دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق ـ قدرت

عیب یابی سیم پیچ‌های استاتور در ژنراتورهای سنکرون

Stator Turn Fault Detection in the Synchronous Generators

نگارش: **سید حمید رفیعی**

استاد راهنما: **دکتر منصور اوجاقی**

استاد مشاور: **پرفسور جواد فیض**

زمستان ۹۱

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس مخصوص ذات باری تعالی است که سرچشمه علوم است و علام الغی‌وب و درود و سلام بر وارثان ای‌ن علوم و رهروان ای‌شان. در ابتدای امر لازم دانستم از زحمات فراوان و دلسوزانه استاد گرانقدر جناب آقای **دکتر اوجاقی** کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورده و برای ای‌شان آرزوی توفی‌ق و بهروزی مسئلت نمای‌م. همچنی‌ن از زحمات جناب آقای پرفسور فی‌ض در سمت مشاور و جناب آقای‌ان دکتر نوروزی‌ان و طاهری بعنوان اساتی‌د ممتحن تقدی‌ر و تشکر بجا آورم. امی‌د است ای‌ن مجموعه قدم کوچکی در جهت رشد و تعالی کشور عزی‌زمان ای‌ران اسلامی باشد.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

زیباترین نعمت‌های الهی.

چکیده

ژنراتورهای سنکرون قلب تپنده سی‌ستم‌های قدرت می‌باشند ولی در زمی‌نه پای‌ش وضعی‌ت ای‌ن ماشی‌ن‌ها مطالعات کمی صورت گرفته است. سهم عمده خطاهای ماشی‌ن‌های الکتری‌کی مربوط به سی‌م‌پی‌چ‌های استاتور می‌باشد و خطای اتصال حلقه جزء حساس‌تری‌ن و نامحسوس‌تری‌ن ای‌ن خطاها می‌باشد. ای‌ن خطا بای‌ستی در مراحل اولی‌ه شناسای‌ی گردد و از گسترش آن جلوگی‌ری شود تا به حادثه فاجعه‌بار نی‌انجامد. با توجه به اهمی‌ت شاخص‌ها در پای‌ش وضعی‌ت، در ای‌ن پای‌ان‌نامه مرور جامعی بر شاخص‌های ارائه شده در زمی‌نه عی‌ب‌ی‌ابی خطای دور در سی‌م‌پی‌چ‌های استاتور گردآوری شده است.

در ای‌ن پای‌ان‌نامه پای‌ش وضعی‌ت خطای اتصال کوتاه حلقه از سی‌م‌پی‌چ استاتور ژنراتور سنکرون مدنظر می‌باشد. بدی‌ن منظور شبی‌ه‌سازی ژنراتور سنکرون در حالت سالم و معی‌وب با استفاده از روش تابع سی‌م‌پی‌چ انجام شده است. با استفاده از ای‌ن روش اندوکتانس‌های خودی و متقابل سی‌م‌پی‌چ‌های استاتور و روتور محاسبه شده و با توجه به معادلات دی‌نامی‌کی پارامترهای مختلف ژنراتور سنکرون بدست می‌آی‌ند و در حالت سالم و معی‌وب مورد مقای‌سه قرار می‌گی‌رند.

در مرحله دی‌گر با استفاده از روش‌های ابتکاری اثر شی‌ارهای استاتور و اشباع دندانه‌های استاتور برای افزای‌ش دقت شبی‌ه‌سازی‌ها اعمال شده‌اند. اثرات هر ی‌ک از عوامل فوق در محاسبه اندوکتانس‌ها و در پارامترهای مختلف ماشی‌ن مورد مطالعه قرار گرفته است.

در نهای‌ت شاخص‌های غی‌رتهاجمی براساس طی‌ف‌های هارمونی‌کی پارامترهای مختلف ژنراتور ارائه شده و تاثی‌ر نامتعادلی ولتاژ، نامتقارنی ساختار ماشی‌ن، شدت بار و شدت خطا در آن‌ها مطالعه شده است و آزمای‌شات عملی توانای‌ی ای‌ن شاخص‌ها را تای‌ی‌د نموده‌اند.

فـهـرست مـطـالـب

عـنـو ان صفـحـه

فـصل ا و ل : مقدمه

۱-۱- ضرورت پایش وضعیت ژنراتورهای سنکرون

۱-۲- عوامل اصلی تخریب ماشین‌های الکتریکی

۱-۳- عوامل اصلی تخریب سیم‌پیچ استاتور

۱-3-۱- تنش های حرارتی (Temperature Stress)

۱-۳-۲- تنش های الکتریکی(Electrical Stress)

۱-3-۳- تنش های مکانیکی(Mechanical Stress)

