دانشگاه زنجان

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق – قدرت

تشخیص خطای حلقه به حلقه سیم پیچی استاتور موتورهای القایی سه فاز قفس سنجابی با در نظر گرفتن اثر اشباع مغناطیسی

نگارش:

مهدی صبوری

اساتید راهنما:

دکتر منصور اوجاقی

پروفسور جواد فیض

استاد مشاور:

دکتر وحید رشتچی

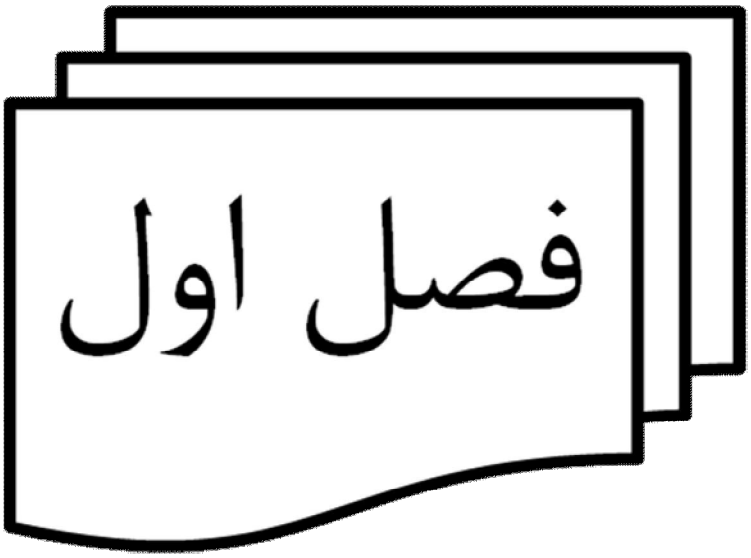
زمستان ۱۳۹۰

چکیده :

پایش وضعیت موتورهای القائی، یک فناوری کاملاً ضروری و مهم برای تشخیص به هنگام عیوب مختلف در مرحله ابتدائی است. که می‌تواند از شیوع عیب‌های غیرمنتظره در همان مراحل ابتدائی جلوگیری کند. تقریباً ۳۰ تا۴۰٪ عیوب موتورهای القائی مربوط به عیب‌های استاتور هستند. در این پایان‌نامه بررسی جامعی از عیوب مختلف موتور القائی، دلایل بوجود آورنده و روش‌های مختلف مدلسازی این عیوب صورت گرفته است. در ادامه شاخص‌های مختلف تشخیص عیب اتصال حلقه به حلقه سیم‌پیچی استاتور معرفی گردیده و از جنبه‌های مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند.

ایده اصلی این پایان‌نامه شبیه‌سازی موتور القائی معیوب با عیب اتصال حلقه به حلقه سیم‌پیچی استاتور با در نظرگرفتن اثر اشباع مغناطیسی است و شبیه‌سازی موتور القائی سه فاز معیوب با عیب اتصال حلقه به حلقه سیم پیچی استاتور، با و بدون در نظرگرفتن اثر اشباع مغناطیسی انجام گرفته است. سپس شاخص‌های مختلف این نوع عیب استخراج شده و در هر دو شرایط خطی و اشباع با نتایج عملی مقایسه شده‌اند. همچنین در این پایان‌نامه شاخص جدیدی با ویژگی‌های مطلوب‌تری جهت شناسایی عیب حلقه به حلقه سیم پیچی استاتور معرفی گردیده است و در نهایت مطلوب‌ترین شاخص از بین شاخص‌های موجود معرفی شده است.

کلمات کلیدی : عیب حلقه به حلقه سیم‌پیچی استاتور، موتور القایی، اشباع مغناطیسی، الگوریتم ژنتیک، پدیده نوسان پاندولی، اندوکتانس استاتور



مقدمه‌ای بر عیوب مختلف موتورهای القایی سه فاز و معرفی شاخص‌های عیب حلقه به حلقه سیم‌پیچی استاتور

۱-۱- مقدمه

موتورهای القایی به دلیل سادگی و استحکام ساختمان، ارزانی، محدوده وسیع سرعت و پاره‌ای مزایای دیگر کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. به همین دلیل پایش وضعیت این نوع موتورها جهت شناسایی خطاها در مراحل اولیه پیدایش آن‌ها، به ویژه در توان‌های زیاد، اهمیت زیادی دارد. بنابراین تشخیص خطای اتصال حلقه در زمان‌های اولیه وقوع آن می‌تواند مزیت‌های زیر را در بر داشته باشد:

- جلوگیری از آسیب عمده به موتور و تعمیرات زمان‌بر و پر هزینه آن.
- جلوگیری از توقف غیر منتظره خط تولید.
- کاهش تلفات.

حصول مزیت‌های فوق مستلزم اطلاع به هنگام از شدت و موقعیت (فاز) خطای اتصال حلقه موتور است. این امر معمولا از طریق آشکارسازی بعضی آثار مترتب بر رفتار موتور در اثر بروز خطا میسر است. معایب موتورهای القایی را می‌توان به سه گروه اصلی: مکانیکی، روتور و استاتور تقسیم کرد. هر کدام از این خطاها ریشه در عوامل متفاوتی دارند و آثار مختلفی بر عملکرد موتور می‌گذارند. حتی بعضی از خطاها ممکن است خود منشا بروز خطاهای دیگر شوند.

خطاهای مکانیکی عمدتاً از خطای یاتاقان‌ها (بلبرینگ‌ها) ناشی می‌شوند [۱و۲] . بعضی عوامل ایجاد خطای یاتاقان عبارتند از : روغن کاری نامناسب یا ناکافی، تنش‌های شعاعی و محوری سنگین بدلیل انحراف محور ومونتاژ، تنظیم یا فونداسیون ضعیف. این عوامل سبب تسریع در سایش و فرسایش یاتاقان ها می‌شوند. معمولا خطای یاتاقان‌ها بروز خطای نا هم‌محوری روتور و استاتور را نیز در پی دارند. تشدید خطای اخیر می‌تواند منجر به تماس سطوح روتور و استاتور شده و معایب روتور و استاتور را پدید آورد.

