



دانشکده ی مهندسی

گروه برق

پروژه ی کارشناسی

گرایش: برق - قدرت

عنوان: مدلسازی و شبیه سازی حالت گذرای ماشین سنکرون با استفاده از

سیمولینک متلب

استاد راهنما: دکتر اجاقی

نگارش: ابوالفضل کریمی زرنندی

اسفند ۹۱

بسمه تعالی

حمد و سپاس، خداوند سبحان را سزاست که تمام وجود از فضل مطلق اوست و سلام و تحیت، قله ی انسانیت و خاندان پاک و مطهرش را روا .

زات اقدس ربوبی را شاکرم به خاطر نعمات وصف ناشدنی که عنایت نمود و بنابر روایت شریفه ی " و من لم یشکر المخلوق ؛ لم یشکر الخالق " قدر دان زحمات بی حد و حصر پدر و مادر بزرگوارم هستم که نه تنها در حق من ، از هیچ امری دریغ ننموده اند ، بلکه بسیار فراتر از وظیفه خود قدم برداشته اند و سپاس گذار معلمان و اساتید گرامیم می باشم که پیشرفت خود را مدیون مجاهدت های ایشانم .

و از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر اجاقی تقدیر و تشکر ویژه دارم که دلسوزانه مرا در نگارش این پروژه راهنمایی نموده اند .

امیدوارم که ایشان و همه ی دغدغه مندان این مرزوبوم موفق و مؤید باشند . این وجیزه ی ناقابل را تقدیم به پدر و مادرم عزیزم و گرانقدر می نمایم . ان شاءالله توانسته باشم ذره ای از زحمات بی کران آنان را جبران کنم .

