ویل برای تشخیص شکستگی دندانهای محور یک دنده صحبت به میان آمده است. مرجع [۵۱] نشان داده است که توزیع وینگر-ویل می تواند برای تشخیص وضعیت ماشین و هم چنین عیب یابی موثر در ماشین آلات مورد استفاده قرار گیرد. مرجع [۴۲] از این حالت گسسته این توزیع برای بررسی اثر تغییرات بار بر روی جعبه دنده استفاده کرده است. در مرجع [۵۲] از پیاده سازی یک پردازش سیگنال دیجیتال بر مبنای این توزیع روی جریان استاتور برای تشخیص عیوب مکانیکی بار در موتورهای القایی در حالت های گذرای سرعت استفاده شده است.

ب. اندازه گیری شار

شار مغناطیسی می تواند نشانگری از سلامت ماشین چه از بیرون (سیم پیچ های محوری) و چه از درون (سیم پیچ های تجسس) باشد. نصب سیم پیچ ها و وجود نویز در طیف موج مشکل کار این روش است. یکی از مهم ترین کاربردهای این الگوریتم عیب یابی در قفسه روتور است. در مرجع [۲۲] شار روتور تخمینی برای تشخیص عیوب روتور موتور با درایو با کنترل برداری پیشنهاد شده است. در مرجع [۸] نشان داده شده است که بین خروج از مرکز در فاصله هوایی و شار فاصله هوایی و سیگنال ارتعاشات رابطه مستقیم وجود دارد.

در مرجع [۵۳] یک الگوریتم برای عیب یابی خطاهای روتور ارائه شده است که با اندازه گیری دامنه نوسانات شار روتور شروع می شود. در این مقاله نشان داده شده است که نسبت بین Δi_{ds} و مقدار میانگین Δi_{qs} که به ترتیب معرف تغییرات جریان در دو محور d و q هستند شدت غیر عدم تقارن در موتور یا تعداد میله های روتور شکسته مجاور را زمانی که تعداد کلی میله های روتور معلوم باشد نشان می دهد. اما این روش نیازمند برخی تجهیزات برای محاسبه مقدار میانگین جریان و دنبال کردن دامنه جریان است.

ج. پایش توان موتور

تحلیل سیگنال توان موتور به دنبال ردیابی فرکانس های دو برابر فرکانس لغزش موجود در طیف توان ورودی موتور مشابه پایش جریان استاتور موتور است. این هارمونیک ها مرتبط با متوسط توان (مولفه dc) است بنابراین دارای فاکتورهایی است که به شدت خطا وابسته است. به علاوه این که این روش نیازمند هر دو سیگنال ولتاژ و جریان است. هم چنین وابستگی به اینرسی درایو محدودیت دیگر این آشکارساز حالت خطاست. در مرجع [۵۵] از این روش برای ردیابی شکستگی میله های روتور استفاده شده است.

د. پایش تخلیه جزئی

تخلیه جزئی نشانگر عیب عایق سیم پیچ هاست. استاندارد IEEE با شماره ۱۴۳۴-۲۰۰۰ به مرور انواع روش های اندازه گیری آن در ماشین های دوار پرداخته است. این آزمایش برای سیم پیچ های موتورها و ژنراتورهای ولتاژ بالا مورد استفاده قرار می گیرد. با استفاده از سنسورهای تخلیه جزئی که در بین سیم پیچ ها یا ترمینال های آن نصب شده است تداخل الکتریکی پالس های تخلیه جزئی سیم پیچ استاتور بر اساس زمان دریافت پالس یا شکل موج آن به سادگی تشخیص داده می شود [۵۶]. روش های مختلفی برای اندازه گیری تخلیه جزئی وجود دارد. از بین این روش ها، روش جفت سازی RF، روش جفت سازی خازنی و روش RF باند پهن شناخته شده تر هستند. با نصب یک ترانسفورمر جریان با فرکانس رادیویی در نقطه صفر سیم پیچ می توان شدت تداخل در فرکانس های رادیویی که ناشی از تخلیه جزئی است را اندازه گیری کرد. به خاطر ولتاژ اندک نقطه صفر قوس های الکتریکی قسمت های مختلف باعث جاری شدن جریان با فرکانس رادیویی به سمت نقطه صفر می شود. دستگاه اندازه گیری تداخل در فرکانس رادیویی دارای یک باند باریک با پهنای باند ۱۰ کیلوهرتز در فرکانس ۱ مگاهرتز است [۵۸]. با استفاده از روش مبتنی بر فرکانس امکان بهره مندی از مزایای روش فرکانس رادیویی بدون نیاز به اکتساب سیگنال با پهنای باند بالا ولی در عین حال با مصرف توان پایین وجود دارد [۵۹].

روش دوم استفاده از تحلیلگر دامنه پالس مخصوص با پهنای باند ۸۰ مگاهرتز است. در این روش اتصال به سیم پیچ از طریق خازن های جفتی در ترمینال ماشین ایجاد شده است [۵۸]. در ابتدا خازن ها در حالت توقف در ماشین نصب شده اند ولی بعداً ماشین می تواند بدون وقفه به کار خود ادامه دهد و طبق آنچه گفته شد خازن ها پیوسته به حلقه های فاز متصل بوده و اندازه گیری پیوسته انجام می شود. در مرجع [۶۰] نشان داده شده است که زمان خیز پالس (که از ۱۰ درصد تا ۹۰ درصد دامنه قله پالس تعریف می شود) حدود ۴ نانوثانیه خواهد بود و مولفه های فرکانسی این پالس از ۱۰۰ مگاهرتز فراتر خواهد رفت بنابراین یک خازن ۸۰ میکروفارادی نصب شده در ترمینال های ولتاژ بالای ماشین می تواند برای منظور تزویج مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع به اثبات رسید هاست که تخلیه جزئی های جدی، جرقه و قوس های الکتریکی که زمان خیز سریع تری نسبت به کورونا و تخلیه جزئی یهای عادی دارند انرژی الکترومغناطیسی با پهنای باند نسبتاً بالاتر تا حدود ۳۵۰ مگاهرتز تولید می کنند. در صورتی که این انرژی ردیابی شود در بالاترین فرکانس ممکن نسبت سیگنال تخلیه مخرب به نویز افزایش پیدا می کند. فرکانس های بالای ۰/۴ مگاهرتز دیگر مشابه روش های فرکانس پایین از طریق سیم پیچ منتشر نمی شوند و قابل ردیابی نیستند ولی به خاطر تشعشعشان قابل شناسایی هستند [۵۸]. این تشعشع می تواند با یک آنتن هوایی فرکانس رادیویی که درون محفظه ماشین یا خارج از آن نزدیک دریچه آن نصب می شود شناسایی شود که اصول عملکرد کلی آن مشابه روش پایش فرکانس رادیویی باند پهن است.

ه. تحلیل طیف ولتاژ

تست گروبلر (Growler) و تست شار نامی روتور با تحریک جریان بالای متناوب از دیگر تست های آفلاین آزمایش روتور است [۶۱-۶۵]. گروبلر وسیله ای الکتریکی برای تست عایقی موتور است که از سیم پیچ های اتصال کوتاه شده با یک هسته آهنی است که با جریان متناوب تحریک شده است برای این منظور بهره می برد.

