



دانشگاه زنجان

عنوان پایان نامه:

### شبیه سازی آزمایش های استاندارد ماشین سنکرون

استاد راهنما:

دکتر منصور اجاقی

دانشجو:

حمید رضا باقری ۹۰۴۴۲۲۰۹



## فهرست مطالب

چکیده	۱-۱
فصل اول : مروری بر ماشین های سنکرون از گذشته تا حال	۲
۱-۱- تاریخچه وساختار	۲
۱-۲- تحولات دهه ۱۹۷۰	۴
۱-۲-۱- جمع بندی تحولات دهه ۱۹۷۰	۶
۱-۳- تحولات دهه ۱۹۸۰	۶
۱-۳-۱- جمع بندی تحولات دهه ۱۹۸۰	۷
۱-۴- تحولات دهه ۱۹۹۰	۷
۱-۴-۱- جمع بندی تحولات دهه ۱۹۹۰	۹
۵- تحولات ۲۰۰۰ به بعد	۱۰
۵-۱- جمع بندی تحولات ۲۰۰۰ به بعد	۱۱
۶- نتیجه گیری	۱۱
فصل دوم : ژنراتور سنکرون	۱۳
۱-۲- ساختمان ژنراتورهای سنکرون	۱۳
۱-۱-۲- رتور با قطب صاف یا استوانه ای: رتورهای آرنایگاه پروژه برق دانشگاه زنجان	۱۴
۲-۱-۲- رتور با قطب برجسته:	۱۵
۲-۲- اساس کار ژنراتور سنکرون	۱۶
۳-۲- مقادیر نامی ژنراتور سنکرون	۱۷
۱-۳-۲- فرکانس نامی ژنراتور سنکرون:	۱۷
۲-۳-۲- ولتاژ ژنراتور سنکرون	۱۸
۳-۳-۲- توان ظاهری و ضریب توان نامی	۱۹
۴-۳-۲- کار کوتاه مدت	۱۹
۵-۳-۲- ضریب سرویس	۲۰
۴-۲- تلفات و راندمان در ژنراتورهای سنکرون	۲۰
۵-۲- مدار معادل ژنراتور سنکرون استوانه ای	۲۲
۶-۲- اتصال ژنراتور سنکرون به شبکه (شین بی نهایت)	۲۵

دانشگاه زنجان و اسکنده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اسکنده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اسکنده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اسکنده مهندسی گروه برق