فصل اول

تاریخچه و ساختار

مقدمه ۲

تحولات دهه ی ۱۹۷۰ ۴

تحولات دهه ی ۱۹۸۰ ۵

تحولات دهه ی ۱۹۹۰ ۵

تحولات ۲۰۰۰ به بعد ۷

فصل دوم

ساختار ماشین سنکرون

معرفی ماشین سنکرون ۱۰

اصول کار ماشین سنکرون ۱۱

بررسی تئوریک پدیده ی القای ولتاژ ۱۳

مدار معادل ماشین سنکرون ۱۴

آزمایش مدار باز ۱۶

آزمایش اتصال کوتاه ۱۷

محاسبه ی راکتانس سنکرون ۱۸

فصل سوم

دیاگرام برداری ماشین سنکرون

نمودار برداری ولتاژ و جریان ۲۱

رگولاسیون ولتاژ ۲۳

روشهای محاسبه ی رگولاسیون ولتاژ ۲۳

روش امپدانس سنکرون ۲۴

روش آمپردور ۲۶

روش پوتیه ۲۷

روش رسم مثلث پوتیه ۲۸

مراحل بدست آوردن رگولاسیون ولتاژ با استفاده از روش پوتیه ۲۹

فصل چهارم

حالت های گذرا و پایداری ماشین سنکرون

حالت گذرا در موتور و ژنراتور ۳۲

بررسی اتصال کوتاه در ژنراتور ۳۲

جریان های اتصال کوتاه ژنراتور سه فاز در حالت بی باری ۳۳

مدار معادل ژنراتور سنکرون در حالت های اتصال کوتاه و بارداری ۳۴

رابطه ی جریان اتصال کوتاه ۳۵

بررسی پایداری ماشین سنکرون ۳۷

پایداری حالت دایم ۳۷

پایداری گذرا ۳۸

بررسی پایداری سیستم با وجود تغییرات کوچک ۳۹

معادله ی نوسان ۴۰

حل سیگنال کوچک معادله ی نوسان ۴۰

پایداری دینامیکی ماشین سنکرون در حضور تغییرات بزرگ ۴۳

مفهوم پایداری با استفاده از شکل ۴۴

فصل پنجم

شبیه سازی ماشین سنکرون با استفاده از سیمولینک متلب ۴۶

مقدمه ۴۶

فهرست علائم	۴۷
مدل ماشین سنکرون متصل به شین بی نهایت	۴۸
معادلات قسمت الکتریکی	۴۸
معادلات قسمت مکانیکی	۴۹
معادلات سیستم تحریک	۵۰
معادلات ترمینال ژنراتور	۵۰
معادلات سیستم گاورنر و توربین	۵۱
مدل شبیه سازی شده سیستم تحریک	۵۱
مدل شبیه سازی شده ی قسمت مکانیکی	۵۲
مدل شبیه سازی شده ی توربین و گاورنر	۵۲
معادلات مربوط به ولتاژ ، جریان و توان حقیقی	۵۳
زیر سیستم مربوط به محاسبه ی جریان	۵۴
زیر سیستم مربوط به محاسبه ی ولتاژ ترمینال	۵۴
زیر سیستم مربوط به محاسبه ی توان حقیقی	۵۵
زیر سیستم مربوط به عملکرد متوالی قسمت‌های الکتریکی ماشین	۵۵
مدل کامل حالت گذرای ماشین سنکرون	۵۶
زمان خطای سه فاز	۵۷
پارامترها و متغیر های سیستم	۵۸
نتیجه ی شبیه سازی شده ی تغییرات ولتاژ ترمینال	۵۸
نتیجه ی شبیه سازی شده ی تغییرات توان الکتریکی	۵۹
نتیجه ی شبیه سازی شده ی تغییرات زاویه ی روتور	۵۹
نتیجه ی شبیه سازی شده ی تغییرات سرعت زاویه ای	۶۰
نتیجه گیری و پیشنهادات	۶۱
مراجع	۶۳

در اواخر دهه ۱۹۴۰ کمپانی جنرال الکتریک به منظور بهبود سیستم عایق سیم پیچی استاتور ترکیبات اپوکسی را برگزید. در نتیجه این تحقیقات، یک سیستم به اصطلاح رزین ریچ عرضه شد که در آن رزین در نوارها و یا وارنیش مورد استفاده بین لایه ها قرار می گرفت.

در دهه های ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۰ همراه با افزایش ظرفیت ژنراتورها و در نتیجه افزایش استرسهای حرارتی، تعداد خطاهای عایقی به طرز چشمگیری افزایش یافت. پس از بررسی مشخص شد علت اکثر این خطاها بروز پدیده جدا شدن نوار یا ترک خوردن آن است. این پدیده به علت انبساط و انقباض ناهمبند هادی مسی و هسته آهنی به وجود می آمد. برای حل این مشکل بعد از جنگ جهانی دوم محققان شرکت وستینگهاوس کار آزمایشگاهی را بر روی پلی استرهای جدید آغاز کرده و سیستمی با نام تجاری ترمالاستیک عرضه کردند.

نسل بعدی عایقها که در نیمه اول دهه ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفتند، کاغذهای فایبرگلاس بودند. در ادامه در سال ۱۹۵۵ یک نوع عایق مقاوم در برابر تخلیه جزئی از ترکیب ۵۰ درصد رشته های فایبرگلاس و ۵۰ درصد رشته های PET بدست آمد که روی هادی پوشانده می شد و سپس با حرارت دادن در کوره های مخصوص، PET ذوب شده و روی فایبرگلاس را می پوشاند. این عایق بسته به نیاز به صورت یک یا چند لایه مورد استفاده قرار می گرفت. عایق مذکور با نام عمومی پلی گلاس و نام تجاری داگلاس وارد بازار شد.