این روش مستلزم نصب یک سیم پیچ جانبی کوچک پنهان (Sneak) است که زاویه θ_0 را در فاز A استاتور ایجاد می کند [۶۶] و [۶۷]. این سیم پیچ اتصال الکتریکی با دیگر فازها ندارد ولی با مدارات دیگر در هر دو سمت استاتور و روتور توزیع شده است. در مرجع [۶۸] به کمک شبیه سازی المان محدود اثر خروج از مرکزی ثابت را بر نیروی ضد محرکه یک موتور شار محوری آهنربای دائم بررسی شده است. نیروی ضد محرکه هر فاز با چهار سیم پیچ اندازه گیری شده است که برای تشخیص دقیق خروج از مرکزی مورد استفاده قرار گرفته است.

در صورت سلامت موتور، مولفه های طیف تبدیل پارک ولتاژ سیم پیچ جانبی شامل یک بالازدگی در فرکانس تغذیه موتور است. در شرایط مختلف عدم تعادلی ولتاژ منحنی لیسازو بیضوی شکل است ولی زوایای دیگری خواهد داشت که یک نمونه آن در مرجع [۶۹] نشان داده شده است. در منحنی موتور ناسالم و در مقایسه با موتور سالم اندازه زوایای بالایی و پایینی افزایش خواهد یافت [۶۶].

هم چنین با استفاده از پایش مولفه توالی صفر ولتاژ اثرات عیب اتصال کوتاه بین حلقه های استاتور قابل ردیابی است [۷۰ و ۷۱]. مزیت این روش این است که بر خلاف بسیاری از روش های دیگر، نظیر پایش جریان موتور، آن را از مدار درایو موتور مستقل می سازد ولی این روش نیازمند دسترسی به نقطه صفر سیم پیچ استاتور است. در مرجع [۱۳] تلاش شده است تا خطای اتصال کوتاه بین حلقه های استاتور یک موتور سنکرون آهنربای دائم با اندازه گیری اولین دامنه هارمونیک توالی صفر ولتاژ و هارمونیک مرتبه سوم جریانهای استاتور آن شناسایی شود. هم چنین در مرجع [۷۲] مولفه های توالی صفر ولتاژ و جریان برای شناسایی خطاهای موتور القایی پیشنهاد شده است.

۲. تحلیل پارامترهای مکانیکی

الف. اندازه گیری ارتعاشات مکانیکی

از آنجایی که ۸۰ درصد مشکلات رایج موتورهای الکتریکی وابسته به غیر هم مرکزی و عدم تعادل موتور است تحلیل ارتعاشات ابزاری مهم برای رفع مشکلات مکرر ماشین هاست [۷۳ و ۷۴] در بسیاری از موارد اندازه دامنه کلی ارتعاشات ماشین ابزاری برای تشخیص عیوب ماشین آلات معرفی می شود ولی همان طور که در مرجع [۲] نشان داده شده است این روش برای تشخیص تمامی عیوب کارآمد نیست. در مرجع [۷۷] نشان داده شده است که نیروی الکترومغناطیسی حساس ترین نشانگر حالت خطا برای عیب خروج از مرکز در فاصله هوایی است. بنابراین نشانه هایی قابل شناسایی در الگوی ارتعاشات ماشین آلات دوار وجود دارد. تنها عیب این نشانگر در دسترس نبودن آن است. با این حال از آنجایی که ارتعاشات نتیجه اثر نیروها بر ساختار ماشین است نشانه های قابل تشخیصی باید در الگوهای ارتعاشی وجود داشته باشد. ارتعاشات اندازه گیری شده و هارمونیک های جریان موتور اندازه گیری شده ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند [۱۲].

مروری بر مراجع [۷۸-۸۱] نشان می دهد که اکثر روش های تشخیص عیوب بیرینگ ها مبتنی بر روش های تحلیل ارتعاشات مانند تبدیل ویولت و تبدیل هیلبرت یا روش تحلیل جریان است.

در مرجع [۸۲] نشان داده شده که چگونه تحلیل ارتعاشات تشخیص خروج از مرکز را امکان پذیر می سازد. اندازه کلی ارتعاشات در طیف فرکانسی برای یک بازه فرکانسی موثر، از مقدار dc تا بیشترین فرکانس دلخواه، به روش های مختلفی قابل محاسبه است. یکی از روش های آن که در مرجع [۸۳] به آن اشاره شده به صورت زیر است:

$$overallRMS = \sqrt{\frac{\sum_0^{0.45 \times f_s} power(f)}{BW}} \quad (1)$$

در معادله فوق BW پهنای باند نویز یک پنجره، f فرکانس باند تحلیل و f_s فرکانس نمونه برداری این باند است. روش دیگر تحلیل ارتعاشات تعریف کپستروم (Cepstrum) طبق معادله زیر است:

$$C(\tau) = \left| F^{-1} \{ \log(|F\{f(t)\}|^2) \} \right|^2 \quad (2)$$

که می‌تواند برای تعیین میزان سلامت جعبه دنده مورد استفاده قرار گیرد [۱۹].

رایج‌ترین روش تحلیل ارتعاشات در واحدهای صنعتی تحلیل در حوزه زمان است. فینلی و دیگران در مرجع [۸۴] لیستی کاملی از عیوب مکانیکی و الکتریکی که توسط مولفه‌های فرکانسی الگوی ارتعاشی قابل تشخیص است ارائه شده است. تحلیل آنها بر اساس فرمول‌های تجربی است.

در مرجع [۸۵] روشی مبتنی بر پایش فرکانس‌های عبور از از شیار در مولفه‌های فرکانس بالا ارائه شده است. روش تحلیلی ارائه شده بر اساس موج در حال گردش بنا گذاشته شده است که در آن امواج شار مغناطیسی در فاصله‌هایی به عنوان نتیجه کار و نیروی محرکه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

الگوی ارتعاشات در موتور سالم و موتور دارای عیب خروج از مرکزی در مرجع [۸۶] با هم مقایسه شده اند که در شکل ۱ نشان داده شده اند. در مقاله [۸۶] نشان داده شده است که مولفه‌های فرکانسی مرتبه پایین در طیف ارتعاشی (به دست آمده از شتاب‌سنج‌های نصب شده در قسمت خارجی بدنه) می‌تواند به عنوان نشانه‌ای برای تشخیص خروج از مرکز در موتورهای القایی مورد استفاده قرار گیرد.

مزایای روش ردیابی فرکانس دور در مقایسه با دیگر روش‌های تحلیل ارتعاشات عمدتاً وابسته به تحلیل نویز غیر و ارتعاشات ایستاست که اندازه و فرکانس آن با سرعت چرخش مرجع شفت تغییر می‌کند. تحلیل حالت‌های غیر ایستا در مقایسه با حالت ایستا برای تحلیل دقیق نیازمند جمع‌آوری اطلاعات اضافه تری است. ردیابی فرکانس دور به جای اندازه‌گیری فرکانس دقیق وابسته به سیگنال ارتعاشی سرعت چرخش محور شفت است [۱۹].

