دانشگاه زنجان
دانشکده فنی و مهندسی

گروه برق

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

گرایش قدرت

مدل سازی خطاهای موتورالقایی و استفاده از تئوری آشوب به منظور شناسایی انواع خطا

نگارش: **رضا اقمشه**

استاد راهنما: **دکتر وحید رشتچی**

اردیبهشت ۱۳۸۹

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيمِ

فصل اول

انواع خطا در موتورهای القایی و روش‌های شناسایی آن‌ها

۱-۱- مقدمه

ماشین‌های القایی بخش مهمی از محرک‌های صنعتی را تشکیل می‌دهند و به خاطر قابلیت اطمینان بالا و سادگی ساختمان آن‌ها بسیار رایج و مرسوم هستند. از جمله برتری آن‌ها نسبت به ماشین‌های DC ، نداشتن کموتاتور ، جاروبک و عدم نیاز به منبع تغذیه DC می‌باشد. همچنین ماشین‌های القایی نسبت به ماشین‌های سنکرون از قیمت کمتری برخوردارند، زیرا نیازی به منبع DC برای تغذیه روتور ندارند. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که موتورهای القایی قفس سنجابی نسبت به موتورهایی که روتور سیم‌پیچی شده دارند از لحاظ قیمت، طول عمر و کیفیت و ابعاد در وضعیت بهتری قرار دارند. از مسائل بسیار مهم در رابطه با موتورهای القایی بروز انواع خطا در این موتورها می‌باشد. در صورت تشخیص سریع خطا اولا از ضایعات بعدی ناشی از خطا جلوگیری می‌شود، ثانیا با خارج نمودن آن در ساعاتی که کمترین استفاده از آن می‌شود از ضررهای ناشی از پایین آمدن تولید محصولات جلوگیری می‌شود. بنابراین تشخیص و آشکار سازی عیب در موتورهای القایی علاوه بر بهبود کارآیی آن‌ها به طول عمر مفید آن‌ها نیز می‌افزاید. این مسأله در مورد موتورهای الکتریکی بزرگ که در نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و غیره به‌کار می‌روند بسیار حائز اهمیت است.

خطا در موتورهای القایی بر اساس قسمت‌های اصلی تشکیل دهنده آن یعنی استاتور یا روتور ویا بر حسب اینکه خطا در داخل موتور یا خارج آن اتفاق بیافتد و یا اینکه خطا از نوع الکتریکی باشد یا مکانیکی تقسیم‌بندی می‌شود. در این فصل اهمیت تشخیص خطا در تجهیزات و مقدمه‌ای بر اصول تشخیص مهندسی خطاها به طور خلاصه توضیح داده شده است. در ادامه انواع خطاهایی که در موتور القایی اتفاق می‌افتد معرفی شده و چند روش جهت شناسایی خطا مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲- مقدمه‌ای بر اصول تشخیص مهندسی

تشخیص مهندسی یا تشخیص فنی[1] در ارتباط با اجزاء، تجهیزات، دستگاه‌ها و سیستم‌های مربوط به انرژی الکتریکی مطرح است؛ همیشه تولیدکنندگان تجهیزات الکتریکی از جمله موتورها و مولدهای الکتریکی نیاز داشته‌اند که قابلیت اطمینان، طول عمر و کیفیت تجهیزات خود رابدانند و به

[1] Technical diagnostic

دنبال روش‌ها و دستگاه‌هایی بوده‌اند که این امکان را به‌صورت قابل اعتماد فراهم کند و در عین حال حتی‌الامکان برای تولیدات، غیر مخرب و غیر مضر باشد. این مسأله توسط دانشمندان دوراندیش از قبل مدنظر بوده‌است و به همراه صنعت در این راه تلاش کرده اند. نتیجه این تلاش‌ها ارائه روش‌های بی‌خطر یا کم‌خطر تست و اندازه‌گیری بوده است. بنابراین در تشخیص مهندسی توجه به دو مورد زیر لازم است:

الف- امنیت و عدم به وجود آمدن خطر برای انسان‌ها

ب- قابلیت اطمینان برای عملیات و کارکرد فنی سیستم‌ها و کاهش ریسک آن‌ها در مقابل خطاها و صدمات

با توجه به توضیحات فوق، تشخیص مهندسی، علم شناخت وضعیت سیستم‌های فنی تعریف می‌شود. هدف تشخیص مهندسی به‌دست آوردن اطلاعات در رابطه با وضعیت فنی سیستم‌ها است تا با استفاده از این اطلاعات معیارهایی مثل مقادیر مرزی ایجاد شود که با کمک این معیارها وضعیت قابل قبول برای سیستم‌ها تعیین گردد. همچنین تشخیص مهندسی با مسأله نگهداری سیستم در حالت سرویس‌دهی مطلوب سروکار دارد. برای سرویس و نگهداری سیستم‌ها سه استراتژی معروف به شرح زیر تعریف می‌شود:

۱- نگهداری مبتنی بر حوادث[1] : در این روش اصل بر تعمیر و یا تعویض تجهیزات پس از خرابی آن‌ها می‌باشد. بدین معنی که یک قطعه و یا یک وسیله آن‌قدر در شبکه کار می‌کند تا خراب شود و سپس تعمیر گردد و یا با قطعه جدید جایگزین گردد. یکی از ویژگی‌های این روش آن است که از قطعه تا آخرین لحظه عمر آن استفاده می‌گردد. همچنین در طی طول عمر قطعه هیچگونه هزینه اضافی جهت مراقبت تحمیل نمی‌کند. عیب این روش این است که ممکن است یک قطعه و یا قسمتی از تجهیز دچار ایراد گردد و این ایراد به دلیل مونیتور نشدن روز به روز بزرگتر شده و در نهایت به سیستم آسیب جدی وارد نماید.