مهمترین استرسهای وارد بر عایق استرسهای حرارتی است. بنابراین سیستم های عایقی همواره در ارتباط تنگاتنگ با سیستم های خنک سازی بوده اند. خنک سازی در ژنراتورهای اولیه توسط هوا انجام می گرفت. بهترین نتیجه بدست آمده با این روش خنک سازی یک ژنراتور ۲۰۰ MVA با سرعت ۱۸۰۰ rpm بود که در سال ۱۹۳۲ در منطقه بروکلین نیویورک نصب شد. اما با افزایش ظرفیت ژنراتورها نیاز به سیستم خنک سازی موثرتری احساس شد. ایده خنک سازی با هیدروژن اولین بار در سال ۱۹۱۵ توسط ماکس شولر مطرح شد. تلاش او برای ساخت چنین سیستمی از ۱۹۲۸ آغاز و در سال ۱۹۳۶ با ساخت اولین نمونه با سرعت ۳۶۰۰ rpm به نتیجه رسید. در سال ۱۹۳۷ جنرال الکتریک اولین توربوژنراتور تجاری خنک شونده با هیدروژن را روانه بازار کرد. این تکنولوژی در اروپا بعد از سال ۱۹۴۵ رایج شد. در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ روشهای مختلف خنک سازی مستقیم مانند خنک سازی

سیم پیچ استاتور با گاز، روغن و آب پا به عرصه ظهور گذاشتند تا آنجا که در اواسط دهه ۱۹۶۰ اغلب ژنراتورهای بزرگ با آب خنک می شدند. ظهور تکنولوژی خنک سازی مستقیم موجب افزایش ظرفیت ژنراتورها به میزان $MVA 1500$ شد.

یکی از تحولات برجسته ای که در دهه ۱۹۶۰ به وقوع پیوست تولید اولین ماده ابررسانای تجاری یعنی نیوبیوم تیتانیوم بود که در دهه های بعدی بسیار مورد توجه قرار گرفت.

۱-۲- تحولات دهه ۱۹۷۰

در این دهه تحول مهمی در فرآیند عایق کاری ژنراتور رخ داد. قبل از سال ۱۹۷۵ اغلب عایقها را توسط رزینهای محلول در ترکیبات آلی فرار اشباع می کردند. در این فرآیند، ترکیبات مذکور تبخیر و در جو منتشر می شد. با توجه به وضع قوانین زیست محیطی و آغاز نهضت سبز در اوایل دهه ۱۹۷۰، محدودیتهای شدیدی بر میزان انتشار این مواد اعمال شد که حذف آنها را از این فرآیند در پی داشت.

در نتیجه استفاده از مواد سازگار با محیط زیست در تولید و تعمیر ماشینهای الکتریکی مورد توجه قرار گرفت. استفاده از رزینهای با پایه آبی یکی از اولین پیشنهاداتی بود که مطرح شد، اما یک راه حل جامعتر که امروزه نیز مرسوم است، کاربرد چسبهای جامد بود. در همین راستا تولید نوارهای میکای رزین ریچ بدون حلال نیز توسعه یافت.

در سال ۱۹۷۰ کمپانی جنرال الکتریک ساخت یک ژنراتور ابررسانا را با استفاده از هادی های دمپایین، با هدف نصب در شبکه آغاز کرد.

ساخت و تست این ژنراتور $MVA 20$ ، دو قطب و $rpm 3600$ در سال ۱۹۷۹ به پایان رسید. در این ماشین از روش طراحی هسته هوایی بهره گرفته شده بود و سیم پیچ میدان آن توسط هلیوم مایع خنک می شد. این ژنراتور، بزرگترین ژنراتور ابررسانای تست شده تا آن زمان (۱۹۷۹) بود.

در سال ۱۹۷۹ وستینگهاوس و اپری ساخت یک ژنراتور ابررسانای $MVA 300$ را آغاز کردند. این پروژه در سال ۱۹۸۳ به علت شرایط بازار جهانی با توافق طرفین لغو شد.

در همین زمینه کمپانی زیمنس ساخت ژنراتورهای دمپایین را در اوایل دهه ۱۹۷۰ شروع کرد. در این

مدت یک نمونه رتور و یک نمونه استاتور با هسته آهنی برای ژنراتور MVA ۸۵۰ با سرعت ۳۰۰۰ rpm ساخته شد، اما به دلیل مشکلاتی تست عملکرد واقعی آن انجام نشد.