۲۶-۱-۶-۲ سنکروسکوپ ..... ۲۶

۲-۶-۲ لامپ های سنکرونیزاسیون ..... ۲۶

۲-۶-۳-۳ دستگاه RST متر ..... ۲۷

۲-۷-۲ خلاصه ..... ۲۹

فصل سوم : موتور سنکرون ..... ۳۰

۱-۳-۱ ساختمان موتور سنکرون ..... ۳۰

۲-۳-۲ اصول کار موتور سنکرون ..... ۳۰

۳-۳-۳ روشهای راه اندازی موتور سنکرون ..... ۳۱

۱-۳-۳ راه اندازی موتور با کاهش فرکانس الکتریکی ..... ۳۱

۲-۳-۳ راه اندازی موتور به وسیله گرداننده اولیه خارجی ..... ۳۱

۳-۳-۳ راه اندازی موتور با استفاده از سیم پیچ های میرایی (فقس لبنان): ..... ۳۱

۴-۳-۴ رفتار موتور سنکرون ..... ۳۴

۱-۴-۳ مدار معادل موتور سنکرون ..... ۳۴

۲-۴-۳ نمودار برداری (فازوری) در موتور سنکرون ..... ۳۵

۵-۳ معادله توان موتور سنکرون ..... ۳۶

۶-۳ حالات کاری موتور سنکرون ..... ۳۸

۱-۶-۳ حالت نرمال ..... ۳۸

۲-۶-۳ حالت زیر تحریک ..... ۳۸

۳-۶-۳ حالت فوق تحریک ..... ۳۸

۷-۳ خلاصه ..... ۴۰

فصل چهارم : بدست آوردن پارامتر مدار معادل ماشین سنکرون ..... ۴۱

۱-۴-۱ تئوری آزمایش ..... ۴۱

۱-۱-۴-۱ آزمایش بی باری ..... ۴۲

۲-۱-۴-۱ آزمایش اتصال کوتاه ..... ۴۳

منابع ..... ۴۶

## چکیده

ماشین های سنکرون ماشینی هایی هستند که با سرعت ثابت با نام سرعت سنکرون می چرخند. این ماشین ها جزو ماشین های جریان متناوب (AC) می باشند. در این ماشین ها بر خلاف ماشین های القایی (آسنکرون)، میدان گردان فاصله هوایی و روتور با یک سرعت که همان سرعت سنکرون است، گردش می کند.

امروزه ژنراتورهای سنکرون سه فاز ستون فقرات شبکه های برق را در جهان تشکیل می دهند و ژنراتورهای عظیم در نیروگاه ها وظیفه تولید انرژی الکتریکی را به دوش میکشند. موتورهای سنکرون نیز در

موقعی به کار میروند که به سرعت ثابت نیاز باشد. یکی از ویژگی های خوب موتورهای سنکرون این است

که می تواند از شبکه توان راکتیو دریافت کند و یا به شبکه توان راکتیو تزریق کنند. ماشین های سنکرون اعم از ژنراتور و موتور جزء ماشین های دو تحریکه محسوب میشوند، زیرا سیم پیچ آنها توسط منبع DC

تغذیه گشته و از استاتور آن جریان AC میگذرد. باید دانست ساختمان ژنراتور و موتور سنکرون سه فاز

شبیه یکدیگر است. شار شکاف هوایی در این ماشین ها در نتیجه شارهای حاصله از جریان روتور و جریان استاتور می باشد. در ماشین های القایی تنها عامل تحریک کننده، جریان استاتور می باشد، زیرا جریان

روتور بر اثر القا پدید می آید. لذا موتورهای القایی همواره در حالت پسفاز مورد بهره برداری قرار می گیرند،

زیرا به جریان پس فاز راکتوری نیاز داریم تا شار در ماشین حاصل شود. اما در موتورهای سنکرون اگر مدار تحریک روتور تحریک لازم را فراهم سازد، استاتور جریان راکتیو نخواهد کشید و موتور در حالت ضریب توان

واحد کار خواهد کرد. اگر جریان تحریک روتور کاهش یابد، جریان راکتیو از شبکه به موتور سرازیر می شود

تا به روتور جهت مغناطیس کنندگی ماشین کمک کند. در این صورت موتور سنکرون سه فاز در حالت پس

فاز کار خواهد کرد. اگر جریان تحریک رتور زیاد شود ( میدان رتور افزایش می یابد )، در این صورت جریان

راکتیو پیشفاز از شبکه کشیده می شود تا با میدان رتور مخالفت کند.

## فصل اول: مروری بر ماشین های سنکرون از گذشته تا حال

### ۱-۱- تاریخچه و ساختار

ژنراتور سنکرون تاریخچه‌ای بیش از صد سال دارد. اولین تحولات ژنراتور سنکرون در دهه ۱۸۸۰ رخ داد. در نمونه‌های اولیه مانند ماشین جریان مستقیم، روی آرمیچر گردان یک یا دو جفت سیم‌پیچ وجود داشت که انتهای آنها به حلقه‌های لغزان متصل می‌شد و قطب‌های ثابت روی استاتور، میدان تحریک را تامین می‌کردند. به این طرح اصطلاحاً قطب خارجی می‌گفتند. در سال‌های بعد نمونه دیگری که در آن محل قرار گرفتن میدان و آرمیچر جابجا شده بود مورد توجه قرار گرفت. این نمونه که شکل اولیه ژنراتور سنکرون بود، تحت عنوان ژنراتور قطب داخلی شناخته و جایگاه مناسبی در صنعت برق پیدا کرد. شکل‌های مختلفی از قطب‌های مغناطیسی و سیم‌پیچ‌های میدان روی رتور استفاده شد، در حالی که سیم‌پیچی استاتور، تک‌فاز یا سه‌فاز بود. محققان بزودی دریافتند که حالت بهینه از ترکیب سه جریان متناوب با اختلاف فاز نسبت به هم بدست می‌آید. استاتور از سه جفت سیم‌پیچ تشکیل شده بود که در یک طرف به نقطه اتصال ستاره و در طرف دیگر به خط انتقال متصل بودند.