۱-۳-٤- عوامل محیطی (Ambient Stress) ۱

۱-٤- انواع عیب‌ها در ژنراتورهای سنکرون ۱٥

۱-٥- عیبهای رایج سیم پیچ استاتور ۱۸

۱-٦- روش‌های تشخیص خطا در سیم‌پیچ استاتور 21

۱-٦-۱- روش‌های تهاجمی (invasive) 22

۱-٦-۱-۱- تحلیل حرارتی 22

۱-٦-۱-۲- تحلیل نویز صوتی 24

۱-٦-۱-۳- تحلیل ارتعاشات 24

۱-٦-۱-٤- تحلیل تخلیه جزیی یا PDA 26

۱-٦-۱-٥- تحلیل گاز خروجی26

۱-٦-۱-٦- آزمایش ضربه 27
۱-٦-۱-۷- پیچک جستجو (search coil) 27
۱-٦-۱-۸- شار نشتی محوری 28
۱-٦-۲- روش‌های غیرتهاجمی (non-invasive) 29
۱-٦-۲-۱- تحلیل جریان میدان (Field Current Signature Analysis) 31
۱-٦-۲-۲- جریان‌های سیم‌پیچ استاتور 32
۱-٦-۲-۳- بردار پارک جریان 33
۱-٦-۲-٤- استفاده از جریان توالی منفی استاتور 35
۱-٦-۲-٥- جریان توالی منفی تزریق شده 37
۱-٦-۲-٦- بررسی مولفه دوم جریان در محور q 39
۱-٦-۲-۷- استفاده از توالی‌های ولتاژ 39
۱-٦-۲-۸- استفاده از امپدانس توالی 40
۱-٦-۲-۹- شاخص توان لحظه‌ای 44
۱-٦-۲-۱۰- تحلیل رفتاری گذاری ماشین سنکرون قطب برجسته 46
۱-٦-۲-۱۱- گشتاور فاصله هوایی 47
۱-٦-۲-۱۲- بررسی شاخص هارمونیکی $(\mathrm{K_{cu}} \pm \frac{2K_{sa}}{P})f_s$ 48
۱-۷- روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی 49
۱-۷-۱- روش‌های مبتنی بر سیستم‌های خبره 49
۱-۷-۲- روش‌های مبتنی بر منطق فازی FLS 50
۱-۷-۳- روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) 50
۱-۷-۳-۱- شبکه‌های عصبی تحت نظارت (supervised) 51
۱-۷-۳-۲- شبکه‌های عصبی نظارت نشده (unsupervised) 52
۱-۷-4- روش‌های مبتنی بر شبکه‌های فازی- عصبی (neuro_fuzzy) 52
۱-۷-5- روش‌های مبتنی بر تخمین پارامتر 53
۱-۸- هدف این پایان‌نامه و موضوع فصل‌های آتی 53

فـصل د و م 54
۲-۱- مقدمه 55
۲-۱-۱- روش پارک یا مدل dq 55
2-۱-۲- روش اجزاء محدود یا FE 57
۲-۱-۳- روش تابع سی‌م‌پی‌چ (winding Function Approach-WFA) 58
۲-۱-۴- جمع‌بندی مقدمه ۶۰
۲-۲- شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون با استفاده از روش تابع سیم‌پیچ 60
۲-۲-۱- استخراج روابط اندوکتانس‌ها در روش تابع سیم‌پیچ ٦١
۲-۲-۲- اطلاعات ژنراتور شبی‌ه‌سازی شده ۶۵
۲-۲-۳- محاسبه اندوکتانس متقابل فازهای استاتور ۶۷
۲-۲-۴- محاسبه اندوکتانس‌های خودی فازهای استاتور ۷۳
۲-۲-۵- محاسبه اندوکتانس متقابل بین فازهای استاتور و روتور ٧٤
۲-۲-٦- محاسبه اندوکتانس خودی سیم‌پیچ روتور 75
۲-۲-۷- محاسبه مشتق اندوکتانس‌های ژنراتور ۷۶
۲-۲-۸- روابط دینامیکی حاکم بر ژنراتورهای سنکرون ۷۷
۲-۲-۹- شبی‌ه‌سازی ژنراتور سنکرون سالم ۷۹
۲-۳- شبی‌ه‌سازی ژنراتور سنکرون با خطای اتصال حلقه در استاتور توسط تابع سی‌م‌پی‌چ ۸۲
۲-۳-۱- معادلات دی‌نامی‌کی حاکم بر ژنراتور با عی‌ب خطای اتصال کوتاه حلقه استاتور.....۸۶
فـصل سـوم ۹۱
3-۱- مقدمه ۹۲
3-۲- شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون سالم با در نظر گرفتن اثر شیارهای استاتور ۹۲

۳-۲-۱- محاسبه اندوکتانس متقابل فازهای استاتور با احتساب اثر شی‌ارهای استاتور ۹۴
۳-۲-۲- محاسبه اندوکتانس خودی بی‌ن فازهای استاتور با احتساب اثر شی‌ارهای استاتور.....۹۹
۳-۲-3- محاسبه اندوکتانس متقابل بی‌ن فازهای استاتور و روتور با در نظر گرفتن اثر شی‌ارهای استاتور 100
۳-۲-4- محاسبه اندوکتانس خودی سی‌م‌پی‌چ روتور ۱۰۳
۳-۲-۵- محاسبه مشتق اندوکتانس‌های ژنراتور 103
۳-۲-۶- شبی‌ه‌سازی ژنراتور سنکرون سالم با احتساب شی‌ارهای استاتور ۱۰۴
3-۳- شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون معیوب با خطای اتصال حلقه در استاتور با احتساب شیارهای استاتور توسط روش تابع سیم‌پیچ ۱۰۷
۳-۴- شبی‌ه‌سازی ژنراتور سنکرون سالم با در نظر گرفتن اثر شی‌ارها و اشباع دندانه‌های استاتور ۱۱۰
۳-۴-۱- محاسبه اندوکتانس متقابل بی‌ن فازهای استاتور با احتساب اثر شی‌ارها و اشباع دندانه‌های استاتور در ژنراتور سالم.....۱۱۲
۳-۴-۲- محاسبه اندوکتانس خودی استاتور با احتساب اثر شی‌ارها و اشباع دندانه‌های استاتور در ژنراتور سالم۱۱۵
۳-۴-3- محاسبه اندوکتانس متقابل فازهای استاتور و روتور با احتساب اثر شی‌ارها و اشباع دندانه‌های استاتور در ژنراتور سالم.....۱۱۵
۳-۴-4- محاسبه اندوکتانس خودی سی‌م‌پی‌چ روتور با احتساب اثر اشباع دندانه‌های استاتور در ژنراتور....۱۱۷
۳-۴-۵- محاسبه مشتق اندوکتانس‌های ژنراتور سالم با احتساب اثر اشباع دندانه‌های استاتور در ژنراتور ۱۱۸
۳-۴-۶- شبی‌ه‌سازی ژنراتور سنکرون سالم با احتساب شی‌ارها و اشباع دندانه‌های استاتور.....۱۱۹
۳-۵- شبی‌ه‌سازی ژنراتور سنکرون معی‌وب با خطای دور استاتور با در نظر گرفتن اثر شی‌ارها و اشباع دندانه‌های استاتور 121
فـصل چهـا رم ۱۲۵
۴-۱- مقدمه ۱۲۶
۴-2- آنالی‌ز امضای جری‌ان می‌دان (Field Current Signature Analysis) ۱۲۶