ب. اندازه‌گیری نویز صوتی

اندازه‌گیری و تحلیل طیف نویز صوتی روش دیگری برای پایش وضعیت ماشین‌های الکتریکی دوار است که نیازمندی‌های خاص خود را دارد. نویز‌های صوتی ساطع شده از فاصله‌هایی می‌تواند نشانگری از غیر هم مرکزی احتمالی در موتور القایی باشد. ولی اندازه‌گیری ارتعاشات در محیط‌های پر نویز مانند یک کارخانه خیلی کارآمد نیست. در مرجع [۸۷] روشی برای تشخیص غیر هم مرکزی فاصله‌هایی ارائه شده است و تستی با این روش بر روی اتاق بدون پژواک انجام داده است. هارمونیک‌های شکاف در طیف نویز صوتی نشانگری از وضعیت خروج از مرکزی معرفی شده اند. لی و هی در مرجع [۱] از تبدیل هیلبرت برای تحلیل سیگنال نویز غیر ایستا استفاده کرده اند که در آن برای پایش وضعیت سلامت موتورهای موتور الکتریکی از روش جداسازی نویز با افزودن یک حد آستانه برای بالا بردن نسبت سیگنال به نویز استفاده شده است. مرجع [۸۸] میزان موفقیت روش تحلیل نویز صوتی را در ترکیب با توزیع وینگر ویل هموار شده برای تشخیص عیوب جعبه دنده ارزیابی کرده است.

در مرجع [۸۹] نشان داده شده است که با بیرون کشیدن اطلاعات سیگنال نویز صوتی می‌توان عمر باقی مانده ماشین را تخمین زد.

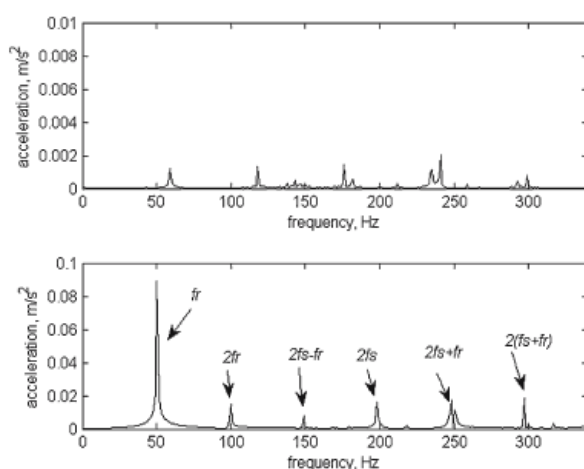
خرابی اجزای بیرینگ غلطکی منجر به تحریک فرکانس‌های خاصی می‌شود. این فرکانس‌ها می‌تواند در طیف نویز آکوستیک می‌تواند شناسایی شود. در مرجع [۹۰] یک روش خودکار برای تشخیص خرابی ارائه شده است که از سیگنال نویز صوتی ساطع شده از ماشین دوار برای تعیین عمر باقیمانده آن استفاده می‌کند.

ج. اندازه‌گیری گشتاور

با مقایسه بین گشتاور تخمین زده شده از مدل و گشتاور اندازه‌گیری شده می‌توان برخی از عیوب ماشین‌های الکتریکی را شناسایی کرد. بنابراین برای این روش ضروری است که یک مدل خوب و یک الگوریتم مناسب برای آگاهی از گشتاور واقعی فاصله‌هایی داشته باشیم. تخمین گشتاور الکترومغناطیسی به طور گسترده‌ای در درایوهای الکتریکی برای کنترل گشتاور و سرعت موتورهای AC مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین نیاز به محاسبه شار استاتور یا شار روتور وجود دارد که دقت آن مستقیماً به پارامترهای ماشین وابسته است [۹۱]. به علاوه تخمین شار در یک مدل مناسب، نیازمند اطلاع از دو پارامتر از سه

پارامتر زیر است: ولتاژ فازهای استاتور، جریان و سرعت روتور [۹۲]. در مرجع [۹۳] تخمین گشتاور در کنار تحلیل ارتعاشات پیچشی برای عیب‌یابی جعبه دنده در یک سیستم تراکشن مورد استفاده قرار گرفته و با اندازه‌گیری گشتاور تایید شده است. گوزینسکی و دیگران در مرجع [۹۴] برای تشخیص مشکلات سیستم حمل و نقل قطار پر سرعت از ناظر گشتاور بدون هر نوع سنسور اضافی استفاده کرده‌اند. ناظر معرفی شده قادر به شناسایی فرکانس‌های شبکه میز تست است که در یک جعبه دنده سالم دامنه خیلی کوچکی دارد.

از پایانه‌های ورودی، توان ثابت شامل انرژی شارژ و دشارژ شونده در سیم پیچ‌ها می‌شود. از این رو، توان ثابت نمی‌تواند معرف گشتاور ثابت باشد. از ترمینال‌های خروجی، روتور و شفت و بار مکانیکی یک ماشین دوار تشکیل دهنده یک سیستم فنر نوسانی هستند. این سیستم فنر نوسانی دارای دو فرکانس طبیعی خود است [۹۵]. تضعیف مولفه‌های گشتاور فاصله‌هایی که از طریق سیستم فنر نوسانی منتقل شده است برای هارمونیک‌های با مرتبه متفاوت، فرق می‌کند [۹۶ و ۹۷]. در حالت عدم تعادل ولتاژ گشتاور روتور قفل شده و گشتاور حالت از کار افتادگی متفاوت است. اگر نامتعادلی ولتاژ خیلی شدید باشد گشتاور ممکن است برای کارکرد کافی نباشد اگرچه سرعت در بار کامل قدری کاهش می‌یابد و این حالت می‌تواند به عنوان نشانگر دیگری از حالت نامتعادلی ولتاژ باشد [۹۸].



شکل ۱. الگوی ارتعاشی برای یک موتور الکتریکی تغذیه شده با فرکانس ۱۰۰ هرتز و لغزش ۱/۹ درصد: (بالایی) سالم و (پایینی) با ۳۷ درصد خروج از مرکز دینامیک

۳. تحلیل پارامترهای شیمیایی

تخریب عایقی می‌تواند با روش‌های خاصی که نیازمند حضور مواد خاص در گاز خنک‌کننده موتور یا ردیابی گازهای خاص مانند اوزون، کربن مونواکسید یا حتی ترکیب‌های هیدروکربنی پیچیده تر مانند استیلن و اتیلن شناسایی شود [۵۸]. وقوع تخلیه الکتریکی، گرما و برخی مشکلات مکانیکی و الکتریکی دیگر منجر به تخریب عایق‌ها می‌شوند. مواد ثانویه تولید شده می‌تواند گاز، مایع یا جامد باشد که ردیابی هر یک نیازمند روش ویژه‌ای است. در مرجع [۹۹] یک اتاقک یونش برای شناسایی محصولات ناشی از حرارت عایق‌ها طراحی شده که در یک توربو ژنراتور بزرگ به کار گرفته شده است.

آثار ذرات فلزی ناشی از ساییدگی موجود در روغن می‌تواند به دو دسته ذرات معلق فرورمغناطیسی و غیرفرورمغناطیسی دسته‌بندی شوند. هنگامی که ذرات معلق در سیم پیچ سنسور ذرات معلق القایی وارد می‌شود توزیع خطوط میدان مغناطیسی تغییر می‌کند و به همین ترتیب اندوکتانس معادل سیم پیچ تغییر می‌کند. این کار برای ذرات فلزی معلق در روغن روشی غیر تماسی و سریع بوده و می‌تواند به هر دو صورت آنالین و آفلاین انجام شود [۱۰۰].