هاسلولاندر اولین ژنراتور سنکرون سه فاز را در سال ۱۸۸۷ ساخت که توانی در حدود  $2/8$  کیلووات را در سرعت ۹۶۰ دور بر دقیقه (فرکانس ۳۲ هرتز) تولید می‌کرد. این ماشین دارای آرمیچر سه فاز ثابت و رتور سیم‌پیچی شده چهار قطبی بود که میدان تحریک لازم را تامین می‌کرد. این ژنراتور برای تامین بارهای محلی مورد استفاده قرار می‌گرفت.

در سال ۱۸۹۱ برای اولین بار ترکیب ژنراتور و خط بلند انتقال به منظور تامین بارهای دور دست با موفقیت تست شد. انرژی الکتریکی تولیدی این ژنراتور توسط یک خط انتقال سه فاز از لافن به نمایشگاه بین‌المللی فرانکفورت در فاصله ۱۷۵ کیلومتری منتقل می‌شد. ولتاژ فاز به فاز ۹۵ ولت، جریان فاز ۱۴۰۰ آمپر و فرکانس نامی ۴۰ هرتز بود. رتور این ژنراتور که برای سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه طراحی شده بود، ۳۲ قطب داشت. قطر آن ۱۷۵۲ میلیمتر و طول موثر آن ۳۸۰ میلیمتر بود. جریان تحریک توسط یک ماشین جریان مستقیم تامین می‌شد.

استاتور آن ۹۶ شیار داشت که در هر شیار یک میله مسی به قطر ۲۹ میلیمتر قرار می‌گرفت. از آنجا که اثر پوستی تا آن زمان شناخته نشده بود، سیم‌پیچی استاتور متشکل از یک میله برای هر قطب فاز بود. بازده این ژنراتور ۹۶/۵٪ بود که در مقایسه با تکنولوژی آن زمان بسیار عالی می‌نمود. طراحی و ساخت این ژنراتور را چارلز براون انجام داد.

در آغاز، اکثر ژنراتورهای سنکرون برای اتصال به توربین های آبی طراحی می شدند، اما بعد از ساخت توربین های بخار قدرتمند، نیاز به توربوژنراتورهای سازگار با سرعت بالا احساس شد. در پاسخ به این نیاز اولین توربوتور در یکی از زمینه های مهم در بحث ژنراتورهای سنکرون، سیستم عایقی است. مواد عایقی اولیه مورد استفاده مواد طبیعی مانند فیبرها، سلولز، ابریشم، کتان، پشم و دیگر الیاف طبیعی بودند. همچنین رزین های طبیعی بدست آمده از گیاهان و ترکیبات نفت خام برای ساخت مواد عایقی مورد استفاده قرار می گرفتند. در سال ۱۹۰۸ تحقیقات روی عایق های مصنوعی توسط دکتر بایکلند آغاز شد. در طول جنگ جهانی اول رزین های آسفالتی که بیتومن نامیده می شدند، برای اولین بار همراه با قطعات میکا جهت عایق شیار در سیم پیچ های استاتور توربوژنراتورها مورد استفاده قرار گرفتند. این قطعات در هر دو طرف، با کاغذ سلولز مرغوب احاطه می شدند. در این روش سیم پیچ های استاتور ابتدا با نوارهای سلولز و سپس با دو لایه نوار کتان پوشیده می شدند. سیم پیچ ها در محفظه ای حرارت می دیدند و سپس تحت خلا قرار می گرفتند. بعد از چند ساعت عایق خشک و متخلخل حاصل می شد. سپس تحت خلا، حجم زیادی از قیر داغ روی سیم پیچ ها ریخته می شد. در ادامه محفظه با گاز نیتروژن خشک با فشار ۵۵۰ کیلو پاسکال پر و پس از چند ساعت گاز نیتروژن تخلیه و سیم پیچ ها در دمای محیط خنک و سفت می شدند. این فرآیند وی پی آی نامیده می شد.

