۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی دکتری مهندسی برق- قدرت

عنوان:

تشخیص و شناسایی خطاهای اتصال کوتاه داخلی در سیم پیچی استاتور ژنراتور سنکرون با استفاده از روشهای مبتنی بر مدل و با در نظر گرفتن اشباع هسته

توسط:

سیروس همتی

استاد راهنما:

دکتر شکراله شکری کجوری

استاد مشاور:

دکتر مهدی علیاری شوره دلی

تابستان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به...

پدر و مادر عزیزم، اسوه‌های صبر و استقامت زندگی‌ام

و

همسر و دختر مهربانم

تأییدیّه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: **سیروس همتی**

را با عنوان: **تشخیص و شناسایی خطاهای اتصال کوتاه داخلی در سیم پیچی استاتور ژنراتور سنکرون با استفاده از روشهای مبتنی بر مدل و با در نظر گرفتن اشباع هسته**

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه دکتری تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	شکراله شکری کجوری	استادیار	
استاد مشاور	مهدی علیاری شوره دلی	استادیار	
استاد ممتحن خارجی	جواد فیض	استاد	
استاد ممتحن خارجی	جعفر میلی منفرد	استاد	
استاد ممتحن داخلی	عباس هوشمندویکی	استادیار	
استاد ممتحن داخلی	اصغر اکبری ازیرانی	دانشیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	حمیدرضا تقی راد	استاد	

اظهارنامه دانشجو

اینجانب **سیروس همتی** دانشجوی **دکتری رشته مهندسی برق گرایش قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی** گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه با عنوان:

تشخیص و شناسایی خطاهای اتصال کوتاه داخلی در سیم پیچی استاتور ژنراتور سنکرون با استفاده از روشهای مبتنی بر مدل و با در نظر گرفتن اشباع هسته.

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر شکراله شکری کجوری**، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضا دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت مدارک

حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

- ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

بی شک دستاوردهای این پژوهش مبتنی بر اندوخته های من از آموزش های اساتیدم در دوران تحصیل بوده است. جا دارد در اینجا از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر شکراله شکری کجوری به خاطر زحمات بی دریغشان در طول دوره دکتری اینجانب، تشکر و قدردانی نمایم. هم چنین از استاد گرامی جناب آقای دکتر مهدی علیاری شوره دلی برای راهنمایی های ارزشمندشان در به انجام رسیدن این پژوهش ممنون و سپاس گزارم.

از اعضای محترم داوران جناب آقای پرفسور جواد فیض، آقای پرفسور جعفر میلی منفرد، آقای دکتر عباس هوشمندویکی و آقای دکتر اصغر اکبری ازیرانی که زحمت داوری این رساله را به عهده گرفتند، نهایت سپاسگزاری را دارم.

بخش هایی از این پژوهش در مدت فرصت مطالعاتی اینجانب در دانشگاه *Wisconsin Madison* انجام شده است. از پرفسور *Thomas A. Lipo* که زمینه استفاده از این فرصت را فراهم آورده و راهنمایی مرا در این دوره بر عهده داشتند، تشکر و قدردانی می کنم.

در پایان از خانواده عزیزم و بویژه همسر مهربانم و دختر نازنینم که همراهی و صبوری آنها همواره موجبات آرامش و دلگرمی من بوده است، تشکر و سپاس گزاری میکنم.

چکیده

در این رساله، هدف استفاده از روش تابع سیم پیچی برای مدل سازی دقیق ترِ ماشین سنکرون قطب برجسته، بمنظور استفاده از این مدل در طراحی یک سیستم تشخیص و شناسایی خطا مبتنی بر مدل است.

بدین منظور، ابتدا روش تابع سیم پیچی توسعه یافته برای محاسبه دقیق اندوکتانس های ماشین سنکرون قطب برجسته که داری فاصله هوایی غیر یکنواخت است معرفی می شود. استفاده از روش تابع سیم پیچی در محاسبه اندوکتانس های ماشین های با فاصله هوایی غیر یکنواخت مورد تردید برخی از محققان است. لذا ابتدا به رفع این تردید پرداخته و در ادامه به کمک روش پیشنهادی، اندوکتانس های یک ماشین قطب برجسته محاسبه می شود . برای تایید درستی روش پیشنهادی، اندوکتانس های به دست آمده از این روش با آنهایی که از روش اجزای محدود محاسبه شده اند، مقایسه می شوند. علاوه بر این، برای لحاظ کردن اشباع هسته، از منحنی های مغناطیسی به دست آمده از روش اجزای محدود استفاده می شود . مقایسه نتایج آزمایش ها با نتایج شبیه سازی صحتِ روش پیشنهادی را تایید می کند. در ادامه با استفاده از روش تابع سیم پیچی، اندوکتانس های ماشین ناسالمِ تحت خطای اتصال کوتاه مورد محاسبه و بررسی قرار میگیرد. با استفاده از این اندوکتانس ها، مدل ماشین در حالت ناسالم استخراج میگردد. در این قسمت نیز از مقایسه نتایج آزمایش ها با نتایج شبیه سازی ماشینِ تحت خطای اتصال کوتاه، صحتِ روش پیشنهادی تایید می شود .