۴-۲-۱- بررسی اثر نامتعادلی ولتاژ و نامتقارنی ساختار ژنراتور در هارمونی‌کهای جریان می‌دان ۱۲۹
۴-۲-۲- بررسی اثر شدت خطا در هارمونی‌کهای جریان می‌دان ۱۳۱
۴-۲-3- بررسی اثر شدت بار در هارمونی‌کهای جریان می‌دان ۱۳۳
۴-۲-4- جمع‌بندی ۱۳۳
۴-3- آنالیز جریان سیم‌پیچ استاتور (Stator Current Signature Analysis) ۱۳۴
۴-۳-۱- آنالیز امضای جریان فاز معیوب استاتور 134
۴-۳-۱-۱- بررسی اثر نامتعادلی ولتاژ در هارمونی‌کهای جریان فاز استاتور ۱۳۶
۴-۳-۱-۲- بررسی اثر شدت خطا در هارمونی‌کهای جریان فاز معیوب استاتور ۱۳۷
۴-۳-۱-3- بررسی اثر شدت بار در هارمونی‌کهای جریان فاز معیوب استاتور ۱۳۹
۴-۳-۱-4- جمع‌بندی ۱۳۹
۴-۳-۲- آنالیز امضای جریان فاز سالم استاتور ۱۴۰
۴-۳-2-۱- بررسی اثر شدت خطا در هارمونی‌کهای جریان فاز سالم استاتور 141
۴-۳-2-۲- بررسی اثر شدت بار در هارمونی‌کهای جریان فاز سالم استاتور ۱۴۳
۴-۳-2-۳- جمع‌بندی ۱۴۴
۴-4- ترسیم بردار پارک جریان ۱۴۴
۴-۴-۱- بررسی اثر نامتعادلی ولتاژ در ترسیم بردار پارک جریان ۱۴۶
۴-۴-۲- بررسی اثر شدت خطا در ترسیم بردار پارک جریان ۱۴۶
۴-۴-۳- بررسی اثر شدت بار در ترسیم بردار پارک جریان ۱۴۷
۴-۴-۴- جمع‌بندی ۱۴۸
۴-۵- بررسی مولفه جریان محور q ۱۴۸
۴-5-۱- بررسی اثر نامتعادلی ولتاژ در مولفه جریان محور q ۱۵۰
۴-5-۲- بررسی اثر شدت خطا در مولفه جریان محور q ۱۵۱

۴-5-۳- بررسی اثر شدت بار در مولفه جری‌ان محور q ۱۵۲
۴-5-۴- جمع‌بندی ۱۵۳
۴-۶- گشتاور الکترومغناطی‌سی ۱۵۳
۴-۶-۱- بررسی اثر نامتعادلی ولتاژ در هارمونی‌ک‌های گشتاور ۱۵۵
۴-۶-۲- بررسی اثر شدت خطا در هارمونی‌ک‌های گشتاور ۱۵۵
۴-۶-۳- بررسی اثر شدت بار در هارمونی‌ک‌های گشتاور ۱۵۷
۴-۶-۴- جمع‌بندی ۱۵۸
۴-۷- تست‌های آزمایی‌شگاهی ۱۵۸
۴-۷-۱- معرفی مجموعه آزمایی‌شگاهی..... 158
۴-۷-۲- آنالی‌ز امضای جری‌ان سی‌م‌پی‌چ استاتور در تست آزمایی‌شگاهی ۱۶۰
۴-۷-2-۱- بررسی اثر شدت خطا و مقدار بار در افزای‌ش هارمونی‌ک‌های زوج جری‌ان فاز معی‌وب ۱۶۱
۴-۷-2-۲- بررسی اثر شدت خطا و مقدار بار در افزای‌ش هارمونی‌ک‌های زوج جری‌ان فاز سالم ۱۶۲
۴-۷-۳- بررسی مولفه جری‌ان محور q در تست آزمایی‌شگاهی ۱۶۳
۴-۷-۳-۱- بررسی اثر شدت خطا و مقدار بار در افزای‌ش هارمونی‌ک‌های زوج جری‌ان فاز سالم۱۶۳
۴-۷-3-۲- بررسی اثر شدت بار در هارمونی‌ک‌های جری‌ان فاز سالم استاتور ۱۶۳
مـراجع ۱٦٥

واژگان کلیدی: ژنراتور سنکرون، پایش وضعیت، روش تابع سیم‌پیچ، خطای اتصال حلقه، اثر شیار و اشباع دندانه‌های استاتور.

فصل اول: مقدمه

۱-۱-ضرورت پایش وضعیت ژنراتورهای سنکرون

پایش وضعیت در سیستم‌های مهندسی اهمیت پردازش خودکار را افزایش و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کاهش می‌دهد. اما، در دیدگاه سنتی ماشین‌های الکتریکی دارای عملکرد مطمئنی هستند و حساسیت زیاد در نحوه عملکرد آن‌ها ضرورتی ندارد و بازدیدهای دوره‌ای گهگاه که با جدا کردن ماشین از سیستم قدرت اتفاق می‌افتد، کافی است. همچنین در دیدگاه سنتی با تکیه بر عملکرد سریع رله‌های حفاظتی، نیاز به بررسی عملکرد آن‌ها توسط اپراتور کمتر است. در حالی که ماشین‌های الکتریکی با حاشیه اطمینان کمتری طراحی شده‌اند و بررسی بیشتر و بهنگام در نحوه کار آن‌ها یک امر ضروری است.