در این دهه آلستوم نیز طراحی یک رتور ابرسانا برای یک توربو ژنراتور سنکرون را آغاز کرد. این رتور در یک ماشین ۲۵۰ MW به کار رفت.

۱-۳- تحولات دهه ۱۹۸۰

در این دهه نیز همچون دهه های گذشته سیستم های عایقی از زمینه های مهم تحقیقاتی بوده است. در

این دهه آلستوم یک فرمول جدید اپوکسی بدون حلال کلاس F در ترکیب با گلاس فابریک و نوع

خاصی از کاغذ میکا با نام تجاری دورتناکس را ارائه داد. این سیستم عایق کاری دارای استحکام

مکانیکی بیشتر، استقامت عایقی بالاتر، تلفات دی الکتریک پایینتر و مقاومت حرارتی کمتری نسبت به

نمونه های قبلی بود.

در ادامه کار بر روی پروژه های ابرسانا، در سال ۱۹۸۸ سازمان توسعه تکنولوژی صنعتی و انرژیهای نو

ژاپن پروژه ملی ۱۲ ساله سوپر جی ام را آغاز کرد که نتیجه آن در دهه های بعدی به ثمر رسید.

سیستم های خنک سازی ژنراتورهای ابرسانا هنوز در حال پیشرفت بودند. در این زمینه می توان به

ارایه طرح سیستم خنک سازی تحت فشار توسط انستیتو جایی ژاپن اشاره کرد. این طرح که در سال

۱۹۸۵ ارائه شد دارای یک مبدل حرارتی پیشرفته و یک مایع ساز هلیوم با ظرفیت ۳۵۰ لیتر بر ثانیه بود.

۱-۴- تحولات دهه ۱۹۹۰

در این دهه نیز همچون دهه های گذشته تلاشهای زیادی در جهت بهبود سیستمهای عایقی صورت

گرفت. در این میان می توان به ارائه سیستمهای عایق میکا پال که توسط کمپانی جنرال الکتریک از

ترکیب انواع آلکیدیها و اپوکسیها در سال ۱۹۹۰ بدست آمده بود، اشاره کرد. در سال ۱۹۹۲ شرکت

وستینگهاوس الکتریک یک سیستم جدید عایق سیم پیچ رتور کلاس F را ارائه کرد. این سیستم شامل

یک لایه اپوکسی گلاس بود که با چسب پلی امید اپوکسی روی هادی مسی چسبانده می شد. مقاومت

در برابر خراشیدگی، استرسهای الکتریکی و مکانیکی و کاهش زوال حرارتی از مزایای این سیستم بود. گروه صنعتی ماشینهای الکتریکی و توربین نانجینگ عایق سیم پیچ رتور جدیدی از جنس نومکس اشباع شده با وارنیش چسبی را در سال ۱۹۹۸ ارائه کرد. از مهمترین مزایای این سیستم می توان به انعطاف پذیری و استقامت عایقی، بهبود اشباع شونده با وارنیش، تمیزکاری آسان و عدم جذب رطوبت اشاره کرد.

از مهمترین تحولاتی که در این دهه در زمینه ژنراتورهای ابررسانا صورت گرفت می توان به نتایج پروژه سوپرچی ام که از دهه قبل در ژاپن آغاز شده بود، اشاره کرد. حاصل این پروژه ساخت و تست سه مدل رتور ابررسانا برای یک استاتور بود. مدل اول که در ترکیب با استاتور، خروجی ۷۹ MW را می داد در سال ۱۹۹۷ و مدل دوم در سال ۱۹۹۸ با خروجی ۷/۷۹ MW تست شد. نهایتاً مدل سوم که دارای یک سیستم تحریک پاسخ سریع بود در سال ۱۹۹۹ تست و در شبکه قدرت نصب شد.