در ادامه به کمک مدل به دست آمده برای ماشین، یک سیستم تشخیص و شناسایی خطا طراحی می گردد. این سیستم یک سیستم دو لایه است که وظیفه لایه اول تشخیص وقوع خطا و وظیفه لایه دوم شناسایی نوع و محل خطاست. در سیستم طراحی شده یک مدل برای حالت سالم و چندین مدل برای حالات مختلف خطا در نظرگرفته شده است. در این روشِ، ورودی ماشین واقعی به مدلِ ماشین نیز خورانده می شود . سپس سیگنال های خروجیِ ماشین واقعی و مدل با هم مقایسه می شوند. نتیجه این مقایسه سیگنال مانده است که با ارزیابی آن وجود یا عدم وجود خطا و سپس نوع و محل آن اعلام می شود .

مزیت سیستم دو لایه آن است که برای تشخیص خطا فقط یک مدلِ حالت سالم مورد استفاده قرار می گیرد و این امر باعث کاهش حجم محاسبات در دوره کار عادی ماشین و افزایش سرعتِ تشخیص خطا می شود . بعد از وقوع خطا و اعلام آن توسط لایه اول، لایه دوم وارد عمل شده و وظیفه شناسایی خطا را به عهده می گیرد. نتایج آزمایش ها کارایی سیستم ارائه شده را تایید می کند.

کلید واژه: تشخیص و شناسایی خطا، اتصال کوتاه داخلی، ماشین سنکرون قطب برجسته، روش تابع سیم پیچی، روش اجزای محدود.

فهرست مطالب

۱ مقدمه ۲

۱-۱ ژنراتورهای سنکرون و اهمیت آنها در صنعت ۲

۱-۲ اهمیت اقتصادی عملکرد بهینه ژنراتور سنکرون و تاثیر عیوب در آن ۲

۱-۳ روش های پایش سلامت و نگهداری ژنراتورهای سنکرون ۲

۱-۳-۱ مروری بر روش های کلی تعمیر و نگهداری ادوات صنعتی ۲

۱-۳-۲ مروری بر روش های پایش سلامت و حفاظتِ ژنراتورهای سنکرون ۴

۱-۴ اهداف و نوآوری های پژوهش حاضر و شرح مختصری از کار ۷

۲ روشهای مدل سازی ماشین سنکرون و تشخیص و شناسایی خطا در آن ۱۰

۲-۱ مدل سازی ماشین های الکتریکی ۱۰

۲-۲ مروری بر پژوهشهای مربوط به مدل سازی ماشین های الکتریکی ۱۲

۲-۳ خطاهای داخلی در ماشین های الکتریکی ۱۷

۲-۴ مروری بر پژوهش های مرتبط با تشخیص و شناسایی خطا در ژنراتور سنکرون ۱۹

۳ مدل سازی و شبیه سازی حالت سالم ماشین سنکرون با استفاده از روش های تابع سیم پیچی و اجزای محدود ۳۴