۲- نگهداری مبتنی بر زمان[2] : در این روش اصل بر تعمیر و یاتعویض تجهیزات بر اساس جداول زمانی خاص می‌باشد. در این روش تجهیزات طبق جداول زمانی خاص تعویض و یا تعمیر می-

[1] Fault base
[2] Time interval base

شوند. بنابراین امکان برنامه‌ریزی بلند مدت و کوتاه مدت برای هزینه های مربوط به آن وجود دارد. البته از معایب این روش این است که ممکن است تجهیزاتی وجود داشته باشند که هنوز به خوبی کار می‌کنند و می‌توانند با قابلیت اطمینان مناسب به کار خود ادامه دهد ولی طبق جداول زمانی باید تعویض گردند که ضرر اقتصادی به بهره‌بردار تحمیل می‌کند. با توجه به این مسأله نیاز به یک روش نگهداری که هوشمندتر عمل کند و شرایط کاری تجهیزات را مد نظر قرار دهد احساس می‌شود.

۳- نگهداری مبتنی بروضعیت[1] : هزینه‌های نگهداری عامل مهمی است که باعث شده است شرکت‌های بهره بردار تا جای ممکن با رعایت اصول استاندارد به بهره برداری از تجهیزات بپردازند. این روش را می‌توان هوشمندانه‌تر و قابل انعطاف‌تر از روش ۲ دانست. این روش بر دو اصل زیر بنا شده است:

الف- بررسی وضعیت تجهیزات

ب- تعمیر و یا تعویض قبل از خرابی کامل

در این روش اندازه‌گیری‌ها و تست‌های مختلفی بر روی تجهیزات نصب شده انجام می‌گیرد تا وضعیت آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. این تست‌ها از تست‌های ساده ظاهری تجهیزات گرفته تا تست-های پیچیده که جهت تفسیر آن‌ها احتیاج به پردازش کامپیوتری می‌باشد. پس از انجام تست و تعیین وضعیت قطعه و یا وسیله مورد نظر، مرحله تصمیم‌گیری در مورد نحوه برخورد با تجهیز می‌باشد. در انجام تست‌های مورد نیاز در این روش هدف‌های زیر دنبال می‌گردند:

الف- جلوگیری از خطاهای ناگهانی و خطرناک به‌منظور بیشتر شدن ایمنی و کاهش هزینه‌ها

ب- برنامه‌ریزی جهت عملیات نگهداری[2] تجهیزات بر پایه نتایج به‌دست آمده از بررسی وضعیت تجهیزات مورد نظر

ج- تخمین عمر باقی‌مانده تجهیزات با توجه به وضعیت فعلی آن‌ها

این روش هزینه‌هایی را هم مثل هزینه‌های انجام تست‌ها به بهره‌بردار تحمیل می‌کند ولی در صورتیکه بتوان به‌طور مؤثر از نتایج آزمایش‌ها جهت جلوگیری از بروز خطاها استفاده نمود می‌توان هزینه‌های ناشی از استفاده از این روش را جبران نمود.

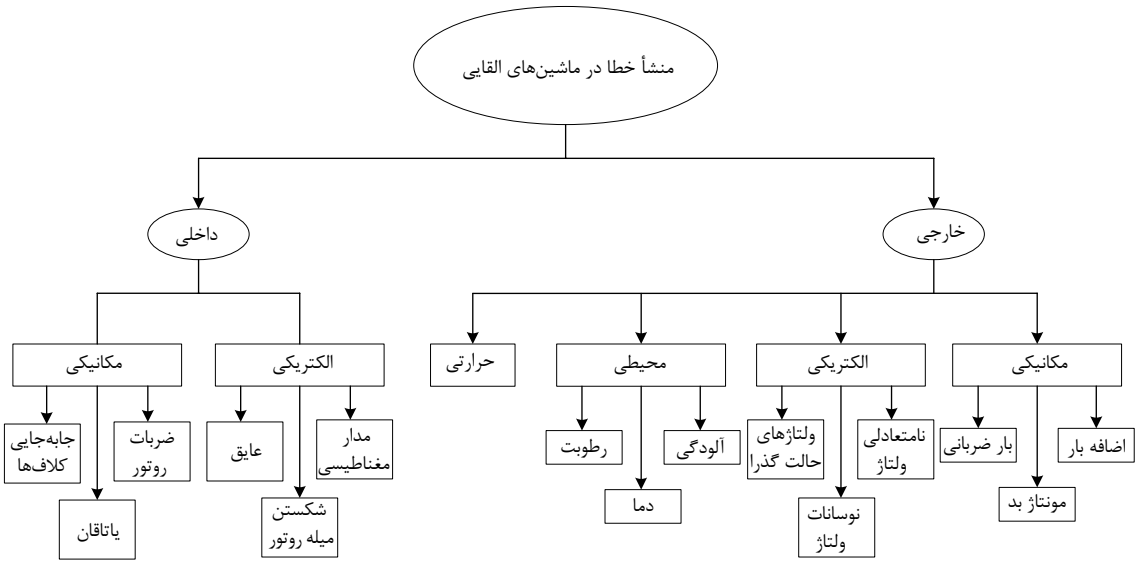
[1] Condition base
[2] maintenance

امروزه جهت شناسایی انواع خطا در ماشین‌های الکتریکی دوار که موتورهـای القـایی یکـی از پرکاربردترین آن‌ها می‌باشد از روش نگهداری مبتنی بر وضعیت استفاده می‌گردد.

۱-۳- علل ایجاد خطا در موتورهای القایی

موتورهای القایی در اثر عوامل مختلف از جمله تـنش‌هـای الکتریکـی، مکـانیکی، حرارتـی و محیطی دچار آسیب دیدگی می‌گردند. این نکته نیز قابل توجه است کـه عوامـل مولـد بعـضی از ایـن تنش‌ها مشترک هستند.