با بکارگیری مواد ابررسانای دمابالا در این دهه، تکنولوژی ژنراتورهای سنکرون ابررسانا وارد مرحله جدیدی شد. کمپانی جنرال الکتریک طراحی، ساخت و تست یک سیم پیچ دمابالا را در اواسط این دهه به پایان رساند. در ادامه، همکاری وستینگهاوس و شرکت ابررسانای آمریکا به طراحی یک ژنراتور ابررسانای دما بالای ۴ قطب، ۱۸۰۰ rpm، ۶۰ Hz انجامید.

این دهه شاهد پیشرفتهای مهمی در زمینه سیستمهای تحریک مانند ظهور سیستمهای تحریک استاتیک الکترونیکی بود. استفاده از اینگونه سیستمها باعث انعطاف پذیری در طراحی سیستمهای تحریک و کاهش مشکلات نگهداری جاروبک در اکسایترهای گردان می شد. یکی از اولین نمونه های این سیستمها در سال ۱۹۹۷ توسط آقای شافر از کمپانی باسلر الکتریک آلمان ارائه شد.

در این مقطع زمانی کاربرد سیستمهای دیجیتالی در تحریک ژنراتورها آغاز شد. یکی از اولین نمونه های سیستم تحریک دیجیتالی، سیستمی بود که در سال ۱۹۹۹ توسط آقای ارسک از دانشگاه زاگرب کرواسی ارائه شد.

در ادامه تلاشهای صورت گرفته برای بهبود خنک سازی، شرکت زیمنس وستینگهاوس طرح یک ژنراتور بزرگ با خنک سازی هوایی را در سال ۱۹۹۹ ارائه داد. ارائه این طرح آغازی بر تغییر طرحهای خنک

سازی از هیدروژنی به هوایی بود. استفاده از عایقهای استاتور نازک دما بالا و کاربرد محاسبات کامپیوتری دینامیک شاره موجب اقتصادی شدن این طرح نسبت به خنک سازی هیدروژنی شد.

پایان دهه ۹۰ مصادف با ظهور تکنولوژی پاورفرمر بود. در اوایل بهار سال ۱۹۹۸ دکتر لیجون از کمپانی ABB سوئد، ایده تولید انرژی الکتریکی در ولتاژهای بالا را ارائه کرد. مهمترین ویژگی این طرح استفاده

از کابلهای فشار قوی پلی اتیلن متقاطع معمول در سیستمهای انتقال و توزیع در سیم پیچی استاتور است.

در این طرح به علت سطح ولتاژ بسیار بالا از کابلهای استوانه ای به منظور حذف تخلیه جزئی و کرونا استفاده می شود.

در سال ۱۹۹۸ اولین نمونه پاورفرمر در نیروگاه پرجوس واقع در شمال سوئد نصب شد. این پاورفرمر دارای ولتاژ نامی ۴۵ KV، توان نامی ۱۱ MVA و سرعت نامی ۶۰۰ rpm بود.

یکی از مسائل مهم مطرح در پاورفرمر فیکس شدن دقیق کابلها در شیارها به منظور جلوگیری از تخریب لایه بیرونی نیمه هادی کابل در اثر لرزشها است. به این منظور کابلها را با استفاده از قطعات مثلثی سیلیکون - رابر فیکس می کنند.

به علت پایین بودن جریان سیم پیچ استاتور پاورفرمر تلفات مسی ناچیز است، لذا استفاده از یک مدار خنک سازی آبی کافی است. سیستم خنک سازی دمای عملکرد کابلها را در حدود ۷۰ درجه سانی گراد

نگه می دارد، در حالی که طراحی عایقی کابلها برای دمای نامی ۹۰ درجه انجام شده است. لذا می توان پاورفرمر را بدون مشکل خاصی زیر اضافه بار برد.

۱-۵- تحولات ۲۰۰۰ به بعد

همچون دهه های پیش، روند روزافزون استفاده از روشهای عددی خصوصاً روش اجزاء محدود ادامه یافت. آقای زولیانگ یک روش اجزاء محدود جدید را با بهره گیری از عناصر قوسی شکل در مختصات استوانه ای ارائه کرد. مزایای این روش دقت زیاد و فرمولبندی ساده بود. این روش برای تحلیل میدان