۳-۱ روش تابع سیم پیچی ۳۴

۳-۱-۱ معرفی تئوری تابع سیم پیچی ۳۴

۳-۱-۲ در نظرگرفتن توزیع هادیها در داخل شیارها ۳۷

۳-۱-۳ یافتن تابع فاصله هوایی و معکوس آن ۳۷

۳-۱-۴ یافتن تابع فاصله هوایی برای ماشین مورد مطالعه ۴۴

۳-۱-۵ یافتن توابع سیم پیچی ماشین تحت مطالعه ۴۸

۳-۱-۶ محاسبه اندوکتانس های ماشین ۵۲

۳-۲ محاسبه اندوکتانس های ماشین مورد مطالعه با *FEM* ۵۴

۳-۲-۱ مقدمه ۵۴

۳-۲-۲ محاسبه اندوکتانس ها با *FEM* ۵۶

۳-۳ مدل ماشین ۵۸
۳-۳-۱ مدل ژنراتور در حالت سالم ۵۸
۳-۳-۲ در نظرگرفتن اشباع هسته ۶۲
۳-۴ در نظر گرفتن میله های دمپر ۶۶
۳-۴-۱ مقدمه ۶۶
۳-۴-۲ روش پیشنهادی برای مدل کردن میله های دمپر با استفاده از روش تابع سیم پیچی ۶۷
۳-۴-۳ یافتن اندوکتانس های مربوط به میله های دمپر ۷۲
۳-۴-۵ معادلات ماشین سنکرون با حضور میله های دمپر ۷۵
۳-۴-۴ روش حل معادلات ماشین با حضور میله های دمپر ۷۶
۳-۵ نتایج شبیه سازی حالت سالم و مقایسه با نتایج تست عملی ۷۸
۳-۵-۱ شبیه سازی ژنراتور چهار سیمهٔ با بار مقاومتی ۷۸
۳-۵-۲ شبیه سازی ژنراتور بدون سیم چهارم و با بار مقاومتی ۸۰
۳-۶ جمع بندی ۸۱
۴ مدل سازی و شبیه سازی خطای اتصال کوتاه در سیم بندیِ استاتور ماشین سنکرون با استفاده از روش های تابع سیم پیچی ۸۴
۴-۱ محاسبه اندوکتانس های مدل ماشین خطادار ۸۴
۴-۱-۱ اتصال کوتاه یکفاز ۸۴
۴-۱-۲ اتصال کوتاه فاز به فاز ۸۹
۴-۲ در نظر گرفتن اشباع هسته در زمان اتصال کوتاه ۹۵
۴-۳ شبیه سازی ماشین خطادار و مقایسه با نتایج تست عملی ۹۶
۴-۳-۱ آماده سازی ماشین برای انجام تست ها ۹۶
۴-۳-۲ شبیه سازی ها و مقایسه با نتایج تست عملی ۹۷
۴-۴ شبیه سازی خطای اتصال کوتاه حلقه با *WFM* و *FEM* ۱۰۰
۴-۵ نتایج شبیه سازی خطای فاز به فاز با لحاظ کردن مدلِ میله های دمپر ۱۰۲

۴-۶ جمع بندی ۱۰۵
۵ طراحی سیستم تشخیص و شناسایی خطای اتصال کوتاه در سیم بندی استاتور ماشین سنکرون ۱۰۷
۵-۱ تشخیص و شناسایی خطا مبتنی بر مدل ۱۰۷
۵-۲ نمونه ای از کاربرد عملیِ روشهای مبتنی بر مدل جهت تشخیص و شناسایی خطا ۱۱۳
۵-۳ سیستم تشخیص و شناسایی خطای پیشنهادی در این رساله ۱۱۴
۵-۴ تشخیص و شناسایی خطای اتصال کوتاه در ماشین سنکرون ۱۱۷
۵-۴-۱ تشکیل بانک مدل ۱۱۷
۵-۴-۲ شبیه سازی ۱۱۹
۵-۴-۳ ارزیابی مانده برای تشخیص و شناسایی خطای اتصال کوتاه ۱۲۴
۵-۵ آنالیز مقاوم بودن و حساسیت در سیستمهای *FDI* ۱۳۳
۵-۶ جمع بندی ۱۳۸
۶ جمع بندی و پیشنهادات ۱۴۰
۶-۱ دستاوردهای رساله ۱۴۰
۶-۲ پیشنهادها ۱۴۱
لیست مقالات ارائه شده ۱۴۳
مراجع ۱۴۴