شکستن میله‌های روتور، شکستن حلقه انتهایی روتور و انواع نا هم‌محوری (استاتیکی، دینامیکی و مرکب) از جمله خطاهای روتور هستند [۳]. دلایل اصلی بروز این خطاها به شرح زیرند :

۱. اضافه بار حرارتی که می‌تواند حین شتابگیری، کارکرد دایم و یا توقف روتور حاصل شود.

۲. عدم تعادل حرارتی یا اختلاف دما در میله‌های روتور که از راه اندازی‌های مکرر، پدیده پوستی، انتقال حرارت غیر یکنواخت هسته و میله‌های روتور و بعضی عوامل دیگر ناشی می‌شود.

۳. اثرات مغناطیسی که منجر به وارد شدن نیروهای الکترودینامیکی شعاعی بر میله‌ها می‌شوند. این نیروها که از تاثیر متقابل شار مغناطیسی و جریان میله‌ها حاصل می‌شوند، با مربع جریان میله‌ها متناسب بوده و سبب لرزش و خمش میله‌ها در امتداد شعاعی شده و سرانجام ممکن است منجر به شکستن میله‌های روتور شوند.

۴. غیر یکنواختی ذاتی در امتداد طولی فاصله هوایی (نا هم‌محوری ذاتی) که از ایده‌آل نبودن فناوری ساخت و مونتاژ موتور ناشی می‌شود، باعث کشش مغناطیسی نامتقارن در سطوح مجاور روتور و استاتور می‌شود. زیرا روتور در سمتی که فاصله هوایی کوچکتر است تحت نیروهای کششی بزرگتری قرار می‌گیرد. این امر سبب خم شدن روتور، تشدید خطای نا هم‌محوری و در نهایت منجر به برخورد روتور با استاتور می‌شود. در نتیجه ممکن است به ساختار روتور و استاتور آسیب جدی وارد شود.

۵. افزایش تنش‌های وارد بر میله‌های روتور در اثر اضافه بار دایم یا نوسانی در طول زمان می‌تواند منجر به شکستن میله‌های روتور شود.

۶. افزایش نیروهای گریز از مرکز در اثر افزایش سرعت موتور به بیش از سرعت اسمی می‌تواند منجر به بروز تنش‌هایی در حلقه‌های انتهایی و شکستن اتصال بین میله‌های روتور و حلقه‌های انتهایی گردد.

استاتور موتورهای القایی نیز همانند بلبرینگ‌ها و روتور می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی دچار خطا شود[۳] . پنج نوع خطا برای سیم پیچ‌های استاتور گزارش شده‌اند که همه آنها ریشه در خرابی عایق سیم‌پیچ‌ها دارند [۴] این خطاها عبارتند از:

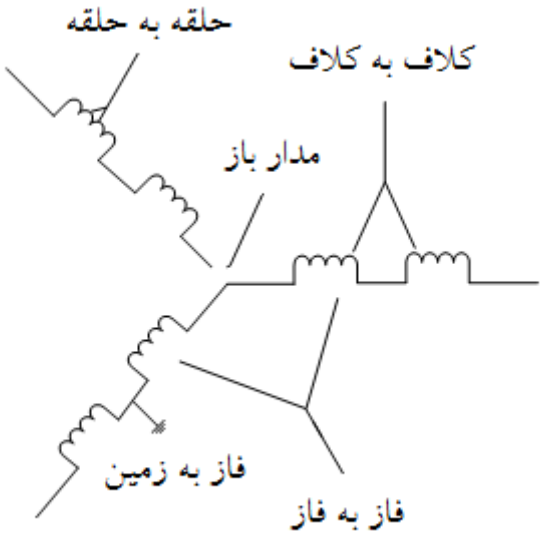
۱. خطای حلقه به حلقه در یک کلاف که در آن دو نقطه از یک یا چند حلقه از یک کلاف به همدیگر اتصال پیدا می‌کنند (خطای اتصال حلقه).

۲. خطای کلاف به کلاف در یک فاز که در آن یک نقطه از یک کلاف به یک نقطه از کلاف دیگر سیم‌پیچی همان فاز اتصال پیدا می‌کند.

۳. خطای فاز به فاز که در آن نقطه‌ای از سیم‌پیچ یک فاز به نقطه‌ای از سیم‌پیچ یک فاز دیگر اتصال پیدا می‌کند.

۴. خطای مدار باز که در آن به دلیل قطع شدگی سیم، یک فاز یا بخشی از یک فاز مدار باز می‌شود.

۵. خطای کلاف به زمین که در آن نقطه‌ای از سیم‌پیچ یک فاز به زمین (بدنه) اتصال پیدا می‌کند.



شکل ۱-۱- انواع خطاها در سیم پیچ استاتور

شکل (۱-۱) انواع خطای سیم‌پیچ استاتور را نشان داده است. یک موتور معیوب ممکن است دارای ترکیبی از خطاهای سه گانه فوق باشد. به عنوان مثال، در یک موتور ممکن است محور موتور خمیدگی پیدا کند و این امر سبب ایجاد لرزش و آسیب در بلبرینگ‌ها شده، منجر به تماس روتور با استاتور شود. با ادامه کارکرد موتور در این وضعیت گرمای بیش از حد تولید شده ممکن است میله‌های آلومینیمی روتور ذوب شوند. پخش شدن آلومینیم مذاب روی سیم‌پیچ استاتور خطای سیم‌پیچ را به دنبال می‌آورد.

حدود ۷۵ درصد از کل خرابی‌های موتورهای القایی قفس سنجابی مربوط به خطاهای استاتور و یاتاقان است خرابی بلبرینگ‌ها (خطاهای مکانیکی) ۴۰ تا ۵۰ درصد، خرابی عایق استاتور (خطای استاتور) ۳۰ تا ۴۰ درصد و خرابی قفسه روتور (خطای روتور) ۵ تا ۱۰ درصد گزارش شده است *[۶]*. اگر از پیشرفت خرابی های حلقه به حلقه جلوگیری نشود، موارد مذکور منجر به خطا فاز به زمین یا فاز به فاز می‌گردد، که البته خطا فاز به زمین محتمل‌تر است. نتایج مطالعات جامع‌تر که بر پایه یک روش آماری و برای موتورهایی با قدرت‌ها و سرعت‌های مختلف صورت گرفته نیز موید درصدهای فوق الذکر است *[۲و۷و۸]*. بنابراین خطاهای سیم‌پیچ استاتور درصد قابل توجهی از کل معایب موتور القایی را به خود اختصاص می‌دهد. لذا این پایان‌نامه بر روی خطای سیم‌پیچ استاتور تمرکز دارد.