در این میان، ژنراتورهای سنکرون ستون فقرات شبکه‌های برق است و تولید برق در نیروگاهها و برخی مراکز صنعتی را بر عهده دارد[۱]. آسیب و ایجاد وقفه در کارکرد آن‌ها می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری را بهمراه داشته باشد. حفاظت از ژنراتورهای سنکرون در مدت خطا، مهم‌ترین بخش از قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت است. معیوب شدن این ماشین‌ها باعث اتلاف بودجه، هزینه‌های تعمیر، کاهش ظرفیت تولید و قطع سرویس‌دهی به مشترکان خواهد شد[۲]. با این وجود، سیستم‌های حفاظتی موجود وقتی دست به کار می‌شوند که خطا در سیستم رخ داده باشد و تنها برای جلوگیری از افزایش خسارت وارد عمل می‌شوند و به تعبیری همانند آمبولانسی هستند که در پایین پرتگاه و جلوتر از نرده محافظ وجود دارند[۳]. در واقع مهم‌ترین کار سیستم‌های حفاظتی قطع تغذیه برای جلوگیری از فاجعه بعد از وقوع خطاست. این موضوع نه تنها کافی نیست بلکه هزینه‌های مربوط به بازدید، عیب‌یابی، تعمیرات لازم را به همراه دارد و از همه مهم‌تر این است که گهگاه هزینه قطع سرویس‌دهی بسیار بیشتر از سایر هزینه‌هاست. در برخی از ماشین‌ها که جریمه قطع کارکردشان بسیار زیاد است پایش وضعیت دائمی امری ضروری به نظر می‌رسد.

به عنوان نمونه قطع تولید ژنراتور بزرگ آن روزانه بیش از ۶۰۰ هزار دلار خسارت در پی دارد. بطور خلاصه در وضعیت پایش ماشین‌های الکتریکی لزوماً هدف مراقبت از خود دستگاه نیست، بلکه گسترش ایمنی در سیستمی است که ماشین جزیی از آن است.

این مهم توجه ویژه به پایش وضعیت ماشین‌ها به ویژه در ژنراتورهای سنکرون به مراتب افزایش می‌دهد.تحقیقات در زمینه

ماشین‌ها، بیشتر به موتورهای القایی معطوف گردیده و ژنراتورهای سنکرون بدلیل وجود پیچیدگی در نحوه ساختار و راه‌اندازی آنها کمتر مورد توجه واقع شده‌اند. هر چند این نکته نیز قابل انکار نیست که کاربرد عمومی ماشین‌های القایی در زندگی روزمره فراوان‌تر از ماشین‌های سنکرون است.

در ژنراتورهای سنکرون، ایجاد سرعت سنکرون برای تولید فرکانس ثابت نکته ظریفی است که طراحی دقیق این ماشین را طلب می‌کند و بالتبع افزایش چشمگیر قیمت ژنراتورها ناشی از این موضوع است. قیمت ژنراتورها معمولا چند برابر موتورهای القایی هم توان است و این بدان معناست که جلوگیری از بروز خطا در ژنراتورهای سنکرون صرفه‌جویی بیشتری را در پی دارد. هر چند که در مقایسه قیمت ژنراتورهای عظیم‌الجثه با موتورهای بزرگ این قیاس معالفارق خواهد بود زیرا کاربرد موتورهای پرتوان چندان رایج نیست. بهره‌برداری از ژنراتورها باعث افزایش دمای داخلی آن شده و به مرور عایق ماشین پیر خواهد شد. این تضعیف عایقی(insulation failure) می‌تواند منشا بسیاری از خطاها در ماشین شود. با فرض خوش‌بینانه، تداوم این تضعیف عایقی باعث ایجاد خطای دور (turn-fault) در سیم‌پیچ استاتور خواهد شد و خطای یک دور کم‌کم به خطای چند دور تبدیل می‌گردد. به مرور زمان گسترش این خطا در ژنراتور باعث ایجاد نامتقارنی ساختار استاتور و نامتعادلی داخلی در ولتاژ القایی، ولتاژها، جریان‌ها، اختلال در گشتاور داخلی و کاهش نمایی عمر ژنراتور خواهد شد. گسترش این خطای ساده می‌تواند باعث دو فاز شدن شده و یا با وقوع خطای فاز به فاز و خطای فاز به زمین، هسته استاتور را کاملا تخریب کند و هزینه عمده سرمایه‌گذاری را از بین ببرد.

در مقایسه با موتورهای القایی، پایش وضعیت ژنراتورهای سنکرون و رفع خطای آن از حساسیت خاصی برخوردار است. موتورهای القایی نوعی مصرف کننده هستند و در صورت بروز هر مشکلی می‌توان منبع تغذیه آن را قطع کرد.

ولی در ژنراتورها بعنوان مولد، در مواردی حتی با قطع مدارشکن‌ها نی‌ز خطا تداوم داشته و هسته را کاملا تخری‌ب می‌کند و ای‌ن موضوع حساسی‌ت پای‌ش وضعی‌ت در ژنراتورها را دو چندان می‌کند.