تنش‌هایی که باعث به وجود آمدن خرابی در موتور القایی می‌گردند را می‌توان به‌صـورت زیـر به دو دسته داخلی و خارجی در یک دیاگرام دسته‌بندی نمود[۱]:



شکل ۱-1- منابع خطا در ماشین‌های القایی

با توجه به اینکه تنش‌های حرارتی عوامل متعددی دارد، در دیـاگرام فـوق زیرشـاخه‌هـای آن رسم نشده است.

۱-۳-۱- علل ایجاد خطا در استاتور

۱- تنش‌های حرارتی

۲- تنش‌های الکتریکی

۳- تنش‌های مکانیکی

۴- تنش‌های محیط یا آلودگی

۱-۳-۱-۱- تنش‌های حرارتی

تنش‌های حرارتی به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

۱- پیری حرارتی:

افزایش دما باعث کاهش عمر عایقی و در نتیجه موجب خطای استاتوری می‌شود. به عنوان مثال در صورت افزایش دما به اندازه $10^{\circ}C$، عمر عایق نصف می‌شود. به این ترتیب اگر موتور در دمایی بالاتر از دمای نرمال کار کند عمر عایقی کاهش می‌یابد. تأثیر دما در پیری حرارتی می‌تواند به دو روش به حداقل برسد: کاهش دمای کاری یا افزایش کلاس مواد عایقی استفاده شده. به عنوان مثال اگر یک موتور دارای مواد عایقی کلاس B(حداکثر $130^{\circ}C$) باشد اگر از مواد عایقی کلاس F استفاده شود عمر ۱۰۰/۰۰۰ ساعت افزایش خواهد یافت.

۲- اضافه بار حرارتی:

اضافه بار حرارتی به دلال زیر رخ می‌دهد:

الف- تغییر ولتاژ: امروزه موتورها برای توان‌های بیشتر در اندازه و ساختار معینی طراحی می‌شود و به گونه‌ای ساخته می‌شوند تا ۱۰٪ تغییرات ولتاژ را تحمل نمایند؛ در صورتی که تغییرات بیش از این مقدار باشد طول عمر موتور کاهش می‌یابد.

ب- عدم تعادل در ولتاژ فازها: نامتعادلی در ولتاژ فازها باعث افزایش دما در سیم‌پیچ‌ها می‌شود. به عنوان مثال ۳/۵٪ نامتعادلی ولتاژها باعث افزایش ۲۵٪ حرارت در سیم‌پیچ می‌شود. به همین‌خاطر باید سعی شود ولتاژ منبع تغذیه سه فاز متعادل باشد.

ج- راه‌اندازی مکرر: با توجه به اینکه در لحظات راه‌اندازی، موتور پنج تا هشت برابر جریان نامی خود را می‌کشد، اگر در فواصل زمانی کوتاه به طور متناوب راه‌اندازی شود، دمای سیم‌پیچ‌ها به شدت افزایش می‌یابد. علاوه بر این راه‌اندازی مکرر باعث انبساط و انقباض سیستم عایقی شده که می‌تواند باعث شکستن عایق شود.

د- اضافه بار: دمای موتور تقریبا متناسب با توان دوم بار یا گشتاور است. به عنوان مثال اگر دمای محیط $40^{\circ}C$ باشد در یک موتور $100hp$ که در دمای $64^{\circ}C$ کار می‌کند، اگر ۱۵٪ اضافه بار داشته باشد دمای آن به $84^{\circ}C$ افزایش خواهد یافت که باعث می‌شود عمر حرارتی موتور از ۱۰۰۰/۰۰۰ به ۱۶۰/۰۰۰ ساعت کاهش یابد.

ه- انسداد تهویه: گرمای تولید شده در ماشین به وسیله هدایت، انتقال و تابش به خارج انتقال پیدا می‌کند. هر چیزی که باعث مسدود شدن جریان هوا یا تابش حرارت از موتور شود باعث افزایش دما در سیم‌پیچ‌ها خواهد شد.

و- دمای محیط: براساس استاندارد NEMA موتورها برای دمای محیط ۴۰ درجه سانتی-گراد طراحی می‌شوند. با افزایش دمای محیط طول عمر عایق سیم‌پیچ‌ها کاهش پیدا می‌کند. جدول زیر رابطه بین دمای محیط و طول عمر عایق را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱- رابطه بین دمای محیط و طول عمر عایق

عمر عایق (ساعت)	دمای محیط ($^{\circ}C$)
۲۵۰۰۰۰	۳۰
۱۲۵۰۰۰	۴۰
۶۰۰۰۰	۵۰
۳۰۰۰۰	۶۰

۱-۳-۱-۲- تنش‌های الکتریکی

تنش‌های الکتریکی را که باعث ایجاد عیب در موتورهای القایی می‌شوند، می‌توان به دی-الکتریک، تخریب عایق، کرونا و ولتاژهای گذرا تقسیم‌بندی کرد:

۱- دی‌الکتریک : یک رابطه معینی بین عمر عایقی و تنش‌های ولتاژ در مواد عایقی وجود دارد؛ این تنش‌ها به سه گروه فاز به فاز، دور به دور و دور به زمین تقسیم می‌شوند.

۲- تخریب عایق: اگر سیستم الکتریکی از محیط بیرون ایزوله نشده باشد(به‌ویژه در موتورهایی با ولتاژ بیش از ۶۰۰ ولت) این پدیده رخ می‌دهد. مکانیزم خرابی به‌صورت زیر است:

الف- حفره‌های کوچک و یا سوراخ‌هایی بین سیم مسی و محیط آزاد ایجاد می‌شود.

ب- ترکیب رطوبت و مواد خارجی یک مقاومت بین سیم مسی و زمین ایجاد می‌کنند.