انواع خطای سیم‌پیچ استاتور معمولا با اتصال کوتاه چند حلقه مجاور سیم‌پیچ فاز (خطای اتصال حلقه) شروع می‌شود. به این ترتیب که جریان گردشی در حلقه‌های اتصال کوتاه موجب تولید گرما و افزایش دما در ناحیه معیوب سیم‌پیچ شده و با تخریب بیشتر عایق در آن محل، منجر به خطاهای شدیدتر یعنی خطای کلاف به کلاف، خطای فاز به فاز و یا خطای فاز به زمین می‌گردد. . اگرچه اطلاعات تجربی از فاصله زمانی بین وقوع خطای اتصال حلقه تا شکست عایقی و تشدید کامل خطا وجود ندارد، ولی قدر مسلم آنست که این فرایند آنی و لحظه‌ای نیست و سرعت آن به شدت خطا، یعنی تعداد حلقه‌های اتصال کوتاه شده، وابسته است.

برای آشکارسازی خطای اتصال حلقه تاکنون شاخص‌های متعددی معرفی شده و روش‌های مختلفی هم برای اندازه گیری آن‌ها و نتیجه‌گیری در خصوص وقوع خطا ارائه شده است که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱-۲- عوامل پدید آورنده خطاهای سیم‌پیچ:

همه انواع خطای سیم‌پیچ استاتور ریشه در خرابی عایق سیم‌پیچ دارند. تنش‌های مختلفی در ساختار موتور و به ویژه استاتور ممکن است منجر به خرابی عایق سیم‌پیچ و بروز خطا شوند. این تنش‌ها در قالب تنش‌های حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و محیطی قابل دسته‌بندی هستند *[۳و۴]*:

۱-۲-۱- تنش‌های حرارتی

تنش‌های حرارتی بر اثر افزایش دمای سیم‌پیچ ها بوجود آمده و سبب کاهش طول عمر یا تخریب عایق سیم‌پیچ‌ها می‌شوند. آزمایش‌های استاندارد نشان می‌دهند که به ازای هر ۱۰ درجه سانتیگراد افزایش دمای سیم‌پیچ از حداکثر مقدار مجاز، طول عمر عایق آن به نصف تقلیل می‌یابد[۴]. عوامل افزایش ایجاد تنش حرارتی عبارتند از:

- اضافه ولتاژ : افزایش دامنه ولتاژ موجب افزایش دامنه شار ماشین، افزایش تلفات هسته، افزایش دما و ایجاد تنش حرارتی می‌شود.
- عدم تعادل ولتاژهای سه فاز : درصد اندکی عدم تعادلی در ولتاژهای سه فاز، موجب افزایش قابل توجه دامنه جریان سیم‌پیچ فازها شده و افزایش تلفات مسی ناشی از آن، افزایش دمای شدیدی را در سیم‌پیچ‌ها پدید می‌آورد. برای مثال فقط ۳/۵ درصد عدم تعادلی ولتاژها سبب ۲۵ درصد افزایش دما در سیم‌پیچ‌ها خواهد شد[۴] .
- توقف و راه اندازی‌های مکرر : در حین راه اندازی، جریان موتور بین ۵ تا ۸ برابر جریان بار کامل است. بنابراین در زمان راه اندازی تلفات اهمی قابل توجهی در سیم‌پیچ‌ها ایجاد می‌شود. حال اگر یک موتور در فواصل زمانی کوتاه بطور متناوب در معرض راه اندازی‌های مکرر قرار گیرد، تجمیع حرارت ناشی از افزایش تلفات اهمی موجب افزایش دمای سیم‌پیچ و بروز تنش حرارتی خواهد شد.
- اضافه بار : دمای سیم پیچ بطور تقریب متناسب با توان دوم بار موتور است. به عبارت دیگر دمای سیم‌پیچ با مربع افزایش گشتاور صعود می‌کند. بعنوان مثال اگر در دمای محیط ۴۰ درجه سانتیگراد یک موتور ۱۰۰ اسب بخار در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد کار کند، با ۱۵ درصد افزایش بار دمای آن به ۸۵ درجه سانتیگراد خواهد رسید. بنابراین طول عمر موتور از ۱۰۰۰۰۰۰ ساعت مفروض به ۱۶۰۰۰۰ ساعت کاهش خواهد یافت [۴].
- دمای محیط : موتورهای استاندارد معمولا برای کار در حداکثر دمای محیط معین (معمولا ۴۰ درجه سانتیگراد) طراحی می‌شوند. هر دمای محیطی فراتر از این مقدار، افزایش مشابهی را در دمای کار موتور پدید آورده باعث بروز تنش حرارتی می‌گردد.

۱-۲-۲- تنش‌های الکتریکی

تنش‌های ولتاژ الکتریکی سبب تخریب موضعی عایق الکتریکی و یا کاهش عمر عایق و در نهایت بروز خطاهای سیم‌پیچ از نوع اتصال کوتاه می‌شوند. بنابراین رابطه مستقیمی بین عمر عایق و تنش‌های ولتاژ اعمال شده به سیم‌پیچ‌ها وجود دارد [۹]. انواع تنش‌های الکتریکی موثر در این زمینه عبارتند از:

- پدیده تخریب عایق : در صورتی که در موتورهای با ولتاژ بیش از ۶۰۰ ولت سیستم الکتریکی موتور از محیط بیرون ایزوله نشده باشد، این پدیده رخ می‌دهد. فرآیند این نوع تخریب عایق بدین ترتیب است که ابتدا حفره‌های کوچک با جریان نشتی بین مس سیم و محیط آزاد ایجاد می‌شود که کاهش امپدانس بین سیم و زمین در اثر ترکیب رطوبت و مواد خارجی را به دنبال دارد. سپس با تخلیه الکتریکی جزیی به زمین و به وجود آمدن نقاط سوخته ریز در سیستم عایق الکتریکی فرآیند تخریب عایق کامل می‌شود.