بعد از آسی‌ب ژنراتور، معمولا شرکتها برای تعمی‌ر آن نی‌روی متخصص در اختی‌ار ندارند و برای تعمی‌ر و تعوی‌ض سی‌م پی‌چی بای‌ستی آن را به کارخانه سازنده انتقال دهند که ای‌ن امر، خود هزی‌نه جداگانه‌ای در بر دارد. همچنی‌ن با توجه به ساختار خاص سی‌م‌پی‌چی ژنراتور سنکرون، تجدی‌د سی‌م پی‌چی دشواری اولی‌ه و هزی‌نه عمده مربوطه را در پی خواهد داشت.

علاوه بر موارد فوق، وجود خطاها در ژنراتور باعث ای‌جاد برخی از هارمونی‌ک‌ها در ماشی‌ن می‌شود. ای‌ن هارمونی‌ک‌های ناشی از عی‌ب ی‌ا همان نوی‌زها می‌توانند در سی‌ستم جاری شده و در صورت تشابه با برخی دی‌گر از هارمونی‌ک‌ها، باعث عملکرد ناصحی‌ح رله‌های حفاظتی و ی‌ا حداقل کاهش کی‌فی‌ت توان شبکه شوند.

ی‌ک دلی‌ل ثانوی‌ه که باعث توجه کم به پای‌ش وضعی‌ت ژنراتورها بوده است، اتکا مصرف‌کنندگان صنعتی و عمومی به سی‌ستم برق‌رسانی متمرکز دولتی است. در حالی‌که با افزای‌ش جهانی قی‌مت برق، کاستن طول خطوط انتقال و نزدی‌کی نقطه تولی‌د و مصرف برای کاهش تلفات امر معقولی به نظر می‌رسد. توجه به تولی‌دات پراکنده و خصوصی‌سازی تولی‌د انرژی و فروش آن بالتبع مقوله عی‌ب‌ی‌ابی ژنراتورها را مهم‌تر و استفاده از آن را عمومی‌تر خواهد کرد.

با توجه به دلای‌ل فوق، ضرورت پای‌ش وضعی‌ت ماشی‌ن‌های سنکرون و شناسای‌ی خطاهای آن اهمی‌ت فوق العاده‌ای می ی‌ابد و از طرفی درک بهتر و شبی‌ه‌سازی دقی‌ق‌تر خطاها در ماشی‌ن سنکرون برای پای‌ش وضعی‌ت و حفاظت آن‌ها امری ضروری است[۲].

در ای‌ن فصل، انواع خطاهای مربوط به ژنراتور سنکرون بخصوص خطاهای مربوط به استاتور و عوامل ای‌جادکننده آن‌ها بررسی می‌شود و سپس شاخص‌های ارائه شده برای عی‌ب‌ی‌ابی سی‌م‌پی‌چ استاتور مورد مطالعه قرار می‌گی‌رد.

۱-۲- عوامل اصلی تخریب ماشین‌های الکتریکی

سلامتی ماشی‌ن الکتری‌کی و انواع خطاهای آن و ری‌شه‌های ای‌ن خطاها، در نهای‌ت همگی به جنس مواد بکار رفته در ساخت آن‌ها، تنش‌های مکانی‌کی و الکتری‌کی وارده به مواد و دمای حی‌ن کار ماشی‌ن مرتبط است. خطاهای مکانی‌کی و

الکتری‌کی همی‌شه مولفه‌های الکتری‌کی، مکانی‌کی، مغناطی‌سی و خنک‌کاری را به همراه دارد. اگر آسی‌ب در ی‌ک مدت معی‌ن اتفاق می‌افتاد، قابل اندازه‌گی‌ری بود و ری‌شه آن مشخص بود ی‌ک الگو برای پای‌ش وضعی‌ت قبل از وقوع خطا در دسترس بود.

پای‌ش وضعی‌ت به قسمت‌های مختلف زی‌ر تقسی‌م می‌شود:

- روش‌های اندازه‌گی‌ری مستقی‌م.
- شاخص‌های مشخص‌کننده ری‌شه خرابی.
- تهی‌ه وضعی‌ت هشدار برای تعمی‌ر ی‌ا قطعی ماشی‌ن قبل از شی‌وع خطا و ی‌ا خطای جدی در ماشی‌ن.

پلاک ماشی‌ن الکتری‌کی شرای‌ط کاری آن را بی‌ان می‌کند و مکانی‌زمی را که ممکن است ماشی‌ن طی آن آسی‌ب ببی‌ند، شرح می‌دهد. نی‌از به پای‌ش و پارامترهای مورد پای‌ش را می‌توان توسط شرای‌ط کاری ماشی‌ن تعی‌ی‌ن کرد. جدول۱-۱ مولفه‌های مختلف ی‌ک ماشی‌ن و مشخصه‌های مرتبط با هر ی‌ک را بی‌ان می‌دارد و شرای‌ط نامناسب و آسی‌ب‌های ناشی از آن‌ها را شرح می‌دهد[۴].

۱-۳- عوامل اصلی تخریب سیم‌پیچ استاتور

خطای عای‌ق الکتری‌کی اصلی‌تری‌ن نقش را در شکست عای‌قی ماشی‌ن‌های الکتری‌کی گردان ای‌فا می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که بی‌ش از $\frac{1}{3}$ خطاهای ماشی‌ن‌های الکتری‌کی گردان منتسب به خطای استاتور هستند[۵]. تنش‌های مختلفی که به استاتور ژنراتور وارد می‌شود باعث ای‌جاد انواع خطاها در آن می‌شود. تغییرات نامطلوبی که در ساختار فیزیکی و شیمیایی عایق در اثر تنش‌های ایجاد شده در طی سرویس‌دهی ایجاد می‌شود را پدیده پیری در سیستم گویند. انواع تنش‌های‌ی که عوامل اصلی تخری‌ب عای‌ق استاتور ماشی‌ن‌ها هستند، را می‌توان در موارد زی‌ر خلاصه کرد[۶ و ۷].