به علاوه این که اجزای روغن نیز می‌تواند برای تشخیص خطا مورد استفاده قرار گیرد. به کمک ابزارهای جدید عیب‌یابی از تحلیل بر روی روغن برای پایش وضعیت تجهیزات همانند پایش وضعیت روغن استفاده می‌شود. خطاهای مختلفی مانند غیر

هم محوری، نامتعادلی یا اضافه بار یا تغییرات حرارتی سریع می‌تواند منجر به سایش در ماشین آلات الکتریکی شود. [۷۳]. برخی انواع تحلیل‌های روغن عبارتند از: تست چسبناکی، تست ذرات جامد، تست آب موجود در روغن، تست تعداد اسید کلی، تست مبنای کلی و تست نقطه اشتعال [۷۳].

همان‌طور که ذکر شد ذرات معلق از اولین نشانگرهای سلامت ماشین هستند. روش‌های زیادی برای ارزیابی نوع و غلظت هر یک از ذرات وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از: تحلیل طیف سنجی، تحلیل مادون قرمز، طیف‌نمایی فلوروسانس اشعه ایکس، شمارش ذرات، فروگرافی مستقیم و فروگرافی تحلیلی [۷۳].

الف. طیف‌سنجی

این روش یکی از روش‌های تحلیل اصلی است که نتایج آن بر حسب PPM (تعداد در میلیون واحد) بیان می‌شود. این روش عمدتاً به پایش ذرات ریز موجود در روغن می‌پردازد و ذرات بزرگ فلزی ردیابی نخواهند شد. برای ذرات بزرگتر روش‌های دیگری در اختیار است مانند روش هضم اسیدی، روش پردازش میکروویو، خواندن مستقیم فروگرافی و طیف‌سنجی با فیلتر روترو (RFS).

ب. تحلیل مادون قرمز

گروه‌های خاصی از اتم‌ها که گروه‌های اساسی نامیده می‌شوند با این روش ردیابی می‌شوند. یک موج با طول موج مناسب مستقیماً به نمونه‌ای که بایستی تحلیل شود تابانده می‌شود و مقدار انرژی جذب شده با این نمونه اندازه‌گیری می‌شود. مقدار انرژی جذب شده نشانگری از تعداد گروه‌های اساسی خاص موجود در نمونه است. از این رو این امکان وجود دارد که کیفیت نتایج ارزیابی شود. این روش اولی بار در سال ۱۹۷۹ معرفی شد. بعد از چند سال یک روش جدید از دل این روش به دست آمد که تحلیل مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) نام گرفت. با این روش یک پرتو از نور بر روی یک لایه نازک از روغن تحت تست متمرکز شده و سپس طول موج‌های خروجی با نور تابانده شده به روغن سالم از همان نوع مقایسه می‌شود. تفاوت‌های موجود در خواندن اطلاعاتی را با توجه به میزان خرابی روغن به دست می‌دهد.

ج. فروگرافی یا تحلیل ذرات معلق (WPA)

فروگرافی یا WPA از تحلیل میکروسکوپی برای ارزیابی تعداد ذرات، شکل آنها، ابعاد و نوع آنها بهره می‌برد. مشخصه‌های ذرات، اجازه فرآیند حذف ذرات غیر معمول شناسایی شده را می‌دهد. این تحلیل به دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد: پایش روزمره و ردیابی تعداد ذرات جامد موجود، مشاهده و تحلیل نوع ذرات.

د. اسپکتروسکوپی (XRF)

این روش نیازمند تحریک الکترون‌ها در مدارهایشان است. این امر منجر به تشعشع پرتوهای فرابنفش با فرکانس‌های مخصوص می‌شود که می‌تواند مورد تحلیل قرار بگیرد. در هنگام تشعشع اتم‌ها یک تخلیه الکتریکی رخ می‌دهد که منجر به ساطع شدن حرارت می‌شود. هنگامی که اتم‌ها به وضعیت عادی برمی‌گردند انرژی اضافه به صورت پرتوهای نور منتشر می‌شود. هر یک از اجزاء نوری در فرکانس مختلف در طیف الکترومغناطیسی ساطع می‌کند. میزان نور منتشر شده در یک فرکانس مشخص با غلظت ماده موجود در نمونه متناسب است. همچنین اتم‌ها می‌توانند با اشعه ایکس بمباران شده و تحریک شوند [۷۳].

ه. پردازش تصویر

پردازش تصویر و بینایی ماشین اطلاعات بیشتری در مقایسه با بینایی با چشم به دست می‌دهد. این روش برای جمع‌آوری اطلاعات کیفی از تصاویر ذرات معلق در روغن و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم تحلیل تصاویر برای پردازش و ذخیره‌سازی اطلاعات اعم از شکل ذرات و ویژگی‌های لبه‌های آن رشد پیدا کرده است. در مرجع [۱۰۲] ذرات به دسته‌های منظم، غیر منظم، دایره‌ای و دراز دسته‌بندی شده‌اند و پردازش تصویر برای تحلیل ذرات سایشی مورد استفاده قرار گرفته است.

۴. پایش حرارتی

با توجه به محدودیت های حرارتی بخش های مختلف ماشین های الکتریکی دوار مانند عایق ها، سیم پیچ ها و غیره داشتن یک ایده مناسب از دمای بخش های مختلف ماشین ضروری است. پایش حرارتی برای ماشین های حرارتی دو جنبه دارد یکی اندازه گیری دما و دیگری مدل سازی حرارتی که هر یک به طور مختصر در ادامه شرح داده خواهند شد.

الف. اندازه گیری دما

سه روش کلی برای اندازه گیری دمای ماشین های الکتریکی وجود دارد: (۱) اندازه گیری دما به صورت موضعی و با سنسورهای نقطه ای یا ردیاب های مقاومت حرارتی (۲) استفاده از تصاویر حرارتی که با متغیرهای مناسب تغذیه شده اند تا داغ ترین نقاط از پیش تعیین شده را تحت نظر بگیرند (۳) اندازه گیری دمای توزیع شده در اجزای ماشین یا اندازه گیری کلی سیال خروجی [۵۸].

سختی کار پایش دما عمدتاً در این بخش است: تضاد بین اندازه گیری نقطه ای که تنها اطلاعات موضعی را می دهد و اندازه گیری کلیه نقاط که کاری دشوار بوده و امکان چشم پوشی نقاط داغ موضعی در آن وجود دارد. انتخاب محل نصب مناسب سنسورهای حرارتی نیازمند دقت بالایی است. به کمک اندازه گیری دمای خنک کننده در ورودی و خروجی موتور با ترموکوپل و محاسبه میزان افزایش دما می توان اندازه گیری کلی را انجام داد. در مرجع [۱۰۳] روش غیر تماسی جدیدی برای اندازه گیری دمای نقاط داغ سیستم و ردیابی خطای بیرینگ در سیستم تراکشن راه آهن پیشنهاد شده است. البته با توجه به وجود اجزای دوار در موتورهای الکتریکی این روش ها کافی نیستند و مدل سازی حرارتی اجتناب ناپذیر به نظر می رسد.

ب. مدل سازی حرارتی

عمدتاً مدل های حرارتی ماشین های الکتریکی به دو دسته تقسیم بندی می شوند [۹۵ و ۱۰۴]: (۱) مدل مبتنی بر المان محدود (FEA) (۲) مدل حرارتی با پارامترهای توده ای (LP).