فهرست شکل ها و جدول ها

شکل ۲- ۱ : انواع خطاهای داخلی در ماشین الکتریکی ۱۸
شکل ۲- ۲ : انواع خطاهای ممکن در سیم بندی استاتور ۱۸
شکل ۲- ۳ : خروج از مرکز روتور و عبور شار از دور محور [۵۹] ۲۱
شکل ۲- ۴ : اتصال کوتاه در ۲٪ فاصله از نقطه خنثی (فرا جهش رو به بالا در سومین جهش) [۷۶]. ۲۳
شکل ۲- ۵ : اتصال کوتاه در ۳٪ فاصله از نقطه خنثی(فرا جهش رو به بالا در سومین جهش) [۷۶]. ۲۴
شکل ۲- ۶ : اتصال کوتاه در ۴٪ فاصله از نقطه خنثی (فرا جهش رو به پایین در سومین جهش) [۷۶] ۲۴
شکل ۲- ۷ : اساس $DMRM$ برای یک شیار از استاتور ۲۵
شکل ۲- ۸ : ولتاژ بی باری در حالت سالم و حالتهای مختلف خطا [۸۴] ۲۶
شکل ۲- ۹ : طیف فرکانسی ولتاژ بی باری در حالت سالم و حالتهای مختلف خطا [۸۴] ۲۶
شکل ۲- ۱۰ : طیف فرکانسی ولتاژ بی باری در فرکانسهای بالا [۸۴] ۲۷
شکل ۲- ۱۱ : تشخیص خطا در ژنراتور سنکرون به کمک مشاهده گرها [۹۳] ۲۹
شکل ۲- ۱۲ : مجموعه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده در [۹۶] ۳۰
شکل ۲- ۱۳ : طرح پیشنهادی در [۱۰۲] ۳۱
شکل ۳- ۱ : ماشین سنکرون قطب برجسته مقدماتی ۳۵
شکل ۳- ۲ : ماشین سنکرون ساده (۳ فاز، ۲ قطب) با سیم پیچی متمرکز ۳۵
شکل ۳- ۳ : تابع دور و تابع سیم پیچی فازهای a، b و c ۳۶
شکل ۳- ۴ : تابع سیم پیچی کلاف k با در نظر گرفتن اثر افزایش خطی MMF در عرض شیار [۱۰۵] ۳۷
شکل ۳- ۵ : تابع معکوس فاصله هوایی ۳۸
شکل ۳- ۶ : تابع معکوس فاصله هوایی برای مثال ۳-۱ ..... ۳۹
شکل ۳- ۷ : لوله شار بین روتور و استاتور ۴۰
شکل ۳- ۸ : لوله شار برای مثال ۳-۲ ..... ۴۳
شکل ۳- ۹ : مقطع عرضی ماشین مورد مطالعه (ابعاد بر حسب mm است) ۴۴
جدول ۳- ۱ : ابعاد ژنراتور نمونه ۴۴
جدول ۳- ۲ : جدول مقادیر نامی ژنراتور نمونه ۴۴
شکل ۳- ۱۰ : توزیع شار با استفاده از FEA برای مدل ۱ ..... ۴۵
شکل ۳- ۱۱ : فاصله هوایی واقعی و موثر برای یک هشتم ماشین ۴۶
شکل ۳- ۱۲ : فاصله هوایی واقعی و موثر برای کل ماشین ۴۶