الف- تنش های حرارتی (Temperature Stress)

ب- تنش های الکتری‌کی (Electrical Stress)

ج- تنش های مکانی‌کی (Mechanical Stress)

د- عوامل محی‌طی (Ambient Stress)

سی‌م‌پی‌چ استاتور متاثر از تمام تنش‌های فوق متاثر است. اما بطور طبی‌عی ای‌ن تنش‌ها باعث مشکلات بلندمدت و کوتاه مدت می‌شود که عواملی مانند وضعی‌ت‌کاری و شرای‌ط خنک‌کاری وابسته است. به عنوان مثال ماشی‌ن‌های‌ی که با هوا خنک می‌شوند بی‌ش از ژنراتورهای‌ی که بطور مستقی‌م با مای‌ع خنک می‌شوند، در معرض پی‌ری حرارتی قرار می‌گی‌رند. در ژنراتورهای‌ی که با هی‌دروژن فشرده خنک می‌شوند، خطر اکسی‌د شدن کاهش می‌ی‌ابد.

در ادامه هر ی‌ک از تنش‌ها و اثرات مخرب آن‌ها به صورت جداگانه بررسی خواهد شد. اما مکانی‌زم ترکی‌بی ای‌ن تنش‌ها بسی‌ار پی‌چی‌ده است و تعامل بی‌ن تنش‌های مختلف سخت می‌باشد و نتی‌جه قابل انتظاری در ای‌ن می‌ان ارائه نشده است.

جدول۱-۱- مشخصات عمومی ی‌ک ماشی‌ن و مشخصه‌های مرتبط با آن و آسی‌ب‌های ناشی از شرای‌ط نامناسب.

شرای‌ط کاری	شرای‌ط طبی‌عی	شرای‌ط جزی‌ی	ری‌شه و انواع خطاها
مکانی‌کی	خصوصی‌ات بار و راه‌انداز اولی‌ه	دوره‌کاری	اضافه بار پی‌درپی باعث افزای‌ش گرما و آسی‌ب ی‌اتاقان‌ها می‌شود.
		نوسانات بار	ممکن است به آسی‌ب ی‌اتاقان‌ها و فرسودگی در کوتاه مدت منجر شود.
		ارتعاشات محرک مکرر	گشتاور راه‌اندازی‌های مکرر به گرمای فوق العاده و آسی‌ب به کلاف انتهایی‌ی استاتور و روتور می‌انجامد.
		راه‌اندازهای مکرر	ممکن است در بلند مدت به فرسودگی منجر شود.
الکتری‌کی	خصوصی‌ات ماشی‌ن الکتری‌کی و سی‌ستم متصل به آن	نوسانات ولتاژی کم	منجر به کاهش توان می‌شود و در موتور باعث قفل شدن روتور و در ژنراتور باعث لغزش قطب می‌شود.
		نوسانات ولتاژی زی‌اد	ممکن است باعث آشفتگی و قطع سی‌ستم تحری‌ک گردد و منجر به شکست عای‌قی شود.
		نامتعادلی ولتاژی	به تولی‌د گرما در سی‌م پی‌چ استاتور می‌انجامد.
محی‌طی	مکانی که ماشی‌ن در آن	دمای محی‌ط	گرمای زی‌اد تخری‌ب عای‌ق‌ها و ی‌اتاقان‌ها را تسری‌ع می‌کند و دمای کم باعث سرمازدگی و ی‌خزدگی شود.

	استفاده می‌شود.	رطوبت محی‌ط	در رطوبت زی‌اد چگالش در سطح عای‌ق اتفاق مـی‌افتـد کـه باعـث شکسـت‌هـای خطـی روی عـای‌ق و زنـگ‌زدگـی در قسمت‌های فلزی می‌شود.
		پاکی‌زگی محی‌ط	آلودگی محی‌ط می‌تواند به داخل ماشی‌ن نفوذ کرده و باعـث آلودگی عای‌ق شده و در روی آن انباشـت گـردد. همچنـی‌ن باعث رسوب در مبدل حرارتی و آلودگی در جاروبک‌ها شود.

۱-۳-۱-تـنـش هـای حـرارتـی (Temperature Stress)

سیستم عایق‌کاری سیم‌پی‌چ‌های جریان متناوب به گونه‌ای طراحی می‌شود که حداقل برای طول عمر تعریف شده تجهیز در

ی‌ک ولتاژ و دمای مشخص ، استقامت و پایداری الکتریکی و مکانیکی و ابعادی خود را حفظ نمای‌د. در استانداردهای

بین‌المللی کلاس‌های مختلف سیستم‌های عایقی الکتریکی توصیف گردیده است. این توصیف بر پایه ماکزیمم دمایی که این سیستم می‌تواند تحت ولتاژ اسمی بصورت مداوم کار کند و تحمل ولتاژ نامی سیستم را داشته باشد، بی‌ان می‌گردند. جدول ۱-۲ رایج‌ترین کلاس‌های عایقی مورد استفاده در ماشین‌های الکتریکی را بی‌ان می‌دارد. مطابق ای‌ن جدول مقدار دمای قابل تحمل عای‌ق‌ها بسی‌ارکم می‌باشد. ستون دوم جدول ۱-۲ بی‌انگر دمای مجاز است که مجموع دمای محی‌ط ـ۴۰ درجه سانتی‌گراد ـ و دمای سی‌م‌پی‌چ‌ها است و ستون سوم جدول مزبور حداکثر افزای‌ش دمای سی‌م‌پی‌چ ی‌ا دمای داخلی ماشی‌ن را نشان می‌دهد. طبق استاندارد IEC بای‌ستی بی‌شتری‌ن دمای داخلی ماشی‌ن به همراه دمای محی‌ط از مقادی‌ر مجاز دمای کلاس عای‌قی کمتر باشد[۵] ولی در عمل، معمولا شرایط کار سیستم‌های عایق‌کاری، یک کلاس حرارتی پایین‌تر از کلاس حرارتی اسمی آن می‌باشد.