مدل المان محدود یا روش تفاضل محدود از گذشته برای مدل سازی عملکرد ماشین های الکتریکی استفاده می شده است. کاربرد آن ها تنها به تقسیم بخش روتور و استاتور به بخش های بسیار کوچک محدود می شده است و شبیه سازی کاملی از تمام ابعاد پیچیده موتور به دست نمی داده است. دقت این مدل عمدتاً وابسته به تعداد تقسیمات خانه های کوچک اختیار شده در مدل سازی بستگی دارد [۱۰۵ و ۱۰۶]. با این کار محققان می توانند مشکل پیچیدگی های هندسی را جبران کرده و زمان محاسبات را برای ساخت المان ها و محاسبه ماتریس های بزرگ کوتاه تر کنند.

از طرف دیگر مدل با پارامترهای توده ای مدار معادل حرارتی راحت حل می شود و تصویر خوبی از افزایش دمای بخش های مختلف ماشین بدون زمان محاسبات طولانی می دهد [۱۰۷]. در مرجع [۱۰۸] ادعا شده است که مدار معادل مدل حرارتی توده ای با پارامترهایی که مستقیماً از هندسه ماشین به دست می آید به سادگی به تصویر کشیده می شود. در مرجع [۱۰۴] روش پارامترهای توده ای و روش المان محدود در مدل سازی حرارتی ماشین های الکتریکی با هم مقایسه شده اند. در مدل با پارامترهای توده ای دو روش برای استخراج پارامترها وجود دارد. روش اول با استفاده از اطلاعات کلی از موتور، ابعاد فیزیکی و مواد سازنده است. روش دوم تعیین پارامترها به کمک اندازه گیری گسترده دما در نقاط مختلف موتور تحت تست است که قبلاً به آن پرداخته شد. حتی اگر موتور از موادی با جنس های مختلف ساخته شده باشد که مشخصه های متفاوتی دارند می توان ماشین را متشکل از چند بخش با پارامترهای توده ای مشابه در نظر گرفت [۹۵]. به عنوان مثال یک مدل ساده شده از یک موتور القایی و یک موتور سنکرون با آهنربای دائم که از دو بخش با پارامترهای حرارتی ساخته شده اند در مراجع [۱۰۹ و ۱۱۰] ارائه شده است. به همین ترتیب میلان فر و لانگ در [۱۱۱] یک مدل پیشرفته از ماشین الکتریکی برای تخمین دمای موتور و شناسایی خطاهای احتمالی مانند اتصال کوتاه بین حلقه ای یا خرابی بیرینگ ارائه کرده اند.

در مقاله [۱۱۳] یک مدل با پارامترهای توده ای برای یک ماشین رلوکتانسی سنکرون آهنربای دائم (PMSM) که برای پیش رانش در یک خودروی هیبرید کاربرد دارد ارائه کرده اند. آنها شیاهای استاتور موتور را به تعدادی لایه های مسی و قابل اشباع

بیضوی تقسیم کردند و سیم پیچ استاتور را با تخمین هایی مدل سازی کردند. در مرجع [۱۱۲] نیز نحوه محاسبه یک مدل با پارامترهای توده ای بر مبنای زمان برای یک موتور القایی شرح داده شده است و نشان داده شده است که چگونه این مدل حرارتی می تواند برای حداقل کردن دمای داخل موتور در حین کار مورد استفاده قرار بگیرد.

در مرجع [۱۱۴] در مورد مباحث حرارتی انواع موتور های الکتریکی با انواع روتورها صحبت شده است. همین طور در مرجع [۱۱۵] مدل حرارتی با پارامترهای توده ای ماشین های آهنربای دائم با بخش های داخلی چند لایه ارائه شده است. مرجع [۱۱۶] نشان داده است که روش های تحلیلی ممکن است در تخمین دمای نقاط داغ سیم پیچ ها خطا داشته باشند، به خصوص زمانی که ضریب پر شدگی کمتر از $0/3$ باشد. به علاوه نوسانات دمایی در جهت محوری در نظر گرفته نمی شود و دمای داغ ترین نقاط اغلب در انتهای سیم پیچ ها بالا می رود.

در مراجع [۱۱۷ و ۱۱۸] ادعا شده است که قادرند مدل روتور و استاتور را به ترتیب با تست های آفلاین حالت پایدار و حالت گذرا ارائه کنند و مدل آنها به تغییرات شرایط خنک سازی پاسخ گو خواهد بود. به هر حال مدل آنها به پارامترهای ناشناخته ماشین و تغییرات آنها وابسته خواهد بود. هم چنین با تزریق سیگنال dc اجزای مدل حرارتی ماشین های الکتریکی به دست خواهد آمد [۱۱۹ و ۱۲۰]. این مدل برای یک موتور القایی تغذیه شده با درایو اینورتر حلقه بسته در مرجع [۱۲۱] به کار گرفته شده است.

نتیجه گیری

روش های پایش وضعیت برای ماشین های الکتریکی دوار در چهار گروه مورد بررسی قرار گرفتند. این چهار گروه عبارتند از: روش های الکتریکی، مکانیکی، شیمیایی و حرارتی. در هر گروه علائم مختلفی برای پایش وضعیت مورد استفاده قرار گرفته است که به وسیله آنها ردیابی خطا انجام خواهد شد.

روش های مبتنی بر تزریق سیگنال برای عیب یابی در سیستم های با درایو حلقه بسته مناسب به نظر می رسند ولی پیاده سازی آنها به واسطه محدودیت های سخت افزاری و عملیاتی برای بسیاری از کاربردها دشوار به نظر می رسد.

روش پایش جریان موتور که محبوب ترین روش به شمار می آید عیب یابی موتور را به طریقی بی نیاز از سنسور امکان پذیر می کند ولی این روش برای کاربردهایی که در آنها بار پیوسته تغییر می کند مناسب به نظر نمی رسد. روش های تحلیل در حوزه زمان و فرکانس در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند ولی پیچیدگی و نیازمندی های سخت افزاری گران قیمت، محدودیت های این روش ها برای سیستم های درایو ساده و کم هزینه است.

تحلیل توان موتور به خاطر نیاز به هر دو سیگنال جریان و ولتاژ به طور پیوسته و وابستگی به اینرسی درایو دارای محدودیت است. پایش تخلیه جزئی عمدتاً در موتورهای بزرگ و سیم پیچ استاتور ژنراتورها مورد استفاده قرار می گیرد. بیشتر خطاهای پرتکرار در ماشین های دوار مانند غیر هم مرکزی می تواند به کمک تحلیل ارتعاشات شناسایی شود. ارتعاشات اندازه گیری شده و هارمونیک های جریان موتور به دست آمده بسیار با یکدیگر مشابه هستند. به کمک ردیابی مواد خاص شیمیایی در هوای خروجی موتور یا تحلیل روغن آن برخی عیوب نظیر خرابی عایق ها قابل تشخیص است. هم چنین اندازه گیری دما و مدل سازی حرارتی به عنوان ابزارهای مفیدی برای پایش وضعیت موتورهای الکتریکی معرفی شده اند. نهایتاً امروزه از ترکیب روش های هوشمند که خود ترکیبی از یک یا چند روش قبل هستند مانند منطق فازی یا الگوریتم های تکاملی استفاده می شود. در کنار این روش ها و الگوریتم ها امروزه موضوعات پایش وضعیت تحت وب مورد توجه قرار گرفته اند. این مقالات از یک یا چند روش عیب یابی تحت یک محیط نرم افزاری مانند LabVIEW بهره می برند که نمونه آن در مرجع [۱۳۰] بررسی شده است.