ج- در اثر اختلاف پتانسیل یک جریان کوچک به سمت زمین تخلیه می‌شود که باعث ایجاد نقاط سوخته کوچک در سیستم عایقی شده و پیشرفت این شرایط باعث خطای زمین می‌شود.

۳-کرونا: این پدیده در موتورهای ولتاژ بالا($5KV$) مشکلات جدی ایجاد می‌کند. ضرایب موثر در تخلیه کرونا شامل فرکانس، ضخامت دی‌الکتریک، نوع مواد، فضاهای خالی، تنش‌های ولتاژ، ابعاد هندسی، رطوبت، تنش‌های مکانیکی و دما می‌باشد.

۴- ولتاژهای گذرا: باعث کاهش عمر سیم‌پیچ یا اتصالی‌های زودرس مثل دور به دور یا دور به زمین می‌شود. این شرایط می‌تواند ناشی از خطاهای شبکه برق مثل خطای تک‌فاز به زمین یا دوفاز و غیره و یا ناشی از کلید زنی در شبکه برق باشد.

۱-۳-۱-۳- تنش‌های مکانیکی

تنش‌های مکانیکی شامل موارد زیر می‌شود:

۱- تغییر مکان سیم‌پیچ‌ها: جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های استاتور نیرویی ایجاد می‌کند که با توان دوم جریان مناسب می‌باشد. مقدار این نیرو در لحظه راه‌اندازی بسیار زیاد است و باعث ارتعاش سیم‌پیچ‌ها می‌شود.

۲- برخورد روتور به استاتور: برخورد روتور ناشی از عوامل متعددی است که برخی از آن-ها عبارتند از: خرابی بلبرینگ‌ها، تغییر شکل محور، ناهم‌محور شدن استاتور و روتور؛ برخورد روتور باعث می‌شود در لحظه راه‌اندازی ورقه‌های استاتور خرابی‌هایی در عایق سیم‌پیچی به‌وجود آورد و لذا اتصال کلاف به زمین پیش بیاید. گاهی اوقات موتور در این شرایط سال‌ها کار می‌کند.

۱-۳-۱-۴- تنش‌های محیطی یا آلودگی

یکی از کارهای مهمی که استفاده کنندگان از موتورهای الکتریکی می‌توانند جهت جلوگیری از خرابی‌های موتور انجام می‌دهند این است که داخل و خارج موتور را تمیز و خشک نگه دارند.

آلودگی خارجی باعث کاهش انتقال حرارت، خرابی زودرس در بلبرینگ‌ها و شکست عـایقی در موتـور می‌شود.

۱-۳-۲- دلایل ایجاد خطا در روتور

تنش‌هایی که باعث ایجاد خطـا در روتـور موتورالقـایی مـی‌شـوند بـه شـش دسـته حرارتـی، مغناطیسی، مربوط به تولید، دینامیکی، مکانیکی و محیطی تقسیم می‌شود.

۱-۳-۲-۱- تنش‌های حرارتی

۱- حرارت زیاد: حرارت زیاد در موتورهای القایی در هنگام راه‌اندازی و توقف ایجاد می‌شـود. این حرارت زیاد اگر ناگهانی باشد مؤثرتر است و حتی ممکن است هادی‌ها در اثر آن ذوب شود. دلایل دیگر به وجود آمدن حرارت عبارتند از: شروع به کار غیر عادی مکـرر، توقـف روتـور ناشـی از بارهـای خیلی زیاد، سائیده شدن روتور و استاتور ناشی از بلبرینگ‌ها یا ارتعاشات غیرعـادی و بـزرگ، شکـست میله‌های روتور ناشی از فرسودگی که آن هم به علت حرکت میله‌ها یـا افـزایش دمـای حلقـه انتهـایی است. تهویه نامناسب ناشی از گرفتگی فیلتر یا کانال هوا و نامتعادلی ولتاژ

۲- توزیع غیر یکنواخت حرارت: این مشکل نیز همانند حرارت زیـاد در زمـان راه‌انـدازی اتفاق می‌افتد. عدم یکنواختی مواد سازنده روتور یکی از عوامل این تنش می‌باشد. راه‌اندازی‌های مداوم و اثر پوستی از مهمترین عوامل توزیع غیر یکنواخت حـرارت محـسوب مـی‌شـوند. همچنـین هـر چـه سرعت نامی روتور و طول روتور بیشتر باشد اثر این نامتعادلی بیشتر خواهد بود.

۳- نقاط داغ: عواملی که باعث به وجود آمدن این شرایط می‌شوند عبارتنـد از: آلـوده شـدن ورق‌ها در شیارها یا سطح روتور، تفاوت فاصله بین میله‌های روتور و ورق‌ها در ناحیـه شـیارها، سـست شدن ورق‌ها و عدم تقارن در آن‌ها، توزیع غیر یکنواخت تلفـات در ورق‌هـا، طراحـی نادرسـت ورق‌هـا، اتصال نامناسب میله‌های روتور به حلقه‌های انتهایی

۴- جرقه زدن روتور: جرقه‌هایی که در حین کار عادی موتور پدید می‌آیند معمولا در ایجاد خطا نقشی ندارند. زیرا در این شرایط مقدار جریان پایین است و به دلیل کوچک بودن امپدانس روتور احتمال جرقه زدن کم است. ولی در هنگام راه‌اندازی به دلیل زیاد بودن جریان روتور یک افت ولتاژ در

دوسر میله‌ها به وجود می‌آید و باعث می‌شود جریان گذرنده از میله مسیر خود را از درون ورقه‌های روتور ببندد.

نیروهای مغناطیسی حاصل از جریان‌های بالا در موقع راه‌اندازی باعث لرزش میله‌های روتور می‌شوند. این ارتعاش‌ها در مرز شیارهای روتور باعث قطع و وصل شدن متناوب جریان جاری بین میله‌ها و ورق‌ها می‌شود که نتیجه آن پیدایش جرقه قابل توجه می‌باشد.