- اضافه ولتاژهای لحظه‌ای : خطاهای اتصال کوتاه در سیم‌پیچ موتور می‌تواند در اثر اضافه ولتاژهای لحظه‌ای اعمال شده به سیم‌پیچ‌ها رخ دهد. منشا اینگونه اضافه ولتاژها عبارتند از [۹]:

۱. در فاز یا خط شبکه تغذیه گاهی اضافه ولتاژهایی تا ۳/۵ برابر ولتاژ اسمی با زمان خیزش بسیار کم به وجود می‌آیند. این اضافه ولتاژها در صورت رسیدن به سیم‌پیچ‌های موتور، به عایق آنها آسیب وارد می‌کنند.

۲. اضافه ولتاژهای ناشی از محدود کننده‌های جریان : زمانی که محدود کننده جریان، مثل (فیوز)، در لحظه‌ای که انرژی در میدان مغناطیسی سیم‌پیچ‌ها ذخیره شده عمل می‌کند، سبب ایجاد نوسان یا تشدید ولتاژ می‌شود. این امر با اضافه ولتاژهای لحظه‌ای همراه است و سبب آسیب به عایق سیم‌پیچ می‌شود.

۳. اضافه ولتاژهای ناشی از عملکرد در درایوهای فرکانس متغیر و در لحظات راه اندازی، توقف و نیز در تغییر سیکل‌های کاری امکان وقوع دارند. این اضافه ولتاژها با دامنه ۲ تا ۵ برابر ولتاژ اسمی و زمان خیزش از ۰/۱ تا میلی ثانیه می‌توانند به وجود آیند و تهدیدی برای عایق سیم‌پیچ‌ها به حساب می‌آیند.

۱-۲-۳- تنش‌های مکانیکی:

تنش‌های مکانیکی از نیروهای مکانیکی سرچشمه می‌گیرند. حرکت سیم‌پیچ‌ها در اثر نیروهای وارده بر آن‌ها و برخورد احتمالی روتور به استاتور از جمله مصادیق اصلی تنش‌های مکانیکی هستند که می‌توانند سبب آسیب عایق و بروز خطای سیم‌پیچ شوند.

- حرکت سیم‌پیچ‌ها : جریان سیم‌پیچ‌ها در مجاورت شار مغناطیسی، نیرویی در آن‌ها القا می‌کند که متناسب با مجذور جریان است. بنابراین نیروی مذکور در لحظات راه‌اندازی بیشترین مقدار را دارد. این نیرو سبب حرکت کلاف‌ها در شیارها شده آسیب جدی به عایق سیم‌پیچ‌ها وارد می‌کند. ماشین‌های بزرگ و پر سرعت، از این ناحیه (حرکت سیم‌پیچ‌ها) بیشتر دچار خرابی می‌شوند. افزایش دنباله سیم‌پیچ‌ها نیز سبب افزایش دامنه نیرو ، افزایش حرکت سیم‌پیچ‌ها و افزایش احتمال خرابی می‌شود.
- برخورد روتور به استاتور : دلایل متعددی برای برخورد روتور به استاتور وجود دارد. از آن جمله به موارد زیر می‌توان اشاره کرد :
  - خرابی بلبرینگ‌ها.
  - جابجایی موازی روتور نسبت به محور استاتور.
  - انحراف زاویه محور روتور نسبت به محور استاتور.

برخورد روتور به استاتور در شرایط متفاوتی پدید می‌آید. ممکن است این تصادف فقط در لحظه راه اندازی رخ دهد که در این صورت به مرور زمان ورقه‌های استاتور ضمن آسیب رساندن به عایق سیم‌پیچ با هادی آن در تماس قرار می‌گیرند و در نتیجه خطای اتصال فاز به زمین پدید می‌آید. در این شرایط ممکن است از شروع برخوردها در لحظات راه اندازی تا وقوع اتصال فاز به زمین چند سال طول بکشد. همچنین ممکن است تصادف در حین کار موتور با سرعت پایدار رخ دهد. در اینصورت خطر وقوع خطای اتصال فاز به زمین جدی‌تر است. زیرا این خطا خیلی سریع‌تر از حالت قبل پدید می‌آید. درضمن تحت این شرایط نقطه تماس به شدت گرم می‌شود تا جایی که می‌تواند منجر به ذوب آلومینیم روتور و گسترش انواع خرابی‌ها شود.

۱-۲-۴- تنش‌های محیطی:

تنش‌های محیطی از آلودگی‌های محیط ناشی می‌شوند. به دلیل عدم امکان ایزولاسیون یا درزگیری کامل موتور، این آلودگی‌ها، مانع از خشک و تمیز نگاه داشتن موتور می‌شوند. بعضی عواقب ناشی از تنش‌های محیطی عبارتند از:

- کاهش انتقال حرارت از موتور که سبب افزایش دمای کار و کاهش طول عمر عایق می‌شود.
- فرسایش و ایجاد خرابی در بلبرینگ‌ها .
- شکست سیستم عایق الکتریکی و بوجود آمدن اتصال حلقه به حلقه یا حلقه به زمین.

۱-۳- روش‌های تشخیص خطا در سیم‌پیچ استاتور

در زمینه تشخیص خطای اتصال حلقه در سیم‌پیچ استاتور موتورهای القایی تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. برخی از این تحقیقات مبتنی بر نتایج تجربی و آزمایشگاهی [۱۰-۱۶] و برخی دیگر مبتنی بر تحلیل دقیق و شبیه‌سازی عملکرد موتور تحت خطا هستند[۱۰و۱۴و۱۷و۱۸]. روش‌های موثر درتشخیص خطای اتصال حلقه را می‌توان به سه دسته تهاجمی[č]، غیر تهاجمی[č] و هوش مصنوعی تقسیم کرد.