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 استرس های 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 ناهماهنگ 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 عایق ها 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 جزیی 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 می‌گرفت. عایق مذکور با نام عمومی پلی‌گلاس و نام تجاری داگلاس وارد بازار شد.

مهمترین استرس‌های وارد بر عایق استرس‌های حرارتی است. بنابراین سیستم‌های عایقی همواره در ارتباط تنگاتنگ با سیستم‌های خنک‌سازی بوده‌اند. خنک‌سازی در ژنراتورهای اولیه توسط هوا انجام می‌گرفت. بهترین نتیجه بدست آمده با این روش خنک‌سازی یک ژنراتور 200 MVA با سرعت 1800 rpm بود که در سال 1932 در منطقه بروکلین نیویورک نصب شد. اما با افزایش ظرفیت ژنراتورها نیاز به سیستم

خنک‌سازی موثرتری احساس شد. ایده خنک‌سازی با هیدروژن اولین بار در سال 1915 توسط ماکس شولر مطرح شد. تلاش او برای ساخت چنین سیستمی از 1928 آغاز و در سال 1936 با ساخت اولین نمونه با سرعت 3600 rpm به نتیجه رسید. در سال 1937 جنرال الکتریک اولین توربوژنراتور تجاری خنک‌شونده با هیدروژن را روانه بازار کرد. این تکنولوژی در اروپا بعد از سال 1945 رایج شد. در دهه‌های 1950 و 1960 روشهای مختلف خنک‌سازی مستقیم مانند خنک‌سازی سیم‌پیچ استاتور با گاز، روغن و آب پا به عرصه ظهور گذاشتند تا آنجا که در اواسط دهه 1960 اغلب ژنراتورهای بزرگ با آب خنک می‌شدند. ظهور تکنولوژی خنک‌سازی مستقیم موجب افزایش ظرفیت ژنراتورها به میزان 1500 MVA شد.

یکی از تحولات برجسته‌ای که در دهه 1960 به وقوع پیوست تولید اولین ماده ابررسانای تجاری یعنی نیوبیوم-تیتانیوم بود که در دهه‌های بعدی بسیار مورد توجه قرار گرفت.

## ۱-۲- تحولات دهه 1970

در این دهه تحول مهمی در فرآیند عایق کاری ژنراتور رخ داد. قبل از سال 1975 اغلب عایق‌ها را توسط رزین‌های محلول در ترکیبات آلی فرار اشباع می‌کردند. در این فرآیند، ترکیبات مذکور تبخیر و در جو منتشر می‌شد. با توجه به وضع قوانین زیست محیطی و آغاز نهضت سبز در اوایل دهه 1970، 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 راه‌حل جامع‌تر که امروزه نیز مرسوم است، کاربرد چسبهای جامد بود. در همین راستا تولید نوارهای میکای رزین ریج بدون حلال نیز توسعه یافت.

از دیگر پیشرفت‌های مهم این دهه ظهور ژنراتورهای ابررسانا بود. یک ماشین ابررسانا عموماً از یک سیم‌پیچ میدان ابررسانا و یک سیم‌پیچ آرمیچر مسی تشکیل شده است. هسته رتور عموماً آهنی نیست، چرا که آهن به دلیل شدت بالای میدان تولیدی توسط سیم‌پیچی میدان اشباع می‌شود. فقط در یوغ استاتور از