شکل ۳- ۱۳ : توزیع شار با استفاده از FEA برای مدل ۲ ..... ۴۷
شکل ۳- ۱۴ : فاصله هوایی موثر برای یک گام شیار ۴۸
شکل ۳- ۱۵ : فاصله هوایی موثر برای کل ماشین با در نظر گرفتن اثر شیارهای استاتور ۴۸
شکل ۳- ۱۶ : توزیع سیم بندی ماشین مورد مطالعه ۴۹
شکل ۳- ۱۷ : تابع دور و تابع سیم پیچی برای سیم پیچیِ فاز a ۴۹
شکل ۳- ۱۸ : تابع دور و تابع سیم پیچی برای سیم پیچیِ فازهای b و c ۵۰
شکل ۳- ۱۹ : تابع سیم پیچی برای سیم پیچیِ فازهای سه گانه ماشین ۵۰
شکل ۳- ۲۰ : سیم پیچی میدان روی روتور ۵۱
شکل ۳- ۲۱ : تابع دور و تابع سیم پیچیِ سیم پیچی میدان روی روتور ۵۱
شکل ۳- ۲۲ : تابع سیم بندیِ میدان تحریک به ازایِ موقعیت های مختلف روتور ۵۱
شکل ۳- ۲۳ : اندوکتانس خودی فاز a به ازای چرخش روتور ۵۲
شکل ۳- ۲۴ : اندوکتانس های خودی و متقابل برای هر سه فاز استاتور ۵۳
شکل ۳- ۲۵ : اندوکتانس متقابل بین روتور و فازهای استاتور به ازای چرخش روتور ۵۳
شکل ۳- ۲۶ : اندوکتانس خودی سیم بندی میدان ۵۳
شکل ۳- ۲۷ : فلوچارت فرآیند کلی حل مسئله تحلیل اجزایی محدود در محیط $Maxwell$ ۵۶
شکل ۳- ۲۸ : اندوکتانس خودی فاز a بدست آمده از FEM و WFM ۵۷
شکل ۳- ۲۹ : اندوکتانس متقابل بین فازهای a و b بدست آمده از FEM و WFM ۵۷
شکل ۳- ۳۰ : اندوکتانس متقابل بین میدان تحریک و فاز a بدست آمده از FEM و WFM ۵۸
شکل ۳- ۳۱ : اندوکتانس خودی میدان تحریک بدست آمده از FEM و WFM ۵۸
شکل ۳- ۳۲ : مدار ژنراتور ۴ سیمه با بار ۳ فاز ۵۹
شکل ۳- ۳۳ : یافتن MMF برآیند در یک ژنراتور سنکرون تحت بار ۶۴
شکل ۳- ۳۴ : منحنی اشباع ماشین (الف) شار بر حسب جریان تحریک (ب) جریان تحریک اشباع و غیراشباع ۶۶
شکل ۳- ۳۵ : ماشین با یک میله دمپر ۶۹
شکل ۳- ۳۶ : مسیر در نظر گرفته شده برای قانون آمپر ۶۹
شکل ۳- ۳۷ : مسیر جدید برای قانون آمپر ۷۰
شکل ۳- ۳۸ : توزیع MMF فاصله هوایی ناشی از هادی نقطه ای ۷۱
شکل ۳- ۳۹ : تابع سیم پیچی مربوط به هادی نقطه ای ۷۱
شکل ۳- ۴۰ : تابع سیم پیچی مربوط به هادی نقطه ای با جریان برونسو ۷۱
شکل ۳- ۴۱ : میله های دمپر فرض شده زیر یک قطب ۷۲
شکل ۳- ۴۲ : توابع سیم پیچی برای چهار میله دمپر ۷۳

شکل ۳- ۴۳ : اندوکتانس متقابل بین میله های دمپر با فاز a استاتور ۷۳
شکل ۳- ۴۴ : اندوکتانس بین میلهٔ شمارهٔ یک با خودش و دیگر میله ها ۷۳
شکل ۳- ۴۵ : اندوکتانس بین سیم پیچی میدان و میله های دمپر ۷۴
شکل ۳- ۴۶ : اندوکتانس متقابل بین میله شماره ۳ با فاز a از روشهای FEM و WFM ۷۴
شکل ۳- ۴۷ : مدار معادل میله های دمپر برای یک قطب از ماشین ۷۷
شکل ۳- ۴۸ : مدار اتصال ژنراتور و بار در آزمایشات حالت سالم ۷۸
شکل ۳- ۴۹ : مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازیِ جریان فاز a آرمیچر به ازای افزایش جریان تحریک از A ۰/۵ تا A ۳ .....۷۹
شکل ۳- ۵۰ : جریان تحریک در حوزه زمان.....۷۹
شکل ۳- ۵۱ : طیف هارمونیکی جریان تحریک ۸۰
شکل ۳- ۵۲ : جریان فاز a آرمیچر به ازای افزایش جریان تحریک از A ۰/۵ تا A ۳ (حالت سه سیمه) ۸۱
شکل ۴- ۱ : مدار ژنراتور با اتصال کوتاه داخلی در فاز a.....۸۴
شکل ۴- ۲ : توابع دور و سیم بندیِ فازهای a_1 , a_2.....۸۶
شکل ۴- ۳ : . اندوکتانس های خودی و متقابل فازهای a_1 , a_2 برای چرخش ۱۸۰ درجه ای روتور ..۸۷
شکل ۴- ۴ : مقایسه اندوکتانس معادل فازهای a_1 , a_2 با اندوکتانس فاز کاملِ a ۸۷
شکل ۴- ۵ : اندوکتانس متقابل فاز $a1$ با فازهای سالم b و c ۸۸
شکل ۴- ۶ : اندوکتانس متقابل فاز $a2$ با فازهای سالم b و c ۸۸
شکل ۴- ۷ : اندوکتانس متقابلِ فازهای a_1 , a_2 با میدان تحریک ۸۹
شکل ۴- ۸ : مدار ژنراتور با اتصال کوتاه داخلی بین دو فازِ a و b.....۸۹
شکل ۴- ۹ : توابع دور و سیم بندی فازهای a_1 , a_2 و b_1 , b_2.....۹۱
شکل ۴- ۱۰ : اندوکتانس خودی فاز a_1 و اندوکتانس متقابلش با بقیه فازها و میدان تحریک ۹۲
شکل ۴- ۱۱ : اندوکتانس خودی فاز a_2 و اندوکتانس متقابلش با بقیه فازها و میدان تحریک ۹۳
شکل ۴- ۱۲ : اندوکتانس خودی فاز b_1 و اندوکتانس متقابلش با بقیه فازها و میدان تحریک ۹۴
شکل ۴- ۱۳ : اندوکتانس خودی فاز b_2 و اندوکتانس متقابلش با فاز c و میدان تحریک ۹۴
شکل ۴- ۱۴ : اندوکتانس خودی سیم پیچی تحت خطا به دست آمده از FEA.....۹۵
شکل ۴- ۱۵ : ضرایب اندوکتانس خودی سیم پیچی تحت خطا به ازای نقاط مختلف اتصال کوتاه....۹۶
شکل ۴- ۱۶ : روند آماده سازی ژنراتور جهت انجام تست های اتصال کوتاه ۹۷
شکل ۴- ۱۷ : مدار ژنراتور و بار برای انجام تست های عملی.....۹۷
شکل ۴- ۱۸ : مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی برای اتصال کوتاه تکفاز.....۹۹
شکل ۴- ۱۹ : مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی برای اتصال کوتاه فاز به فاز ۱۰۰