۱-۳-۱- روش‌های تهاجمی

بروز خطا اتصال حلقه اثرات مختلفی بر انواع کمیت‌های فیزیکی، الکتریکی و مغناطیسی موتور بر جای می‌گذارد به نحوی که از این اثرات می‌توان به عنوان شاخص بروز خطا استفاده کرد. با اندازه‌گیری و آشکارسازی این اثرات (شاخص‌ها) می‌توان به وقوع خطای اتصال حلقه پی برد. در این میان اندازه‌گیری و آشکارسازی بعضی از شاخص‌ها مستلزم نصب حسگرهای ویژه در بدنه موتور است. به همین دلیل روش‌های تشخیص خطا که از این نوع شاخص‌ها استفاده می‌کنند به روش‌های تهاجمی معروف شده‌اند. در بخش زیر به اجمال این نوع شاخص‌ها معرفی می‌شوند :

[č] *Invasive*

[č] *Non Invasive*

۱-۳-۱-۱- نویز صوتی :

از نویز صوتی می‌توان به عنوان شاخص خطای سیم‌پیچ استفاده کرد[۱۹و۲۰]. طیف نویز ماشین‌های القایی، تحت الشعاع نویز صوتی، نویز تهویه هوا و نویز محرکه الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد. نویز تهویه هوا مربوط به اغتشاش هواست که ناشی از اعوجاج پریودیک فشار هوا درقسمت‌های چرخشی است. نویز محرکه الکترومغناطیسی مربوط به تنش‌های ماکسول است که در حضور یک میدان مغناطیسی روی سطوح آهنی عمل می‌کند. این تنش‌ها نوساناتی (لرزه‌هایی) در ساختار ماشین القا می‌کند که موجب نویز تشعشعی می‌شود. میزان صدای مربوط به افزایش نویز مکانیکی و آیرودینامیکی در یک محدوده ۱۲ دسی بل در هر استر (دوبلینگ) از سرعت موتور است. افزایش سرعت موتور باعث افزایش نویز محرکه الکترومغناطیسی می‌شود[۱۹].

نصب حسگر در بدنه موتور برای اندازه‌گیری این شاخص ممکن است در عملکرد موتور اختلال ایجاد کند. همچنین ممکن است کارکرد تجهیزات مجاور، حسگر را متاثر سازد و آنرا در تشخیص خطا مورد نظر سردرگم کند. همچنین ممکن است توانایی تشخیص خطای اتصال حلقه ضعیف (اتصال تک حلقه) را نداشته باشد. به علاوه نیاز به نصب حسگر موجب می‌شود این شاخص مزیت اقتصادی هم نداشته باشد.

۱-۳-۱-۲- لرزش :

لرزش قاب استاتور تابعی از خطاهای سیم‌پیچ، تک فازی و عدم تعادل ولتاژ تغذیه است [۱]. تشدید بین نیروی محرکه الکترومغناطیسی و استاتور یکی از دلایل لرزش در ماشین‌های الکتریکی است[۱۹و۲۱و۲۲]. اندازه‌گیری و آشکارسازی لرزش موجود در ماشین‌های الکتریکی مستلزم نصب حسگرهایی در بدنه موتور است و لذا معایب ذکر شده در استفاده از شاخص قبلی در مورد این شاخص هم صدق می‌کنند.

۱-۳-۱-۳- دما :

گرمای بیش از حد یکی از دلایل اساسی و بنیادین برای ایجاد خطا در موتور است [۱و۲۳و۲۴]. برای آشکارسازی افزایش دما، حسگر لازم روی سیم‌پیچ نصب می‌شود و یا در عایق جاسازی شده و

به لحاظ الکتریکی ایزوله می‌گردد[۱]. از آنجا که دمای بیش از حد در تنزل مولفه‌های کلیدی موتور مثل هادی‌های استاتور و روتور، هسته، عایق و حلقه‌های انتهائی روتور موثر است، حفاظت حرارتی یکی از مهمترین ویژگی‌های سیستم مانیتورینگ و حفاظت موتور است[۳]. در ماشین‌های القایی، عایق استاتور در برابر دمای بیش از حد آسیب پذیرتر است. بنابراین، مانیتورینگ دمای استاتور در طولانی شدن عمر مفید این نوع موتور موثر است.

این شاخص نیز قابلیت اطمینان و دقت کافی در تشخیص خطای سیم‌پیچ استاتور، مخصوصاً تشخیص خطا در مراحل اولیه (اتصال تک حلقه) ندارد. این شاخص ممکن است از عوامل دیگر مثل دمای محیط اطراف موتور، عدم عملکرد صحیح سیستم تهویه موتور و یا افزایش دمای ناشی از عدم تعادل ولتاژ تغذیه، اضافه بار و راه اندازی‌های مکرر موتور متاثر شود.

برای اندازه‌گیری دما از حسگرهای ترموکوپل یا آشکارسازهای دمای مقاومتی استفاده می‌شود که هزینه قابل ملاحظه‌ای دارند. علاوه بر این دشواری نصب و مزاحمت کابلهای مربوطه باعث شده است که تنها در ماشین های بزرگ پایش دمای موتور کاربرد داشته باشد.

۱-۳-۱-۴- تخلیه جزیی :

تخلیه جزیی، که در گذشته بعنوان کرونا شناخته می شد یک تخلیه الکتریکی (جرقه) کوچک است که بخاطر نقص عایقی و در حفره های موجود در داخل عایق اتفاق می‌افتد. ضعف ساختاری و گرمای بیش از حد دو عامل لایه لایه شدن عایق از داخل و ایجاد حفره‌های هوا در آن است [۲۵و۲۶].تخلیه جزئی می‌تواند باعث خوردگی قسمت‌های اساسی عایق و از اینرو پیری عایقی شود. آزمایش آنالیز تخلیه جزیی، یکی از روش‌های ابتدایی برای تعیین سلامت سیم‌پیچ است که بصورت به هنگام انجام می‌شود. این آزمایش اولین بار در سال ۱۹۷۶ ارائه شد و بر روی هیدروژنراتورها اعمال گردید. بعد از آن روش‌های به هنگام با استفاده از حسگرهای مخصوص توسعه یافتند. به نحوی که هم اکنون شناسایی خطا سیم پیچی استاتور با آزمایش تخلیه جزئی به هنگام به راحتی امکان‌پذیر است. یعنی بوسیله اندازه گیری مقدار تخلیه جزئی یک سیم‌پیچی، می‌توان میزان سلامتی سیم‌پیچی را تعیین کرد [۲۷-۳۰]. با این حال در این روش نیز قابلیت اطمینان و دقت کافی در

تشخیص خطای سیم‌پیچ استاتور، مخصوصا در مراحل اولیه (اتصال تک حلقه)، وجود ندارد و هزینه و مشکلات نصب حسگر از نقاط ضعف دیگر آن محسوب می‌شوند.