۱-۳-۲-۲- تنش‌های مغناطیسی

۱- ارتعاشات و نویزهای الکترومغناطیسی: نیروهای شعاعی که توسط مجموعه‌ای از هارمونیک‌های استاتور و روتور تولید می‌شوند می‌توانند ایجاد نویز یا ارتعاش کنند. دلیل عمده این نیروها از ناهمگونی فاصله هوایی می‌باشد که خود ناهمگونی ناشی از خروج از مرکزیت روتور واستاتور باشد. میزان ارتعاش در بار کامل بیشتر از بی‌باری است.

۲- حوزه مغناطیسی نامتعادل: در یک موتور ایده‌آل روتور در مرکز فاصله هوایی قرار دارد و فاصله هوایی متقارن می‌باشد. در این شرایط نیروهای الکترومغناطیسی متعادل‌اند و باعث هیچ انحرافی در روتور نمی‌شوند، ولی در مراحل ساخت علی‌رغم دقت فراوان همواره مقداری غیر یکنواختی در فاصله هوایی به وجود می‌آید که ناشی از ورق روتور، عدم تقارن محل بلبرینگ‌ها و غیره می‌باشد. در صورت بروز این مسأله، فاصله هوایی بین روتور و استاتور در یک طرف زیاد و در طرف دیگر کم می‌شود و این امر باعث عدم تقارن در مقاومت مغناطیسی و به تبع حوزه مغناطیسی شده و در نتیجه در نقاطی که فاصله هوایی کمتر است چگالی شار بیشتر می‌شود و در نتیجه نیروهای نامتعادل بر روتور اعمال می‌شود و تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که فاصله هوایی به صفر نزدیک شود. البته این در عمل اتفاق نمی‌افتد، زیرا سختی زیاد محور مانع بروز این حالت می‌شود.

عوامل کشش روتور تابعی از فاصله هوایی، متحدالمرکز بودن، چگالی شار فاصله هوایی می‌باشد. در موقع راه‌اندازی که آمپردور بزرگ است نیروهای کششی بیشتر می‌شود و اگر روتور به استاتور برخورد کند معمولا صدایی تولید می‌کند که قابل شنیدن است. این تماس ممکن است باعث خرابی ورق‌های روتور و استاتور شود.

۳- نیروهای الکترومغناطیسی: به واسطه عبور جریان از میله‌های روتور نیروهایی بر هادی‌های روتور وارد می‌شود که این نیروها نسبت مستقیم با مجذور جریان روتور دارند. این نیروها سعی بر جابه‌جا نمودن میله‌ها به‌طور شعاعی دارند که باعث نوسان میله‌ها با فرکانس دو برابر فرکانس روتور می‌شود. نیروهای شعاعی عمل کننده بر میله‌های روتور باعث خم شدن آن‌ها می‌شوند. اگر انحراف و خمیدگی به اندازه کافی بزرگ باشد، فرسودگی(خستگی) در میله‌ها به وجود می‌آورد. به ویژه در راه‌اندازی مقدار این نیروهای شعاعی باعث یک خمش بزرگ در میله‌های روتور می‌شوند.

به عنوان مثال اگر پیش‌بینی‌هایی برای جلوگیری از حرکت میله‌ها در نظر گرفته نشود و زمان شتاب‌گیری به طور متوسط ۱۱ ثانیه در نظر گرفته شود، در آن صورت تقریبا موتور بعد از ۴۰۰۰ بار راه‌اندازی دچار خرابی می‌شود. در حالی که اگر میله‌ها محکم شوند نشان داده شده است که بدون هرگونه خرابی موتور از ۵۰/۰۰۰ تا ۱۰۰/۰۰۰ بار می‌تواند راه‌اندازی شود[۱].

۱-۳-۲-۳- تنش‌های مربوط به تولید

این تنش‌ها مربوط به عدم تقارن از لحاظ هندسی می‌باشند که در هر دو نوع محوری و شعاعی ظاهر می‌شوند. علت این تنش‌های باقیمانده در مراحل ساخت مانند مشکلات در قالب‌ریزی، جوشکاری، تراشکاری و غیره می‌باشد. اگر هر کدام از این عوامل ابعاد ماشین را تغییر دهند، باعث ایجاد ارتعاش می‌شوند.

۱-۳-۲-۴- تنش‌های دینامیکی

این‌گونه تنش‌ها در اثر کار غیر استاندارد موتور القایی پدید می‌آیند و به طراحی موتور ارتباطی ندارند. این تنش‌ها در سه دسته زیر قرار می‌گیرند.

۱- تنش‌های چرخشی: این تنش‌ها باعث ایجاد خستگی در محور موتور می‌شوند. این تنش‌ها در اثر اتصال نادرست بار به محور موتور، کاربرد نادرست تجهیزات درایو و غیره به وجود می‌آیند و باعث آسیب رساندن به محور روتور می‌شوند.

۲- نیروهای گریز از مرکز: در طراحی موتورها حد مجازی برای نیروهای گریز از مرکز در نظر گرفته شده است. به‌طوری که اگر سرعت موتور از حد مجازی بالاتر رود این نیروها نیز که در

ارتباط با سرعت موتور می‌باشند از حد مجاز بالاتر رفته و باعث ایجاد خطا در موتور می‌شوند. براساس استاندارد NEMA برای موتورهای دوقطبی حد ۲۵٪ و برای موتورهایی با سرعت کمتر، حد ۲۰٪ افزایش سرعت از مقدار نامی در نظر گرفته شده است.