شکل ۴- ۲۰ : مدار شبیه سازی شده برای اتصال کوتاه حلقه ۱۰۱
شکل ۴- ۲۱ : نتایج شبیه سازی برای اتصال کوتاه حلقه ۱۰۱
شکل ۴- ۲۲ : مدار مربوط به اتصال کوتاه فاز به فاز (یک کلاف از هر فاز) ۱۰۲
شکل ۴- ۲۳ : نتایج شبیه سازی برای جریان های استاتور و جریان میدان تحریک ۱۰۳
شکل ۴- ۲۴ : جریان میله های دمپر (میله های ۱-۴) ۱۰۴
شکل ۴- ۲۵ : جریان میله های دمپر (میله های ۵-۸) ۱۰۴
شکل ۴- ۲۶ : جریان میله های دمپر (میله های ۹-۱۲) ۱۰۴
شکل ۴- ۲۷ : جریان میله های دمپر (میله های ۱۳-۱۶) ۱۰۵
شکل ۵- ۱ : طرح تشخیص خطا بر اساس مدل [۱۳۹] ۱۰۷
شکل ۵- ۲ : برخی از روش های تولید مانده ۱۰۸
شکل ۵- ۳ : برخی از روش های آنالیز مانده ۱۰۸
شکل ۵- ۴ : روش مشاهده گر حالت برای تشکیل مانده [۱۳۹] ۱۰۹
شکل ۵- ۵: نمایی از سیستم MCM ۱۱۳
شکل ۵- ۶ : نحوه نصب سیستم MCM در واحد صنعتی ۱۱۴
شکل ۵- ۷ : سیستم تشخیص و شناسایی خطا مبتنی بر مدل ۱۱۵
شکل ۵- ۸ : سیستم FDI پیشنهادی ۱۱۶
شکل ۵- ۹ : حالتهای ممکن وقوع خطای اتصالی بین فازهای a و b ۱۱۷
شکل ۵- ۱۰ : شبیه سازی جریان فاز a در حالتهای مختلف اتصال کوتاه تکفاز در فاز a ۱۲۰
شکل ۵- ۱۱ : شبیه سازی جریان فاز b در حالتهای مختلف اتصال کوتاه تکفاز در فاز a ۱۲۰
شکل ۵- ۱۲ : شبیه سازی جریان فاز c در حالتهای مختلف اتصال کوتاه تکفاز در فاز a ۱۲۱
شکل ۵- ۱۳ : شبیه سازی جریان اتصال کوتاه I_{sc} در حالتهای مختلف اتصال کوتاه تکفاز در فاز a . ۱۲۱
شکل ۵- ۱۴ : شبیه سازی جریان میدان تحریک در حالتهای مختلف اتصال کوتاه تکفاز در فاز a .. ۱۲۲
شکل ۵- ۱۵ : شبیه سازی جریان فاز a برای خطاهای $f_{am,b1}$ ۱۲۲
شکل ۵- ۱۶ : شبیه سازی جریان فاز a برای خطاهای $f_{am,b2}$ ۱۲۳
شکل ۵- ۱۷ : شبیه سازی جریان فاز a برای خطاهای $f_{am,b3}$ ۱۲۳
شکل ۵- ۱۸ : شبیه سازی جریان فاز a برای خطاهای $f_{am,b4}$ ۱۲۳
شکل ۵- ۱۹ : شبیه سازی جریان فاز a برای خطاهای $f_{am,b5}$ ۱۲۴
شکل ۵- ۲۰ : شبیه سازی جریان فاز a برای خطاهای $f_{am,b6}$ ۱۲۴
شکل ۵- ۲۱ : مدار ژنراتور برای انجام تست های عملی ۱۲۶
شکل ۵- ۲۲ : اتصال کوتاه فاز به نوترال ($f_{a2,b0}$) ۱۲۶
شکل ۵- ۲۳ : مقایسه بین نتایج اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای جریانِ فاز تحت خطا .. ۱۲۶