۱-۳-۱-۵- آنالیز گاز :

پالس‌های مدولاسیون پهنای باند فرکانس زیاد، پیک‌های ولتاژ بیش از حد تحمل عایق ایجاد می‌کند که منجر به شروع تخریب عایقی موتور می‌شود. با تخریب عایق الکتریکی داخل موتور، گاز مونواکسید کربن تولید شده و به سمت سیستم خنک کننده هوا می‌رود. مونواکسیدکربن حاصل حمله ویران‌گری را به عایق کرده و سبب شکست عایقی و پیری عایقی می‌گردد *[۳۱-۳۳]*. بنابراین آشکارسازی تولید مونواکسید کربن می تواند حاکی از شروع عمل تخریب عایق و پیدایش خطا سیم‌پیچ باشد. این آشکارسازی توسط روش جذب مادون قرمز میسر می‌شود *[۱]*.

۱-۳-۱-۶- ضربه :

از آزمایش ضربه نیز برای تشخیص خطاهای سیم‌پیچ استاتور استفاده می‌شود. در آزمایش مقایسه‌ای ضربه، به طور همزمان دو پالس ولتاژ با طیف فرکانسی کاملا برابر روی دو سیم‌پیچ از استاتور موتور القایی سه فاز اعمال شده و پالس های منعکس شده توسط اسیلوسکوپ آشکارسازی می‌شود. از مقایسه پالس های منعکس شده از سیم‌پیچ‌ها می‌توان به وجود خطاهای عایقی بین سیم‌پیچ‌ها، کلاف‌ها، و زمین پی برد *[۲]*. در واقع این آزمایش یک روش پیشگویانه برای آشکارسازی ضعف‌های عایقی قبل از وقوع اتصال حلقه است. یک وسیله الکترونیکی بنام *Surge Tester* نیز برای مکانیابی خطاهای عایقی و نامتقارنی سیم‌پیچ‌های سه فاز ساخته و به بازار عرضه شده است *[۳۴-۳۷]*. از آنجا که این آزمایش مستلزم تجهیزات اضافی خاصی است، هزینه زیادی دارد. همچنین انجام این آزمایش پیچیده است و نمی تواند به هنگام انجام شود.

۱-۳-۱-۷- سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای :

خطاهای مختلفی که موجب نامتقارنی در ساختار موتورهای القائی می‌شوند، با مانیتورینگ لرزه هسته استاتور با استفاده از سرعت لحظه‌ای *(IAS)* قابل شناسائی هستند. در مورد نامتقارنی حاصل از خطای سیم‌پیچ استاتور، سیگنال لرزه یک مولفه مهم با دو برابر فرکانس تغذیه را شامل می‌شود. از

طرف دیگر برای نامتعادلی فاز نیز افزایش چشم گیری در این مولفه قابل رویت است [۳۸]. این شاخص نیز برای اندازه‌گیری نیاز به نصب حسگر ویژه دارد و لذا مشکلات ناشی از نصب حسگر بر این شاخص هم مترتب است.

۱-۳-۱-۸- گشتاور فاصله هوایی :

گشتاور فاصله هوایی ایجاد شده توسط شارهای پیوندی و جریان‌ها در یک ماشین گردان به هرنوع عدم تقارن حاصل از وقوع خطاها و هم چنین به عدم تعادل ولتاژهای سه فاز حساس است. گشتاور فاصله هوایی با فرکانس صفر مشخص کننده سلامت موتور است. حلقه های اتصال کوتاه شده یک سیم‌پیچ استاتور را می توان مانند یک سیم پیچ تکفاز در استاتور در نظر گرفت که تولید میدان‌های گردان مستقیم و معکوس با سرعت سنکرون می‌کند. میدان گردان مستقیم این حلقه‌ها در تعامل با میدان روتور یک گشتاور ثابت تولید می‌کند در حالی که میدان معکوس آن‌ها در تقابل با میدان روتور یک گشتاور هارمونیکی با فرکانس دو برابر فرکانس تغذیه موتور پدید می‌آورد [۳۹]. از این مولفه فرکانسی گشتاور ممکن است به عنوان شاخص خطای اتصال حلقه استفاده شود. با این حال عدم تعادل ولتاژهای سه فاز نیز می‌تواند به بروز این مولفه گشتاور منجر شود. این شاخص نیز برای اندازه‌گیری نیاز به نصب حسگر در بدنه موتور دارد و لذا در روش‌های پایش وضعیت نوع تهاجمی قابلیت کاربرد دارد.

۱-۳-۱-۹- شار مغناطیسی:

هرگونه اعوجاج در چگالی شار فاصله هوائی ناشی از خطاهای استاتور، یک شار هم‌فاز محوری در محور موتور ایجاد می‌کند که می‌تواند توسط یک کلاف جستجوی نصب شده روی محور موتور حس شود [۱] و [۴۰-۴۲]. شار فاصله هوایی همچنین می‌تواند با اندازه‌گیری ولتاژ کل دو کلاف موتور که بطور مناسب جاسازی شده‌اند، حس شود [۴۰و۴۳]. با استفاده از حداقل چهار کلاف جستجو که بصورت متقارن محوری در محور موتور جاسازی شده‌اند، rms شار نشتی محوری موثر در این چهار کلاف در موتور سالم و سپس با وجود خطای اتصال حلقه اندازه‌گیری شده و از اختلاف این دو مقدار وجود خطا آشکار می‌شود. با این روش می‌توان مکان حلقه اتصال کوتاه شده را نیز تعیین کرد [۴۴].

ضعف اساسی این شاخص آن است که ممکن است بستن کلاف‌های جستجو برای اندازه‌گیری شار محوری در هر موتوری امکان‌پذیر نباشد و یا نصب آنها پیچیدگی‌های زیادی دربر داشته باشد[۴۴].