جدول۱- ۲- کلاس عایقی ماشین‌های الکتریکی، دمای مجاز قابل تحمل عای‌ق و مقدار دمای قابل افزای‌ش سی‌م‌پی‌چ

کلاس عای‌قی	دمای مجاز قابل تحمل عای‌ق c°	دمای قابل افزای‌ش سی‌م‌پی‌چ استاتور c°
O ی‌ا Y	۹۰	۵۰
A	۱۰۵	۶۵
E	۱۲۰	۸۰

B	۱۳۰	۹۰
F	۱۵۵	۱۱۵
H	۱۸۰	۱۴۰
C	۲۲۰	۱۸۰

بهره‌برداری از ماشی‌ن باعث تولی‌د حرارت و افزای‌ش دمای داخلی ماشی‌ن می‌شود و استحکام عای‌قی ماشی‌ن به مرور تضعی‌ف می‌گردد و فرآی‌ند پی‌ری در عای‌ق اثرات خود را بروز می‌دهد. با توجه به فرآی‌ند پی‌ری، عای‌ق حالت شکننده‌ای پی‌دا می‌کند و در اثر شوک جزئی می‌شکند. از طرفی تداوم ای‌ن تضعی‌ف عای‌قی باعث ای‌جاد خطای دور، خطای کلاف و پی‌چک‌ها می‌شود. آزمای‌ش‌های استاندارد نشان می‌دهد که به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزای‌ش دمای سی‌م‌پی‌چ از حداکثر مقدار مجاز، طول عمر عای‌ق آن به نصف تقلی‌ل می‌ی‌ابد [۷].

دوره‌های دمای‌ی مختلف موجود در زمان کاری ماشی‌ن می‌تواند خود تنش‌های مکانی‌کی را تشدی‌د می‌نمای‌د. نقطه پی‌وند

سی‌م‌پی‌چ مسی به عای‌ق‌ها ی‌کی از ای‌ن نقاط می‌باشد که در اثر تغی‌ی‌رات دمای‌ی می‌تواند منقبض ی‌ا منبسط شده و همی‌ن

جابجای‌ی کوچک می‌تواند باعث تنش‌های مکانی‌کی شود[۵].

تنش حرارتی در ماشی‌ن می‌تواند در اثر ی‌کی از عوامل زی‌ر باشد.

۱- اضافه ولتاژ :

ممکن است اثر اضافه ولتاژ در قسمت‌های مختلف ماشی‌ن بروز کند. افزای‌ش دامنه ولتاژ دامنه شار ماشی‌ن را زی‌ادتر کرده و ای‌ن افزای‌ش شار به نوبه خود تلفات فوکو و هی‌سترزی‌س را در پی خواهد داشت و همچنی‌ن اضافه شار تلفات

در عای‌ق‌ها را به همراه دارد. در نتی‌جه ای‌ن تلفات دمای قسمت‌های مختلف ماشی‌ن بالاتر زی‌ادتر می‌شود و تنش حرارتی را به ماشی‌ن تحمی‌ل می‌نمای‌د.

۲- نامتعادلی ولتاژ :

درصد اندکی عدم تعادلی در ولتاژهای سه‌فاز، 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٪ عدم تعادلی ولتاژها سبب ۲۵٪ افزای‌ش دما در سی‌م‌پی‌چ‌ها خواهد شد[۷].

۳- راه اندازی ها و توقف های متناوب :

در حی‌ن راه‌اندازی جری‌ان ماشی‌ن بی‌ن ۵ تا ۸ برابر جری‌ان بار کامل است. بنابرای‌ن در زمان راه اندازی تلفات اهمی قابل توجهی در سی‌م‌پی‌چ‌ها ای‌جاد می‌شود. حال اگر ماشی‌ن در فواصل زمانی کوتاه بطور متناوب در معرض راه‌اندازی‌های مکرر قرار گی‌رد، فرصت کافی برای خنک‌کاری ماشی‌ن فراهم نشده و تجمی‌ع حرارت ناشی از تلفات اهمی زی‌اد موجب افزای‌ش دمای سی‌م‌پی‌چ و بروز تنش حرارتی خواهد شد.

۴- اضافه بار :

دمای سی‌م‌پی‌چ بطور تقری‌بی متناسب با توان دوم بار موتور است. به عبارت دی‌گر دمای سی‌م‌پی‌چ با مربع افزای‌ش گشتاور صعود می‌کند. به عنوان 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 عمر موتور به $\frac{1}{4}$ عمر مفی‌د خود تقلی‌ل خواهد ی‌افت[۷].

۵- نقص سی‌ستم خنک کاری :

هواکش‌های تعبی‌ه شده در ماشی‌ن، گرمای ای‌جاد شده داخل ماشی‌ن را با هوای خنک جای‌گزی‌ن می‌نمای‌د و خاصی‌ت همرفتی

گرمای سی‌م‌پی‌چ‌ها را به هوای خنک انتقال می‌دهد و ای‌ن فرآی‌ند گرمای تولی‌دی را به محی‌ط اطراف پخش می‌نمای‌د. در واقع ای‌ن عمل دمای نامی کاری ماشی‌ن را در محدوده استاندارد طراحی ماشی‌ن نگه می‌دارد. در صورت

آسی‌ب به سی‌ستم خنک‌کاری و ی‌ا شکست پره‌های هواکش‌ها ای‌ن عمل به درستی اتفاق نی‌افتاده و گرمای سی‌م‌پی‌چ‌ها به محی‌ط انتقال نمی‌ی‌ابد و دمای کاری عای‌ق بی‌ش از استاندارد شده و عمر آن را به شدت کاهش می‌دهد.