مراجع

[1] Li, Ruoyu, and David He. "Rotational Machine Health Monitoring and Fault Detection Using EMD-Based Acoustic Emission Feature Quantification." *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 61.4 (2012): 990-1001.

- [2] S.A. Mortazavizadeh, A. Vahedi and A. Zohouri, "Detection of Stator Winding Inter-turn Short Circuit In Induction Motor Using Vibration Specified Harmonic Amplitude", 2nd International Conf. on Acoustics & Vibration, Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran, Dec. 2012.
- [3] El Hachemi Benbouzid, Mohamed. "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 47.5 (2000): 984-993.
- [4] Nandi, Subhasis, Raj Mohan Bharadwaj, and Hamid A. Toliyat. "Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 17.3 (2002): 392-399.
- [5] Dorrell, David G., William T. Thomson, and Steven 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." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 33.1 (1997): 24-34.
- [6] Devaney, Michael J., and Levent Eren. "Detecting motor bearing faults." *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE* 7.4 (2004): 30-50.
- [7] Riley, Caryn M., et al. "Stator current harmonics and their causal vibrations: a preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 35.1 (1999): 94-99.
- [8] Singh, G. K., and Ahmed Saleh Al Kazzaz. "Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research—a survey." *Electric Power Systems Research* 64.2 (2003): 145-158.
- [9] Briz, Fernando, et al. "Online diagnostics in inverter-fed induction machines using high-frequency signal injection." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 40.4 (2004): 1153-1161.
- [10] Akin, Bilal, et al. "A simple real-time fault signature monitoring tool for motor-drive-embedded fault diagnosis systems." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 58.5 (2011): 1990-2001.
- [11] Kim, Byunghwan, et al. "Automated detection of rotor faults for inverter-fed induction machines under standstill conditions." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 47.1 (2011): 55-64.
- [12] Gupta, R. A., A. K. Wadhvani, and S. R. Kapoor. "Early estimation of faults in induction motors using symbolic dynamic-based analysis of stator current samples." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 26.1 (2011): 102-114.
- [13] Arthur, Neil, and Jim Penman. "Induction machine condition monitoring with higher order spectra." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 47.5 (2000): 1031-1041.
- [14] Bellini, Alberto, Giovanni Franceschini, and Carla Tassoni. "Monitoring of induction machines by maximum covariance method for frequency tracking." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 42.1 (2006): 69-78.
- [15] Peng, Z. K., Peter W. Tse, and F. L. Chu. "A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: application to fault diagnosis for rolling bearing." *Mechanical systems and signal processing* 19.5 (2005): 974-988.
- [16] Purushotham, V., S. Narayanan, and Suryanarayana AN Prasad. "Multi-fault diagnosis of rolling bearing elements using wavelet analysis and hidden Markov model based fault recognition." *NDT & E International* 38.8 (2005): 654-664.
- [17] Bruzzese, Claudio. "Analysis and application of particular current signatures (symptoms) for cage monitoring in nonsinusoidally fed motors with high rejection to drive load, inertia, and frequency variations." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.12 (2008): 4137-4155.
- [18] Bellini, Alberto, et al. "On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 38.4 (2002): 1045-1053.
- [19] Wang, KeSheng. *Vibration monitoring on electrical machine using Vold-Kalman filter order tracking*. Diss. University of Pretoria, 2008.
- [20] Bellini, Alberto, et al. "Advances in diagnostic techniques for induction machines." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.12 (2008): 4109-4126.
- [21] Bellini, Alberto, et al. "Closed-loop control impact on the diagnosis of induction motors faults." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 36.5 (2000): 1308-1329.
- [22] Cruz, S. M. A., and A. J. M. Cardoso. "Diagnosis of rotor faults in closed-loop induction motor drives." *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*. Vol. 5. IEEE, 2006.
- [23] Cruz, Sérgio MA, et al. "A new model-based technique for the diagnosis of rotor faults in RFOC induction motor drives." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.12 (2008): 4218-4228.
- [24] Jung, Jee-Hoon, Jong-Jae Lee, and Bong-Hwan Kwon. "Online diagnosis of induction motors using MCSA." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 53.6 (2006): 1842-1852.

- [25] Szabo, L., et al. "An Overview on Induction Machine's Diagnosis Methods." *Journal of Computer Science and Control Systems* 1 (2008).
- [26] Gilreath, Phil, and Brij N. Singh. "A new centroid based fault detection method for 3-phase inverter-fed induction motors." *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC'05. IEEE 36th. IEEE*, 2005.
- [27] Tu, Xiaoping, et al. "Modeling and real-time simulation of internal faults in synchronous generators with parallel-connected windings." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 54.3 (2007): 1400-1409.
- [28] Cruz, Sergio MA, and AJ Marques Cardoso. "Multiple reference frames theory: A new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 20.3 (2005): 611-619.
- [29] Akin, Bilal, et al. "DSP-based sensorless electric motor fault-diagnosis tools for electric and hybrid electric vehicle powertrain applications." *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 58.6 (2009): 2679-2688.
- [30] Tewari, Diwakar. *Symbolic dynamic models for highly varying power system loads*. Diss. Arizona State University, 2002.
- [31] Les Cottrell, R., et al. "Evaluation of techniques to detect significant network performance problems using End-to-End active network measurements." *Network Operations and Management Symposium, 2006. NOMS 2006. 10th IEEE/IFIP. IEEE*, 2006.
- [32] T. W. Kirman, Kolmogorov-Smirnov test at <http://www.physics.csbsju.edu/stats/ks-test.html> (Tutorial), 1996.
- [33] Urresty, J., J. Riba, and Luis Romeral. "Diagnosis of Inter-Turn Faults in PMSMs Operating under Non-Stationary Conditions by applying Order Tracking Filtering." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 28.1 (2013): 507-515.
- [34] Vold, Hsvard. "High Resolution Order Tracking at Extreme Slew Rates, Using Kalman Tracking Filters." *Shock Vib.*, 2.6 (1995): 507-515.
- [35] Peng, Z. K., and F. L. Chu. "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography." *Mechanical systems and signal processing* 18.2 (2004): 199-221.
- [36] Mitoma, Tetsuro, Huaqing Wang, and Peng Chen. "Fault diagnosis and condition surveillance for plant rotating machinery using partially-linearized neural network." *Computers & Industrial Engineering* 55.4 (2008): 783-794.
- [37] Douglas, H., Pragasen Pillay, and A. K. Ziarani. "Broken rotor bar detection in induction machines with transient operating speeds." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 20.1 (2005): 135-141.
- [38] Lebaroud, et al. "Classification of induction machine faults by optimal time–frequency representations." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.12 (2008): 4290-4298.
- [39] L. Cohen, *Time-Frequency Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice- Hall, 1995.
- [40] Wang, Huaqing, and Peng Chen. "Fuzzy diagnosis method for rotating machinery in variable rotating speed." *Sensors Journal, IEEE* 11.1 (2011): 23-34.
- [41] Wu, Jian-Da, and Chiu-Hong Liu. "Investigation of engine fault diagnosis using discrete wavelet transform and neural network." *Expert Systems with Applications* 35.3 (2008): 1200-1213.
- [42] Stander, C. J., P. S. Heyns, and W. Schoombie. "Using vibration monitoring for local fault detection on gears operating under fluctuating load conditions." *Mechanical Systems and Signal Processing* 16.6 (2002): 1005-1024.
- [43] Rajagopalan, S., et al. "Non-stationary motor fault detection using recent quadratic time-frequency representations." *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE. Vol. 5. IEEE*, 2006.
- [44] Junsheng, Cheng, Yu Dejie, and Yang Yu. "Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearings." *Mechanical Systems and Signal Processing* 21.2 (2007): 920-929.
- [45] Wu, Jian-Da, and Chuang-Chin Hsu. "Fault gear identification using vibration signal with discrete wavelet transform technique and fuzzy–logic inference." *Expert systems with applications* 36.2 (2009): 3785-3794.
- [46] Zheng, H., Z. Li, and X. Chen. "Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform." *Mechanical systems and signal processing* 16.2 (2002): 447-457.