شکل ۵- ۲۴ : مانده r_{00} و واریانس آن قبل و بعد از خطا.....۱۲۷
شکل ۵- ۲۵ : : واریانس مانده ها در زمان خطا (خطای $f_{a2,b0}$) ۱۲۸
شکل ۵- ۲۶ : اتصال کوتاه فاز به فاز ($f_{a1,b1}$) ۱۲۸
شکل ۵- ۲۷ : مقایسه بین نتایج اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای جریانِ فازهای تحت خطا ۱۲۹
شکل ۵- ۲۸ : مانده r_{00} و واریانس آن قبل و بعد از خطا.....۱۳۰
شکل ۵- ۲۹ : واریانس مانده ها در زمان خطا (خطای $f_{a1,b1}$) ۱۳۰
شکل ۵- ۳۰ : واریانس مانده های r_{00} و r_{11} قبل و بعد از خطا ۱۳۱
شکل ۵- ۳۱ : طیف هارمونیکی مانده ها ۱۳۲
شکل ۵- ۳۲ : واریانس بر حسب طول پنجره ۱۳۲
جدول ۵- ۱ : مقدار تاخیر در تشخیص و شناسایی خطا ۱۳۳
شکل ۵- ۳۳ : نویز اندازه گیری از نوع گاوسی ۱۳۵
شکل ۵- ۳۴ : اندازه گیری در دو حالت با نویز و بدون نویز در خطای فاز به زمین ۱۳۶
شکل ۵- ۳۵ : مانده r_0 برای دو حالتِ با نویز و بدون نویز در خطای فاز به زمین ۱۳۶
شکل ۵- ۳۶ : اندازه گیری در دو حالت با نویز و بدون نویز در خطای فاز به فاز ۱۳۷
شکل ۵- ۳۷ : مانده r_{00} برای دو حالتِ با نویز و بدون نویز در خطای فاز به فاز ۱۳۷
جدول ۵- ۲ : مقدار سطح آستانه و مقدار تاخیر در تشخیص و شناسایی خطا ۱۳۷

فصل اول

مقدمه

۱ مقدمه

۱-۱ ژنراتورهای سنکرون و اهمیت آنها در صنعت

بزرگترین و شاید متداول ترین ماشین های الکتریکی که با سرعت سنکرون می گردند، ماشین های سنکرون سه فازند. ماشین سنکرون همواره یکی از مهمترین عناصر شبکه قدرت بوده و نقش کلیدی در تولید انرژی الکتریکی و کاربردهای خاص دیگر ایفاء کرده است. اگرچه ساخت ماشین های سنکرون سه فاز در مقایسه با ماشین های القائی پرهزینه است ولی بازده‌ی بیشترِ آنها در قدرت های زیاد، بزرگترین مزیت آنها به شمار می‌رود. ماشین های سنکرون سه فاز به طور وسیع برای تولید توان الکتریکی و نیز به منزله‌ی محرکه های الکتریکی بزرگ به کارمی‌روند.