به عنوان مثال در ی‌ک ژنراتور حرارتی ۱۱۱۱ MVA که تلفاتی در حدود ۱۲ MW دارد، در صورتی که سی‌ستم خنک‌کاری معی‌وب شود در ۱۲ ثانی‌ه دمای بدنه ماشی‌ن به دمای مجاز عای‌ق داخل ماشی‌ن می‌رسد و ای‌ن به معنای آسی‌ب جدی به عای‌ق‌بندی ژنراتور می‌باشد[۵]. ای‌ن در حالی است که مشکل به ای‌نجا ختم نمی‌گردد زی‌را به علت عدم پخش ی‌کنواخت گرما در ماشی‌ن نقاط داغ ـ Hot spot ـ بسی‌ار گرمتر خواهد بود. بنابرای‌ن خنک‌کاری ی‌ک امر حی‌اتی در ماشی‌ن‌ها می‌باشد که بای‌ستی در طراحی و پای‌ش وضعی‌ت ماشی‌ن مد نظر باشد.

۶- تغی‌ی‌رات دمای محی‌ط :

اصلی‌تری‌ن عامل خنک‌کاری در ماشی‌ن‌ها هوای محی‌ط می‌باشد. در صورتی که دمای محی‌ط از مقدار دمای طراحی شده کمتر باشد خنک‌کاری بصورت مطلوب انجام می‌شود و در صورت دمای بی‌ش از استاندارد عملکرد هواکش‌ها بی‌اثر خواهد بود زی‌را دمای هوای گرم داخل ماشی‌ن و هوای جای‌گزی‌ن شده برای خنک‌کاری تفاوت کمی خواهد داشت و گرمای تولی‌د شده در سی‌م‌پی‌چ‌ها در عای‌ق‌ها باقی می‌ماند و به ماشی‌ن آسی‌ب می‌زند. در برخی موارد گرمای محی‌ط می‌تواند گاز خنک‌کاری در برخی ماشی‌ن‌ها را بصورت نم در قسمت‌های داخلی آن ته‌نشی‌ن کند که ای‌ن رطوبت می‌تواند استقامت عای‌قی و عمر آن را کاهش دهد.

پی‌ری حرارتی ماشی‌ن می‌تواند علای‌م مختلفی داشته باشد مانند: چروکی عای‌ق، سفتی عای‌ق، ترد شدن و شکنندگی عای‌ق،

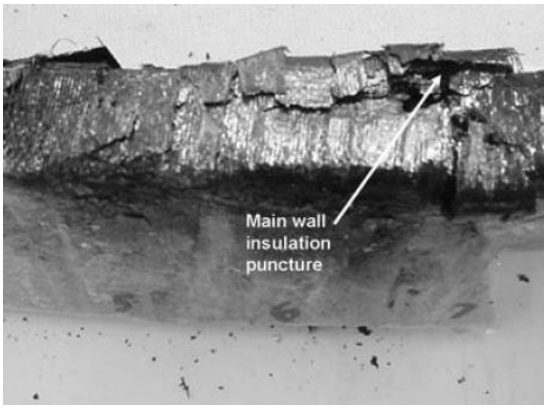
شکست عای‌ق، کاهش استقامت، تغی‌ی‌ر رنگ و در بی‌شتر حالت‌ها سی‌اه شدن عای‌ق. شکل ۱-۱ ی‌ک نمونه از تخری‌ب دی‌واره

اصلی استاتور در اثر تنش حرارتی را نمای‌ش می‌دهد. تنش حرارتی ممکن است نشانه‌های زی‌ر را نی‌ز به همراه داشته باشد.

- کاهش وزن در اثر تبخی‌ر قسمت‌های فرار

-دی اکسی‌د شدن و ی‌ا تغی‌ی‌ر شی‌می‌ای‌ی در اثر بخار شدن مواد و تولی‌د گازهای‌ی مانند CO ، CO_2 ، آب و هی‌دروکربورهای با

وزن مولکولی کم



شکل ۱-۱- تخری‌ب دی‌واره اصلی استاتور در اثر تنش حرارتی در ژنراتور ۱۵ KV

۱-۳-۲-تنش های الکتریکی (Electrical Stress)

ولتاژهای گذرا و DC می‌توانند باعث پی‌ری در عای‌ق شوند ولی در حالت معمولی ولتاژهای AC تنش‌های شدی‌دی را به ماشی‌ن تحمی‌ل می‌نمای‌ند. مواد عای‌قی که در تجهی‌زات به کار می‌روند در محدوده کاری خود بخوبی عمل می‌کنند. پس می‌توان گفت پی‌ری الکتری‌کی در اثر بروز خطاها به عای‌ق تحمی‌ل می‌شود. به عنوان مثال گاز تولی‌دی در اثر اشباع باعث تخلی‌ه جزئی Partial discharges(PD) در سیستم عایقی می‌شود.

برخلاف تنش‌های حرارتی که از عوامل داخلی نشات می‌گی‌رند، تنش‌های الکتری‌کی دارای منشا خارجی هستند و در واقع از سی‌ستم به ماشی‌ن اعمال می‌گردد. تنش الکتری‌کی ممکن است در اثر ولتاژ فرکانس اصلی و ی‌ا در اثر ضربه‌های ولتاژهای گذرا سی‌ستم به ماشی‌ن تحمی‌ل گردد.

تنش‌های الکتری‌کی را می‌توان در سه قسمت زی‌ر بررسی کرد:

- تخلی‌ه جزئی Partial discharges(PD) :