۱-۳-۲- روش‌های غیرتهاجمی

روش‌های تهاجمی در تشخیص خطا نقاط ضعف متعددی دارند. از آن جمله می‌توان ایجاد اختلال در کار موتور به واسطه نصب حسگر روی بدنه آن، تاثیرپذیری از عملکرد تجهیزات مجاور، عدم توانایی کافی در تشخیص خطاهای ضعیف، قابلیت اطمینان کم، تاثیر پذیری از عوامل جنبی غیر مرتبط با خطای موتور و هزینه‌های اقتصادی مترتب بر نصب حسگر را نام برد. در مقابل، روش‌های غیرتهاجمی برای تشخیص خطای موتور از اثرات خطا که در سیگنال‌های جریان ، ولتاژ (و یا هر کمیت الکتریکی قابل محاسبه از طریق این دو سیگنال) به عنوان شاخص خطا استفاده می‌کنند. در این صورت برای اندازه‌گیری شاخص نیازی به نصب حسگر روی بدنه موتور نیست و اندازه‌گیری می‌تواند از راه دور و در اتاق کنترل و فرمان انجام شود. بعلاوه اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان معمولا برای اهداف دیگری هم انجام می‌شود و لذا هزینه اقتصادی مجزایی بر سیستم تحمیل نمی‌شود. همچنین این سیگنال‌ها تحت تاثیر عملکرد تجهیزات دیگر قرار نمی‌گیرند. مزیت دیگر روش‌های غیرتهاجمی سادگی تحلیل آنها با استفاده از شبیه‌سازی رفتار الکترومکانیکی موتور است. به همین دلیل در سال های اخیر روش‌های غیرتهاجمی توجه زیاد محققین را به خود جلب کرده‌اند. در ادامه شاخص‌های غیرتهاجمی برای تشخیص خطای سیم‌پیچ استاتور در موتور القایی سه فاز معرفی می‌شوند.

۱-۳-۲-۱- جریان خط استاتور :

استفاده از اثرات حاصل از جریان خط استاتور منجر به معرفی یکی از اولین شاخص‌های غیرتهاجمی برای تشخیص وقوع خطای اتصال حلقه در موتور القایی شد [۴۵-۵۰]. این اثرات از تنوع قابل توجهی برخوردار هستند. در زیر به معرفی اجمالی آن ها پرداخته می شود.

مولفه های توالی مثبت و منفی و صفر برای کمیت فازوری سه فاز X به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$X0=(1/3)(X_a+X_b+X_c) \quad (۱-۱)$$

$$X+=(1/3)(X_a+aX_b+a^2X_c) \quad (۱-۲)$$

$$X-=(1/3)(X_a+a^2X_b+aX_c) \quad (۱-۳)$$

که در آن $a = e^{j2\Pi/3}$است. در یک موتور القایی متقارن و عاری از خطا، فازور جریان توالی منفی صفر است. با به وجود آمدن خطای حلقه به حلقه، جریان توالی منفی قابل توجهی بوجود می آید، و این در حالی است که جریان توالی مثبت تغییر اندکی می‌کند [۵۱و۵۲]. اگرچه جریان توالی منفی در برابر تغییرات بار مقاوم است ولی به دلیل حساسیت شدید آن به عدم تعادل ولتاژهای تغذیه و همچنین نامتقارنی‌های ذاتی موتور و تجهیزات[۵۳]، شاخص مناسبی برای تشخیص خطا اتصال حلقه به محسوب نمی‌شود.

برای بهبود این شاخص می‌توان از تغییرات جریان توالی منفی بعنوان شاخص استفاده کرد و برای احتساب اثر ولتاژهای تغذیه نامتعادل، از مدار معادل توالی منفی ماشین القایی بهره گرفت[۴۵] به گونه‌ای که با اصلاحات انجام شده، امکان تشخیص یک حلقه اتصال کوتاه شده از بین ۶۴۸ حلقه نیز فراهم شود.

برای رفع علایم نادرست خطای اتصال حلقه که از نامتعادلی ولتاژهای تغذیه، اشباع، ناهم محوری و نامتقارنی تجهیزات اندازه‌گیری ناشی می‌شوند، یک رابطه نیمه تجربی ارائه شده تا اثر این نامتقارنی‌ها را محاسبه کند[۵۰].

ازتحلیل جریان‌های خط ماشین با استفاده از تقریب بردار پارک برای تشخیص خطای اتصال حلقه استفاده شده است[۱۲و۵۴و۵۵]. از طریق نتایج شبیه‌سازی و آزمایش ثابت شده است که تحلیل جریان توالی منفی با استفاده از نظریه قاب‌های مرجع در برابر تغییرات بار، نامتعادلی‌های تغذیه و شرایط کار موتور حساس نیست و از قابلیت اطمینان کافی در تشخیص خطای اتصال حلقه برخوردار است[۱۲]. در این روش شاخص خطا به سادگی قابل اندازه‌گیری است و همچنین تجزیه و تحلیل شاخص به راحتی امکان‌پذیر است.

از آنالیز امضای جریان خط استاتور[č] (*MCSA*) موتور القایی، به خاطر سادگی آن به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود[۱۱و۱۳و۵۶-۶۱]. دامنه مولفه هارمونیک اصلی جریان استاتور را می‌توان مورد بررسی قرارداد[۱۱]. اما این شاخص در برابر عوامل جنبی مثل تغییرات بار و نوسانات تغذیه حساس بوده و لذا شاخص مطلوبی به شمار نمی‌رود. همچنین ممکن است دامنه هارمونیک سوم جریان خط را به عنوان شاخص به کار برد [۱۱و۵۶-۵۹]. هارمونیک سوم جریان خط، بر اثر فعل و انفعال یک میدان چرخشی معکوس (ناشی از وجود خطا) و تغییر نفوذپذیری ایجاد می‌شود. اما زمانی که میدان چرخشی معکوس توسط ولتاژ نامتعادل تغذیه ایجاد می‌شود، ممکن است اندازه هارمونیک سوم جریان خط شاخص مطمئنی برای تشخیص خطاهای استاتور نباشد. همچنین این شاخص نسبت به تغییرات بار و نوسانات تغذیه حساس است. از این رو شاخص مزبور قابلیت اطمینان کافی در شناسائی خطا ندارد.

هارمونیک سوم توالی مثبت و منفی جریان خط تحت شرایط کار مختلف با ترکیب هارمونیک‌های مکانی و زمانی را می‌توان به کار بست[۱۳]. این شاخص قادر به تشخیص سریع خطاست وحتی قادر است خطای تک حلقه را تشخیص دهد و در برابر نامتعادلی‌های ولتاژ و نامتقارنی‌های ساختاری موتور نیز مقاوم است.