- [47] Zhu, Z. K., et al. "Detection of signal transients based on wavelet and statistics for machine fault diagnosis." *Mechanical Systems and Signal Processing* 23.4 (2009): 1076-1097.
- [48] Tse, Peter W., Y. H. Peng, and Richard Yam. "Wavelet analysis and envelope detection for rolling element bearing fault diagnosis-their effectiveness and flexibilities." *Journal of Vibration and Acoustics* 123.3 (2001): 303-310.
- [49] Wu, Jian-Da, and Jien-Chen Chen. "Continuous wavelet transform technique for fault signal diagnosis of internal combustion engines." *NDT & E International* 39.4 (2006): 304-311.
- [50] Staszewski, W. J., K. Worden, and G. R. Tomlinson. "Time–frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner–Ville distribution and pattern recognition." *Mechanical systems and signal processing* 11.5 (1997): 673-692.
- [51] Meng, Qingfeng, and Liangsheng Qu. "Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution." *Mechanical Systems and Signal Processing* 5.3 (1991): 155-166.
- [52] Blodt, et al. "On-line monitoring of mechanical faults in variable-speed induction motor drives using the Wigner distribution." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.2 (2008): 522-533.
- [53] Cruz, S. M. A., et al. "Diagnosis of rotor faults in traction drives for railway applications." *Electrical Machines, 2008. ICM 2008. 18th International Conference on*. IEEE, 2008.
- [54] Legowski, Stanislaw F., A. H. M. Sadrul Ula, and Andrzej M. Trzynadlowski. "Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motors." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 32.4 (1996): 904-909.
- [55] Bellini, Alberto, et al. "Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 37.5 (2001): 1248-1255.
- [56] Stone, G. C., et al. "Development of automatic, continuous partial discharge monitoring systems to detect motor and generator partial discharges." *Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International*. IEEE, 1997.
- [57] *IEEE Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*, IEEE 1434-2000.
- [58] Tavner, P. J. "Review of condition monitoring of rotating electrical machines." *Electric Power Applications, IET* 2.4 (2008): 215-247.
- [59] Baker, P. C., et al. "Development of an integrated low-power RF partial discharge detector." *Electrical Insulation Conference, 2009. EIC 2009. IEEE*. IEEE, 2009.
- [60] Tetrault, Serge M., Greg C. Stone, and Howard G. Sedding. "Monitoring partial discharges on 4-kV motor windings." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 35.3 (1999): 682-688.
- [61] Stone, Greg, et al. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Vol. 21. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [62] Toliyat, Hamid A., and Gerald B. Kliman, eds. *Handbook of electric motors*. Vol. 120. CRC Press, 2010.
- [63] Bishop, Tom. "Squirrel cage rotor testing." *EASA Convention*. 2003.
- [64] Testing of Squirrel Cage Rotors, Elect. App. Serv. Assoc., Inc., St. Louis, MO, EASA Tech. Note 23, 2003.
- [65] McKinnon, David L. "Using a six fault zone approach for predictive maintenance on motors." *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007*. IEEE, 2007.
- [66] El Menzhi, L., and A. Saad. "Induction motor fault diagnosis using voltage Park components of an auxiliary winding-voltage unbalance." *Electrical Machines and Systems, 2009. ICMS 2009. International Conference on*. IEEE, 2009.
- [67] El Menzhi, Lamiaa, and Abdallah Saad. "Induction motor fault diagnosis using voltage spectrum of an auxiliary winding." *Electrical Machines and Systems, 2007. ICMS. International Conference on*. IEEE, 2007.
- [68] Mirimani, Seyyed Mehdi, et al. "Static Eccentricity Fault Detection in Single Stator-Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Machines." *Industrial Application, IEEE Transaction on* 48.6 (2011): 1-8.
- [69] G.G. Acosta, C.J. Verucchi, E.R. Gelso, "A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors," *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006): 953–965.
- [70] Urresty, J., et al. "Detection of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by means of the zero-sequence voltage component." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 27.1 (2012): 42-51.

- [71] Urresty, J-C., et al. "Detection of inter-turns short circuits in permanent magnet synchronous motors operating under transient conditions by means of the zero sequence voltage." *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on.* IEEE, 2011.
- [72] Briz, Fernando, et al. "Induction machine diagnostics using zero sequence component." *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005.* Vol. 1. IEEE, 2005.
- [73] Scheffer, Cornelius, and Paresh Girdhar. *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance.* Newnes, 2004.
- [74] Han, Y., and Y. H. Song. "Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 18.1 (2003): 4-13.
- [75] Rao, J. S. *Vibratory condition monitoring of machines.* CRC Press LLC, 2000.
- [76] Tavner, Peter J., and James Penman. *Condition monitoring of electrical machines.* Letchworth: Research Studies Press, 1987.
- [77] Pöyhönen, S., et al. "Numerical magnetic field analysis and signal processing for fault diagnostics of electrical machines." *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 22.4 (2003): 969-981.
- [78] Choi, Seungdeog, et al. "Performance-oriented electric motors diagnostics in modern energy conversion systems." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 59.2 (2012): 1266-1277.
- [79] Pineda-Sanchez, M., et al. "Diagnosis of induction motor faults in time-varying conditions using the polynomial-phase transform of the current." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 58.4 (2011): 1428-1439.
- [80] Yu, Yang, and Cheng Junsheng. "A roller bearing fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN." *Journal of sound and vibration* 294.1 (2006): 269-277.
- [81] J. Lin, M. J. Zuo, and K. R. Fyfe. "Mechanical fault detection based on the wavelet denoising technique," *Journal of Vibration and Acoustic* 126.1 (2004): 9-16.
- [82] Dorrell, David G., William T. Thomson, and Steven 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." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 33.1 (1997): 24-34.
- [83] J. Zhuge, "Vibration Data Collector Signal Analysis," Part of VDC User's Manual, CRYSTAL instrument, 2009.
- [84] Finley, William R., Mark M. Hodowanec, and Warren G. Holter. "An analytical approach to solving motor vibration problems." *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1999. Industry Applications Society 46th Annual.* IEEE, 1999.
- [85] Cameron, J. R., W. T. Thomson, and A. B. Dow. "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors." *IEE Proceedings B (Electric Power Applications).* Vol. 133. No. 3. IET Digital Library, 1986.
- [86] Rodríguez, Pedro Vicente Jover, et al. "Air-gap force distribution and vibration pattern of induction motors under dynamic eccentricity." *Electrical Engineering* 90.3 (2008): 209-218.
- [87] Ellison, A. J., and S. J. Yang. "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines." *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers.* Vol. 118. No. 1. IET Digital Library, 1971.
- [88] Baydar, Naim, and Andrew Ball. "A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution." *Mechanical systems and signal processing* 15.6 (2001): 1091-1107.
- [89] Scanlon, Patricia, Darren F. Kavanagh, and Francis M. Boland. "Residual Life Prediction of Rotating Machines Using Acoustic Noise Signals." (2013): 1-14.
- [90] Scanlon, Patricia, Alan M. Lyons, and Alan O'Loughlin. "Acoustic signal processing for degradation analysis of rotating machinery to determine the remaining useful life." *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2007 IEEE Workshop on.* IEEE, 2007.
- [91] Kia, Shahin Hedayati, Humberto Henao, and G-A. Capolino. "Mechanical transmission and torsional vibration effects on induction machine stator current and torque in railway traction systems." *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE.* IEEE, 2009.
- [92] Holtz, Joachim. "Sensorless control of induction motor drives." *Proceedings of the IEEE* 90.8 (2002): 1359-1394.