۳- گشتاور محور: در طراحی، حد مجازی برای حداکثر گشتاور اعمال شده به محور موتور در نظر گرفته شده است. هر مقدار از این گشتاور به‌گونه‌ای که از حد مجاز فراتر رود باعث ایجاد تنش روی محور می‌شود. این گشتاورها معمولا در راه‌اندازی، خارج شدن یک فاز و غیره اتفاق می‌افتد.

۱-۳-۲-۵- تنش‌های محیطی

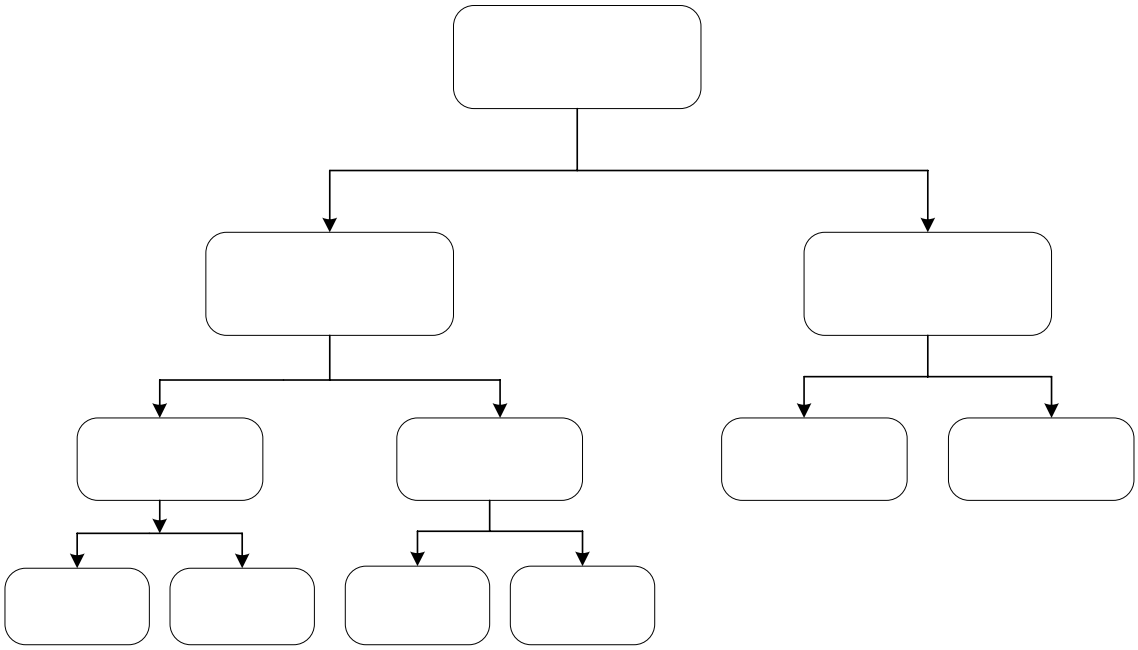
شرایط محیطی که در طول عمر روتور تأثیر دارند به عنوان تنش‌های محیطی بیان می‌شوند. شرایط محیطی نامناسب باعث کاهش عمر مفید روتور می‌شوند. مواد خارجی که باعث فرسودگی یا مانع تهویه می‌شوند به عنوان یک تنش می‌تواند ظاهر شوند. همچنین مواد شیمیایی و رطوبت باعث ایجاد مشکلات در روتور می‌شوند. وقتی مقدار رطوبت زیاد باشد به ویژه در موتورهای با فاصله هوایی کوچک این مشکلات شدیدتر است.

۱-۳-۲-۶- تنش‌های مکانیکی

علاوه بر موارد مذکور گروه وسیعی از عوامل وجود دارند که باعث به وجود آمدن خرابی در روتور می‌شوند. این عوامل را به عنوان تنش‌های مکانیکی گروه‌بندی می‌کنیم؛ این عوامل عبارتند از: وجود منافذ در ریخته‌گری، شل شدن ورق‌ها، فرسودگی یا شکست برخی اجزاء، ناهم محوری روتور و استاتور، خرابی بلبرینگ‌ها و مواد نامناسب.

۱-۴- عیب‌های متداول در موتورهای القایی

عیب‌های موتورالقایی را می‌توان به شکل‌های مختلفی دسته‌بندی کرد. در این دسته بندی ها خطاهای موتور بر اساس ماهیت الکتریکی یا مکانیکی خطا و یا بر حسب اینکه خطا در استاتور یا روتور اتفاق افتاده تقسیم‌بندی می‌شوند. دیاگرام صفحه بعد دسته بندی انواع خطا در موتور القایی را نشان می‌دهد.



شکل 1-۲- تقسیم‌بندی خطاهای موتور القایی

در زیر به عیوب متداول قسمت‌های مختلف موتور القایی پرداخته می‌شود.

۱-۴-۱- عیب‌های متداول در استاتور

در موتورهای القایی، استاتور مجموعه‌ای از سیم‌پیچ‌های چند فازی است که تولید میدان مغناطیسی گردان می‌کند. سیم‌پیچی هر فاز استاتور شامل چند گروه موازی از کلاف‌هاست. کلاف‌های هر گروه نیز از اتصال موازی یا سری کلاف‌های متعددی تشکیل می‌شود. کلاف‌ها نیز از اتصال سری یا موازی حلقه‌های سیم‌پیچی ایجاد می‌شود. عایق‌بندی این سیم‌پیچ‌ها عامل بروز عیوب متعددی هستند که در ادامه هر کدام از آن‌ها شرح داده می‌شود.