از اختلاف فاز میان جریان‌های سه فاز، به عنوان شاخص خطای سیم‌پیچ استاتور استفاده شده است[۱۱و۶۲]. مشابه دامنه مولفه هارمونیک اصلی جریان استاتور، اختلاف فاز میان جریان‌های سه فاز استاتور، در برابر تغییرات بار و نوسانات ولتاژ مقاوم نیست و بنظر می‌رسد که عوامل زیادی ممکن است اختلاف فاز میان جریان‌های استاتور را تحت تاثیر قرار دهند.

اختلاف بین جریان توالی مثبت تحت شرایط خطا و سالم موتور تقسیم بر جریان توالی مثبت در شرایط سالم، به عنوان شاخص خطا مطرح شده است[۶۳]. ولی چون تغییرات جریان توالی مثبت در برابر خطای استاتور کم و بر عکس تغییرات آن با تغییر میزان بار زیاد است، این شاخص نمی‌تواند دقت قابل اطمینانی در تشخیص خطا داشته باشد.

[č] *Motor Current Signature Analysis*

با تغییر روابط ریاضی مدل موتور القایی سه فاز، مدل موتور مستقل از سرعت و گشتاور بدست می‌آید [۶۴] و سپس تحلیل جریان استاتور با مدل انجام می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به مستقل بودن مدل از نوسانات سرعت و گشتاور اشاره کرد و در مواردی که نوسانات گشتاور و سرعت سریع است مفید خواهد بود. از معایب این طرح آن است که این الگوریتم به پارامترهای موتور نیاز دارد و این امر لزوم تنظیم الگوریتم برای هر موتور خاص را پیش می‌آورد.

در برخی مراجع از شاخص الگوی جریان کنکوردیا[č] (*ccp*) برای شناسایی خطای سیم‌پیچ استاتور استفاده شده است [۵۵و۶۵-۶۷]. این شاخص قابلیت تشخیص خطای اتصال تک حلقه را دارا بوده و به علاوه قابلیت تشخیص نامتعادلی ولتاژ تغذیه و تشخیص سطح بار را دارد. به نظر می‌رسد از این شاخص بتوان برای تشخیص خطاهای دیگر موتور القایی نیز استفاده کرد.

۱-۳-۲-۲- توان:

از بعضی مولفه های فرکانسی طیف توان الکتریکی لحظه‌ای نیز به عنوان شاخص خطای سیم‌پیچ استاتور استفاده شده است [۹]. فرکانس این مولفه ها وابسته به خطا و مستقل از سرعت سنکرون موتور است. با به کارگیری توان لحظه‌ای، قابلیت اطمینان در تشخیص خطا در موتورهای القایی افزایش می‌یابد [۶۸]. این شاخص از عوامل جنبی مثل نامتعادلی ولتاژ تغذیه و نامتقارنی‌های ذاتی موتور و تجهیزات و تغییرات بار اثر می‌پذیرد. از آنجا که این شاخص نیاز به اندازه‌گیری ولتاژ و جریان دارد، نسبت به شاخص‌های جریان خط هزینه زیادتری در بر دارد.

۱-۳-۲-۳- ماتریس امپدانس توالی:

از تحلیل امپدانس ظاهری توالی منفی موتور القایی نیز به عنوان شاخص غیرتهاجمی تشخیص خطای سیم‌پیچی استاتور استفاده شده است [۱۱و۵۲و۶۹و۷۰]. این امپدانس از نسبت فازور ولتاژ توالی منفی به فازور جریان توالی منفی بدست می‌آیدو در برابر تغییرات بار و نوسانات ولتاژ تغذیه حساسیت کمتری دارد. از این رو می‌تواند شاخص مطلوبی برای تشخیص خطای اتصال کوتاه حلقه

[č] *Current Concordia Pattern*

به حلقه بشمار آید. از طرفی چون این شاخص نیازمند دو حسگر برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان است، گران‌تر از شاخص‌های جریان است.

از امپدانس هیبرید، که نسبت فازور ولتاژ توالی مثبت به فازور جریان توالی منفی است به عنوان شاخص خطای اتصال حلقه استفاده شده است[۷۰]. با توجه به اینکه نامتعادلی‌های تغذیه و نامتقارنی‌های ذاتی موتور نیز ایجاد جریان توالی منفی می‌کنند، به نظر می‌رسد این شاخص نیز از قابلیت اطمینان کافی در تشخیص خطا برخوردار نیست.

۱-۳-۲-۴- ولتاژ موتور:

از سیگنال‌های ولتاژ برای تشخیص خطا اتصال حلقه سیم‌پیچی استاتور استفاده شده است [۱۰و۱۴و۷۱]. بدین منظور می‌توان از جمع جبری ولتاژهای سه فاز بهره برد[۷۱]. این روش متکی بر تغییر برآیند ولتاژ فازها، به خاطر خطای حلقه به حلقه در یک فاز استاتور است. در حالت تعادل موتور، جمع جبری ولتاژها صفر است و با بروز خطا این حاصل جمع صفر نخواهد بود. لذا از مقدار موثر این حاصل جمع به عنوان پارامتری برای تشخیص خطا میتوان استفاده کرد. اگر جمع جبری ولتاژهای سه فاز در هر لحظه با $V_{sum}(t)$ نشان داده شود، در حالت تعادل موتور سالم داریم:

$$V_{sum}(t) = 0 \qquad (۴-۱)$$

اما در شرایط عدم تعادل ناشی از خطای سیم پیچ استاتور خواهیم داشت:

$$V_{sum}(t) \neq 0 \qquad (۵-۱)$$

مقدار موثر $V_{sum}(t)$ بعنوان شاخص خطای اتصال حلقه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{sum-rms}(t,T) = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}(V_{sum}(t))^2 dt} \qquad (۶-۱)$$

چون در یک موتور واقعی، تعادل کامل فازها ($Z_a = Z_b = Z_c$) در حالت سالم نیز وجود ندارد , این روش عملاً در موتور تحت بار از حساسیت اندکی برخوردار است.

از هارمونیک‌های خاص ولتاژ پایانه ماشین (که مربوط به شیار روتور است) درست پس از قطع تغذیه، بعنوان شاخص خطا استفاده شده است[۱۰]. در این جا، ولتاژهای خط ماشین درست پس از