۱-۲ اهمیت اقتصادی عملکرد بهینه ژنراتور سنکرون و تاثیر عیوب در آن

نقص داخلی ژنراتور علاوه بر زیانی که به خود ژنراتور می رساند، باعث قطع شدن قسمت بزرگی از انرژی نیروگاه نیز می شود و در صورتی که زیانهای وارد بر ژنراتور در اثر نداشتن وسایل حفاظتی صحیح، و قطع به موقع آن ازدیاد پیدا کند و گسترش یابد، ترمیم و تعمیر محل عیب دیده ممکن است مدت ها به درازا بکشد و بهره برداری از ژنراتور برای مدت زیادی متوقف گردد. در نتیجه به طور اجبار در تمام این مدت از ژنراتورهای دیگر بار بیشتری گرفته می شود تا کمبود برق شبکه جبران شود. اضافه بار در ژنراتور علاوه بر خسارت باعث کوتاهیِ طول عمر و دوام آنها نیز می گردد. لذا لازم است خطاهای داخل ژنراتور را پیش از توسعهٔ آن ها شناخت و برطرف کرد.

۱-۳ روش های پایش سلامت و نگهداری ژنراتورهای سنکرون

در دهه های اخیر دانش کاربری و نگهداری نیروگاه ها و دیگر فرآیندهای صنعتی وابسته به ژنراتورهای سنکرون دچار تحولات و پیشرفت های زیادی شده است. مسئولین و مدیران صنعت، معمولاً برای کم کردن هزینه ها در فضاهای رقابتی امروز سعی دارند هرچه بیشتر ژنراتورهای سنکرون را در طول عمر مفیدشان به سیستم هایی ایمن تر و سودآورتر تبدیل کنند.

۱-۳-۱ مروری بر روش های کلی تعمیر و نگهداری ادوات صنعتی

در بیشتر تجهیزات صنعتی طول عمر مفید وسیله از طول عمر تک تک قطعات آن بیشتر است. در نتیجه یکی از مهمترین موارد مورد توجه در طراحی و ساخت این تجهیزات، تحلیل عیوب و در نظر

داشتن زمان تعمیر و تعویض قطعات حیاتی آن است. در حالیکه هر روزه کاربران بیشتری به بهینه سازی، ایمنی و مسائل زیست محیطی ادوات صنعتی توجه نشان می دهند نیاز روزافزون به توسعه روش های بهتر تعمیر و نگهداری بیش از پیش اهمیت خود را آشکار می کند. مهمترین سیاست های تعمیر و نگهداری تجهیزات صنعتی را می توان به سه دسته تقسیم کرد:

- تداوم استفاده تا زمان خرابی دستگاه[1]: در این روش از تجهیز صنعتی تا زمان از کارافتادگی آن به طور مداوم استفاده می شود و بعد از خرابی دستگاه نسبت به تعمیر یا تعویض قطعات آن اقدام می شود[2].
- روش پیشگیرانه[3](*PPM*): در این روش بازدید و تعمیرات متناوب با زمان بندی مشخص معمولاً قبل از زمان پیش بینی شده تجربی برای خرابی بر روی سیستم صورت می گیرد.
- روش پیش بینانه[4](*CBPM*): این روش که به آن روش نگهداری مبتنی بر وضعیت هم گفته می شود روشی است که در آن با استفاده از اطلاعات به دست آمده از وضعیت سیستم، خرابی و عیوب آن پیش بینی و نسبت به رفع آنها اقدام می شود.

در ابتدا ممکن است راه حل اول آسانتر به نظر برسد ولی باید توجه داشت که از کارافتادگی بی موقع یک وسیله صنعتی در یک فرآیند می تواند باعث تحمیل هزینه های فراوان مالی و حتی جانی شود. کافی است نتایج چنین راهکاری را برای موتور یک هواپیمای جت مسافربری در نظر بگیرید علاوه برآن ممکن است در اثر تداوم استفاده از یک تجهیز صنعتی معیوب، عیب تا حدی گسترده شود که امکان تعمیر آن فراهم نشود.

با استناد به دلایل مطرح شده به طور سنتی معمولاً از روش دوم در تعمیر و نگهداری تجهیزات صنعتی استفاده می شد ولی مشکل زمانی بروز می کند که بدانیم قطعات و ابزارآلات صنعتی در بازه های زمانی ثابت و از پیش تعیین شده از کار نمی افتند و چنین مسئله ای وابستگی مستقیم به شرایط استفاده از آنها دارد. سه مشکل عمده در به کارگیری روش دوم به شرح زیر است:

خرابی ناگهانی: بعضی از خرابی ها ممکن است به طور ناگهانی و پیش بینی نشده بین دو بازه تعمیرات اتفاق افتند و باعث ایجاد مشکل در فرآیند شوند.

---

1 run-to-failure
2 breakdown maintenance
3 planed preventive maintenance
4 condition based predictive maintenance