۱-۴-۱-۱- اتصال کوتاه حلقه به حلقه

در این حالت دو یا چند حلقه از یک کلاف سیم‌پیچ‌های استاتور اتصال کوتاه شده و جریانی بیش از حد مجاز از حلقه‌های اتصال کوتاه شده می‌گذرد. چنین جریانی می‌تواند منجر به گرم شدن و حتی ذوب شدن تدریجی عایق سیم‌پیچ‌های استاتور شود. بنابراین عدم تشخیص چنین عیب کوچکی می‌تواند در درازمدت موجب اتصال کوتاه قسمت بیشتری از سیم‌پیچی استاتور و در نهایت باعث

سوختن آن شود. در فازی که اتصال کوتاه حلقه به حلقه رخ داده است MMF سیم‌پیچی فاز تغییر می‌کند و اندوکتانس متقابل آن فاز با بقیه مدارهای ماشین تغییر می‌کند. علاوه بر این یک فاز جدید که فاز اتصال کوتاه شده نامیده می‌شود به مجموعه سیم‌بندی ماشین اضافه می‌شود. اگر چه این فاز تماس رسانایی با فازهای دیگر ندارد اما با مدارهای روتور و استاتور تزویج مغناطیسی دارد. این فاز به صورت یک مدار در مدل ماشین ظاهر می‌شود.

۱-۴-۱-۲- اتصال کوتاه کلاف به کلاف

در صورتی‌که دو یا چند کلاف از سیم‌پیچ‌های یک فاز استاتور اتصال کوتاه شوند، اتصال کوتاه کلاف به کلاف رخ می‌دهد. این عیب می‌تواند نتیجه پیشرفت تدریجی اتصال کوتاه حلقه به حلقه باشد. در این حالت شدت عبور جریان غیر مجاز سیم‌پیچی بیشتر از جریان اتصال کوتاه حلقه به حلقه است.

۱-۴-۱-۳- اتصال کوتاه فاز به فاز

اتصال کوتاه فاز به فاز حالت کلی تری از اتصال کوتاه کلاف به کلاف است که در آن دو یا چند فاز استاتور اتصال کوتاه می‌شود. این عیب به مراتب شدیدتر از اتصال کوتاه حلقه به حلقه و کلاف به کلاف است. در این حالت فازهای اتصال کوتاه شده هر کدام به دو فاز تبدیل می‌شوند.

۱-۴-۱-۴- قطع سیم‌پیچ‌های استاتور

به‌هنگام قطع یک یا چند حلقه از سیم‌پیچ‌های استاتور توزیع متقارن سیم‌پیچ‌های استاتور به هم می‌خورد. بنابراین هارمونیک‌های اضافی در میدان مغناطیسی استاتور ایجاد می‌شود. این امر منجر به افزایش تموج[1] گشتاور و سرعت ماشین می‌شود. احتمال وقوع این عیب در استاتور کمتر از بقیه عیوب می‌باشد.

[1] Ripple

۱-۴-۱-۵- اتصال کوتاه فاز به زمین

این عیب شدیدترین عیب ممکن در سیم‌پیچ‌های استاتور است که می‌تواند منجر به از بین رفتن سریع عایق سیم‌پیچ‌های استاتور و سوختن آن‌ها شود. تعمیر سیم‌پیچی سوخته در صورت امکان نیز بسیار مشکل است. این عیب می‌تواند نتیجه پیشرفت و عدم جلوگیری از عیب‌های کوچک‌تری مانند اتصال کوتاه حلقه به حلقه و یا کلاف به کلاف باشد.

۱-۴-۲- عیوب متداول روتور

در موتورهای القایی بزرگ، روتور قفسی را از میله‌های مسی می‌سازند اما در موتورهای کوچک قفس آلومینیومی را درون یک استوانه آهنی تزریق می‌کنند تا به استحکام روتور بیافزایند. گاهی دو قفس درون روتور جا می‌دهند که به این روتورها روتور قفس مضاعف می‌گویند. همچنین به منظور کاهش هارمونیک‌های اضافی جریان، میله‌های روتور را به‌صورت مورب قرار می‌دهند.

۱-۴-۲-۱- شکستگی میله‌های روتور

حدود ۵٪ تا ۱۰٪ عیب‌های متداول در موتورهای قفسه‌ای به دلیل شکستگی ویا ترک-خوردگی میله‌های روتور و یا حلقه‌های انتهایی آن است[۲]. دلایل زیر موجب شکستگی و یا ترک-خوردگی میله‌های روتور می‌شوند[۳]:

۱- تنش‌های حرارتی که در اثر اضافه‌بار و توزیع غیریکنواخت حرارت ایجاد می‌شود.

۲- تنش‌های مغناطیسی که به علت نیروهای الکترومغناطیسی، نیروهای نامتقارن مغناطیسی و ارتعاشات مغناطیسی ایجاد می‌شود.

۳- تنش‌های باقیمانده در مرحله ساخت

۴- تنش‌های دینامیکی ناشی از گشتاور محور و نیروهای گریز از مرکز

۵- تنش‌های محیطی در اثر آلودگی و سائیدگی مواد روتور توسط مواد شیمیایی و رطوبت

۶- تنش‌های مکانیکی ناشی از خستگی مکانیکی قسمت‌های مختلف، خرابی بلبرینگ و غیره

۱-۴-۲-۲- شکستگی حلقه انتهایی

در این حالت اتصال بین یک یا چند میله قفس روتور با حلقه انتهایی قفس یا خود میله انتهایی ترک می‌خورد و یا می‌شکند[۴]. همه دلایلی که منجر به ترک خوردگی و یا شکستگی میله-های روتور شود می‌توانند منجر به این نوع عیب نیز گردند.