آهن مغناطیسی استفاده می‌شود تا به عنوان شیلد و همچنین منتقل کننده شار بین قطب‌ها عمل کند. عدم استفاده از آهن، موجب کاهش راکتانس سنکرون (به حدود  $pu \ 0/5 - 0/3$ ) در این ماشین‌ها شده که طبعاً موجب پایداری دینامیکی بهتر می‌شود. همانطور که اشاره شد، اولین ماده ابررسانای تجاری نیوبیوم-تیتانیوم بود که تا دمای ۵ درجه کلویین خاصیت ابررسانایی داشت. البته در دهه‌های بعد پیشرفت این صنعت به معرفی مواد ابررسانایی با دمای عملکرد ۱۱۰ درجه کلویین انجامید. براین اساس مواد ابررسانا را به دو گروه دما پایین مانند نیوبیوم-تیتانیوم و دما بالا مانند BSCCO ۲۲۲۳ تقسیم می‌کنند. از اوایل دهه ۱۹۷۰ تحقیقات بر روی ژنراتورهای ابررسانا با استفاده از هادی‌های دما پایین آغاز شد. در این دهه کمپانی وستینگهاوس تحقیقات برای ساخت یک نمونه دوقطبی را با استفاده از هادی‌های دما پایین آغاز کرد. نتیجه این پروژه ساخت و تست یک ژنراتور ۵ MVA در سال ۱۹۷۲ بود.

در سال ۱۹۷۰ کمپانی جنرال الکتریک ساخت یک ژنراتور ابررسانا را با استفاده از هادی‌های دما پایین، با هدف نصب در شبکه آغاز کرد.

ساخت و تست این ژنراتور ۲۰ MVA، دو قطب و ۳۶۰۰ rpm در سال ۱۹۷۹ به پایان رسید. در این ماشین از روش طراحی هسته هوایی بهره گرفته شده بود و سیم‌پیچ میدان آن توسط هلیوم مایع خنک می‌شد. این ژنراتور، بزرگترین ژنراتور ابررسانای تست شده تا آن زمان (۱۹۷۹) بود.

در سال ۱۹۷۹ وستینگهاوس و اپری ساخت یک ژنراتور ابررسانای ۳۰۰ MVA 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 دما پایین را در اوایل دهه ۱۹۷۰ شروع کرد. در این مدت یک نمونه رتور و یک نمونه استاتور با هسته آهنی برای ژنراتور ۸۵۰ MVA با سرعت ۳۰۰۰ rpm ساخته شد، اما به دلیل مشکلاتی تست عملکرد واقعی آن انجام نشد.

در این دهه آلستوم نیز طراحی یک رتور ابررسانا برای یک توربو ژنراتور سنکرون را آغاز کرد. این رتور در یک ماشین ۲۵۰ MW به کار رفت. با توجه به اهمیت خنک‌سازی در کارکرد مناسب ژنراتورهای ابررسانا، همگام

با توسعه این صنعت، طرح‌های خنک‌سازی جدیدی ارائه شد. در ۱۹۷۷ آقای لاسکارپس یک سیستم خنک‌سازی دوفاز (مایع-گاز) برای ژنراتورهای ابررسانا ارائه کرد. در این طرح بخشی از سیم‌پیچ در هلیوم مایع قرار می‌گرفت و با جوشش هلیوم در دمای ۴/۲ کلویین خنک می‌شد. جداسازی مایع از گاز توسط نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش رتور صورت می‌گرفت.

## منابع

[1] aftab.ir

[2] <http://www.majidonline.com>

[3] <http://www.parslift.com>

[4] <http://sanat-bargh.blogfa.com/۸۵۰۳.aspx>

[5] <http://www.ewa.ir/modules>

[6] <http://www.articles.ir>

[7] چاپمن، استغفان. مبانی ماشین های الکتریکی ترجمه علیرضا صدوقی، محمود دیانی - نشر نص - مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق و انرژی زنجان

چاپ پنجم - ویرایش سوم - زمستان ۱۳۸۳

[8] ماشین های الکتریکی، ج - ر - سلمون. ا. - استراون، ترجمه دکتر حمید لسانی