- [93] Henao, Humberto, Shahin Hedayati Kia, and G. Capolino. "Torsional-vibration assessment and gear-fault diagnosis in railway traction system." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 58.5 (2011): 1707-1717.
- [94] Guzinski, Jaroslaw, et al. "Application of speed and load torque observers in high-speed train drive for diagnostic purposes." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56.1 (2009): 248-256.
- [95] Mehala, N. E. E. L. A. M. "Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis." *Doctor of philosophy, Electrical Engineering, National Institute of Technology Kurukshetra, India October*(2010).
- [96] Hsu, John S. "Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 31.5 (1995): 1016-1021.
- [97] R. Maier. "Protection of squirrel-cage induction motors using instantaneous power and phase application." *Industry Application s, IEEE Transaction on* 28.2 (1992): 376-380.
- [98] Motor and Generators, NEMA Standard Publication No.MG 1- 1998 (Revision 2-2001).
- [99] Carson, C. C., S. C. Barton, and F. S. Echeverria. "Immediate Warning of Local Overheating in Electric Machines by the Detection of Pyrolysis Products." *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* 2 (1973): 533-542.
- [100] Hongbo, Fan, et al. "Study on oil detection technology based on inductive wear debris sensor." *Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI'09. 9th International Conference on. IEEE, 2009.*
- [101] Xufeng, Jiang, et al. "Study on Aero-engine Wear Fault Diagnosis by Direct Reading Ferrograph." *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on. Vol. 3. IEEE, 2011.*
- [102] Laghari, M. S., F. Ahmed, and J. Aziz. "Wear particle shape and edge detail analysis." *Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2010.*
- [103] Milic, Saša D., and Milesa Z. Sreckovic. "A stationary system of noncontact temperature measurement and hotbox detecting." *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 57.5 (2008): 2684-2694.
- [104] Boglietti, Aldo, et al. "Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56.3 (2009): 871-882.
- [105] Mellor, P. H., D. Roberts, and D. R. Turner. "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design." *IEE Proceedings B (Electric Power Applications). Vol. 138. No. 5. IET Digital Library, 1991.*
- [106] Okoro, Ogbonnaya I. "Steady and transient states thermal analysis of a 7.5-kW squirrel-cage induction machine at rated-load operation." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 20.4 (2005): 730-736.
- [107] Nerg, Janne, Marko Rilla, and Juha Pyrhonen. "Thermal analysis of radial-flux electrical machines with a high power density." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.10 (2008): 3543-3554.
- [108] Chowdhury, S. K., and P. K. Baski. "A simple lumped parameter thermal model for electrical machine of TEFC design." *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on. IEEE, 2010.*
- [109] Gao, Zhi, Thomas G. Habetler, and Ronald G. Harley. "An online adaptive stator winding temperature estimator based on a hybrid thermal model for induction machines." *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005.*
- [110] Moreno, J. Fernández, F. Pérez Hidalgo, and M. D. Martínez. "Realisation of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine." *Electric Power Applications, IEE Proceedings-. Vol. 148. No. 5. IET, 2001.*
- [111] Milanfar, Peyman, and Jeffrey H. Lang. "Monitoring the thermal condition of permanent-magnet synchronous motors." *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 32.4 (1996): 1421-1429.
- [112] Jankowski, Todd A., et al. "Development and validation of a thermal model for electric induction motors." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.12 (2010): 4043-4054.
- [113] Nategh, Shafigh, et al. "Thermal analysis of a PMSRM using partial FEA and lumped parameter modeling." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 27.2 (2012): 477-488.

- [114] Kolondzovski, Z., A. Belahcen, and A. Arkkio. "Comparative thermal analysis of different rotor types for a high-speed permanent-magnet electrical machine." *Electric Power Applications, IET* 3.4 (2009): 279-288.
- [115] El-Refaie, Ayman M., et al. "Thermal analysis of multibarrier interior PM synchronous machine using lumped parameter model." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 19.2 (2004): 303-309.
- [116] Idoughi, Laïd, et al. "Thermal model with winding homogenization and FIT discretization for stator slot." *Magnetics, IEEE Transactions on* 47.12 (2011): 4822-4826.
- [117] Lipo, Thomas A. *Vector control and dynamics of AC drives*. Vol. 41. Oxford University Press, USA, 1996.
- [118] Lee, Sang-Bin, et al. "A stator and rotor resistance estimation technique for conductor temperature monitoring." *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2000.
- [119] Zhang, Pinjia, et al. "A DC signal injection-based thermal protection scheme for soft-starter-connected induction motors." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 45.4 (2009): 1351-1358.
- [120] Zhang, Pinjia, Bin Lu, and Thomas G. Habetler. "A remote and sensorless stator winding resistance estimation method for thermal protection of soft-starter-connected induction machines." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.10 (2008): 3611-3618.
- [121] Cheng, Siwei, et al. "A nonintrusive thermal monitoring method for closed-loop drive-fed induction machines." *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*. IEEE, 2011.
- [122] Samanta, B., and C. Nataraj. "Use of particle swarm optimization for machinery fault detection." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22.2 (2009): 308-316.
- [123] Nejjari, Hamid, and Mohamed El Hachemi Benbouzid. "Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 36.3 (2000): 730-735.
- [124] Wang, Huaqing, and Peng Chen. "Sequential fuzzy diagnosis for condition monitoring of rolling bearing based on neural network." *Advances in Neural Networks-ISNN 2008*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 284-293.
- [125] Tag Eldin, E. M., et al. "Monitoring and diagnosis of external faults in three phase induction motors using artificial neural network." *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*. IEEE, 2007.
- [126] Asiri, Yahya, et al. "Neural network based classification of partial discharge in HV motors." *Electrical Insulation Conference (EIC), 2011*. IEEE, 2011.
- [127] Chandra Sekhar, S., and T. V. Sreenivas. "Adaptive spectrogram vs. adaptive pseudo-Wigner-Ville distribution for instantaneous frequency estimation." *Signal Processing* 83.7 (2003): 1529-1543.
- [128] Cayrac, Didier, Didier Dubois, and Henri Prade. "Handling uncertainty with possibility theory and fuzzy sets in a satellite fault diagnosis application." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 4.3 (1996): 251-269.
- [129] Li, Ke, Peng Chen, and Shiming Wang. "An Intelligent diagnosis method for rotating machinery using least squares mapping and a fuzzy neural network." *Sensors* 12.5 (2012): 5919-5939.
- [130] Yazidi, Amine, et al. "A web-based remote laboratory for monitoring and diagnosis of ac electrical machines." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 58.10 (2011): 4950-4959.