۱-۴-۳- خطاهای مکانیکی

به آن دسته از عیب‌هایی که مربوط به دلیل نقص در قسمت‌های مکانیکی موتورهای الکتریکی مانند بلبرینگ‌ها و در چرخ دنده رخ می‌دهد، عیب‌های مکانیکی گفته می‌شود. مهمترین این عیب‌ها عبارتند از[۵]:

۱-۴-۳-۱- عیب‌های بلبرینگ

بلبرینگ‌ها امروزه به دلیل ساختار ساده و انواع متنوع، کاربرد بسیار زیادی در صنعت دارند. اصلی ترین قطعات تشکیل دهنده یک بلبرینگ، رینگ داخلی، رینگ خارجی، المان‌های چرخنده و قفسه هستند. عیب‌های موجود در بلبرینگ‌ها به دلایل مختلفی ایجاد می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱- آسیب‌های مکانیکی

۲- عیب‌های شکستگی

۳- آسیب‌های ناشی از سایش

۴- روغن‌کاری نامناسب و ناکافی

۵- تنش‌های شعاعی و محوری سنگین به دلیل انحراف محور

۶- مونتاژ یا تنظیم ضعیف

لازم به ذکر است که بروز خطای بلبرینگ‌ها می‌تواند سبب خروج از مرکزیت دینامیکی و یا استاتیکی روتور شود.

۱-۴-۳-۲- ناهم‌محوری روتور و استاتور

در این حالت به دلایلی همچون مسائل و مشکلات دانش فنی ساخت هسته‌ها و نصب روتور و همچنین مشکلات مکانیکی فرسایش بلبرینگ‌ها و غیره تطابق محورهای تقارن روتور، تقارن استاتور و چرخش روتور به هم می‌خورد و فاصله هوایی به‌صورت غیر یکنواخت در می‌آید. تقریبا ۸۰٪ عیب‌های مکانیکی منجر به ناهم‌محوری روتور و استاتور می‌شود[۶].

در بسیاری از تقسیم‌بندی‌ها، عیب‌های ناهم‌محوری یک دسته جداگانه از عیب‌های احتمالی موتور به شمار می‌روند. با این حال از آن‌جا که این عیب موجب نامتقارنی وضعیت مکانیکی روتور و استاتور نسبت به یکدیگر می‌شود، جزء عیب‌های مکانیکی در نظر گرفته شده است. انواع این عیب‌ها عبارتند از:

۱- ناهم‌محوری ایستا: در این حالت توزیع فاصله هوایی غیر یکنواخت است ولی موقعیت زاویه‌ای فاصله هوایی ثابت است. این حالت بیشتر به دلیل بی‌دقتی در نصب روتور اتفاق می‌افتد.

۲- ناهم‌محوری پویا: در این حالت فاصله هوایی به‌صورت تابعی از موقعیت زاویه‌ای روتور بوده و پیرامون روتور می‌چرخد. این حالت ممکن است ناشی از خمیدگی محور روتور باشد[۷].

۳- ناهم‌محوری مرکب: در صورتی‌که هر دو ناهم‌محوری ایستا و پویا اتفاق بیفتد، ناهم-محوری را مرکب می‌گویند.

۱-۴-۴- آمار بروز عیب در ماشین‌های الکتریکی

باتوجه به کاربرد وسیع موتورهای القایی در صنعت می‌بایستی همواره محافظت مناسبی جهت پیشگیری از حالت عیب از آن‌ها به عمل آید. بنابراین دانستن احتمال وقوع انواع خطا در این موتورها حائز اهمیت است. گزارش آماری وقوع عیوب مختلف در موتورهای القایی که مؤسسات IAS [1] و EPRI [2] که به ترتیب ۱۱۴۱ و ۶۳۱۲ موتور القایی را مورد بررسی قرار داده‌اند در جدول (۱-۲) آورده شده است[۸ و ۹].

[1] IEEE-Industry Applications
[2] Electrical Power Research Institute

جدول ۱-۲- درصد وقوع عیوب در موتورهای القایی

عیوب موتور	آمار IAS (درصد وقوع خطا)	آمار EPRI (درصد وقوع خطا)
بلبرینگ‌ها	۴۴	۴۱
سیم‌پیچ‌ها	۲۶	۳۶
روتور	۸	۹
سایر عیوب	۲۲	۱۴

همان‌طور که در جدول فوق دیده می‌شود خطاهای بلبرینگ و سیم‌پیچ‌ها جزء عمده خطاهای موتور القایی می‌باشد. از طرف دیگر تقریبا ۳۰٪ تا ۴۰٪ خطاها در موتور مربوط به سیم‌پیچ‌ها و روتور می‌باشد که این نشان‌دهنده سهم مساوی عیوب الکتریکی و مکانیکی در موتورهای القایی است. بنابراین بررسی هر دو نوع عیب در موتورهای القایی حائز اهمیت است.

۱-۵- روش‌های تشخیص خطا در موتورهای القایی

در سه دهه گذشته تحقیقات زیادی در زمینه تشخیص خطا در موتورهای القایی انجام شده است. این تحقیقات از سال ۱۹۸۲ توسط Delori, Williamson, Smith به منظور شناسایی خطاهای روتور آغاز شد[۱۰-۱۲]. در سال ۱۹۸۴، Williamson و Mirzoian تحقیقات خود را در زمینه شناسایی خطاهای استاتور ادامه دادند[۱۳و۱۴]. نخستین بار، Thomson در سال ۱۹۸۶ روشی را جهت شناسایی خطای ناهم‌محوری روتور و استاتورارائه کرده است[۱۵]. همچنین Schoen در سال ۱۹۹۵ روشی برای تشخیص خطای بلبرینگ‌ها ارائه کرده است[۱۶].

ملاحظه می‌شود که محققین از چند دهه پیش به فکر شناسایی عیوب الکتریکی و مکانیکی موتورهای القایی بوده‌اند. برای شناسایی خطاها از روش‌های متعددی استفاده شده است که برخی از آن‌ها عبارتند از:

۱- طیف فرکانسی استاتور

۲- استفاده از جهت بردار مکانی میدان مغناطیسی روتور

۳- بردار جریان پارک

۴- سیم‌پیچ جستجوگر