

ساخت و مونتاژ یک نمونه ژنراتور سنکرون کوچک

حسن کاظم پورلیاسی^۱ سهراب امینی ولاشانی^۱
مهدی آقامینی^۱ عماد شریفی قزوینی^۱ مهدی عامریان^۲
hkazempour@nri.ac.ir

۱- پژوهشگاه نیرو

۲- شرکت توربوژنراتور

کلمات کلیدی: ژنراتور سنکرون کوچک، روند ساخت و مونتاژ، آزمایش

چکیده

ژنراتورهای سنکرون کوچک که بعنوان منابع تولید انرژی الکتریکی در مناطق دوردست یا اضطراری استفاده می‌شوند، در میان دیگر تولیدات کوچک از اهمیت بسزایی برخوردار بوده که علل عمده آن هزینه نصب کمتر، تعمیرات و بهره‌برداری آسانتر و بازده بالاتر می‌باشد و لذا تدوین دانش فنی طراحی و ساخت آنها با اهمیت می‌باشد. از سوی دیگر ساختار خاص ژنراتور و حساسیت‌های هندسی و موادی برخی از اجزاء نظیر استاتور و روتور، روند ساخت آنرا پررنگ می‌نماید بطوریکه برای داشتن عملکرد، عمر و دوام مناسب لازم است اجزاء مهم ژنراتور نظیر ورق‌های استاتور و روتور، محور و هادیها از جنس مناسب انتخاب و با روند خاصی ساخته شوند. در این مقاله پس از ارائه مختصر روند طراحی الکترومغناطیسی و مکانیکی و ارائه مشخصات طرح نمونه، روند ساخت اجزاء و طرح نمونه ارائه شده و در انتها نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه ساخته شده، ارائه و تفسیر می‌گردد.

۱- مقدمه

ژنراتورهای سنکرون کوچک مولدهایی هستند که برای تولید انرژی الکتریکی در مناطق دور دست و یا بعنوان منابع تولید انرژی الکتریکی اضطراری برای بارهای حساسی نظیر بیمارستانها، خطوط نورد و ... بطور وسیع استفاده می‌شوند و لذا تدوین دانش فنی طراحی و ساخت این تجهیزات از لحاظ جلوگیری خروج ارز از کشور برای خرید دانش فنی طراحی و ساخت و انطباق ساختار آنها با شرایط جغرافیای و بازار داخلی حائز اهمیت فراوان می‌باشد و این در حالی است که بواسطه فقدان چنین دانشی، برخی از شرکت‌های سازنده مبادرت به خرید دانش فنی ساخت برای محدوده‌های توانی مشخصی (که مصرف بیشتری دارند) نموده و امکان ساخت برای محدوده‌های دیگر را ندارند و در صورت نیاز ناچار به سعی و خطا بوده که البته مستلزم هزینه هنگفت نمونه‌سازی می‌گردد.

در این مقاله پس از اشاره مختصری به روش طراحی و تحلیل ژنراتورهای سنکرون کوچک، مشخصات مشروح یک

- منحنی اشباع بی‌باری و منحنی‌های اشباع جزئی
 - منحنی‌های وی شکل در ضرایب قدرت متفاوت
 - منحنی اتصال کوتاه دائمی
 - مقادیر چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در اجزاء مختلف ژنراتور
 - تلفات هسته و سیم‌پیچ استاتور و روتور و تلفات مکانیکی، تهویه و بازده
 - پارامترهای دینامیکی ژنراتور
 - شکل موج جریان اتصال کوتاه ناگهانی، ولتاژ مدار باز ناگهانی و گشتاورهای لحظه‌ای
- در روش تحلیل اجزاء محدود و در حوزه الکترومغناطیس با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزار Ansys بویژه در مدل‌سازی پارامتریک مسائل، صرفاً مدل‌سازی هندسی و موادی دقیق صورت گرفته و با توجه به جریان میدان، بارگذاری صورت می‌گیرد، کمیت‌های مورد نظر مقادیر چگالی شار سایر اجزاء ماشین و بویژه فاصله هوایی می‌باشد، با وارد نمودن این داده‌ها در محیط MATLAB امکان پردازش اطلاعات و تعیین شکل موج دقیق ولتاژ خروجی در شرایط بی‌باری فراهم می‌گردد.
- بطور خلاصه در روش تحلیل اجزاء محدود مشخصه‌ها و کمیت‌های زیر محاسبه می‌گردد [۵-۸]:
- دامنه چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی نقاط مختلف ژنراتور در شرایط بی‌باری
 - شکل موج زمانی ولتاژ بی‌باری در حالت شیار مستقیم و شیار مورب
 - منحنی اشباع بی‌باری
 - تلفات هسته استاتور

۲-۲-۲ طراحی و تحلیل مکانیکی

۲-۲-۱-۱ تحلیل دینامیکی

طراحی محور (شفت) ژنراتور بر مبنای گشتاورهای نامی و گذرای وارد به آن و رژیم کاری مورد نظر و با ملاحظه ضرایب اطمینان مربوطه انجام می‌گردد.

نمونه ژنراتور طراحی شده، ارائه و در ادامه روند تفصیلی ساخت اجزاء و نتایج حاصل از آزمایش‌های کیفی و نهایی ارائه می‌گردد.

۲- طراحی و تحلیل ژنراتورهای سنکرون کوچک

۲-۱- طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی

پس از تعیین مشخصات خروجی مورد نظر طرح (ولتاژ، توان، ضریب توان و سرعت) و با تخصیص مقادیر مناسب به بارگذاری مغناطیسی و الکتریکی ویژه، ابعاد اصلی بر مبنای رابطه بنیادی توان خروجی محاسبه می‌گردد. در ادامه تعداد شیارها و نوع سیم‌بندی انتخاب می‌گردد، بدنبال آن ابعاد اصلی اصلاح شده و با توجه به نوع و ضخامت هادی، ابعاد شیار و دندان محاسبه و در ادامه کلیه ابعاد هسته استاتور تعیین می‌گردند. در قدم بعد با تعیین آمپر دور استاتور، طول فاصله هوایی و قطر روتور تعیین شده و روتور و قطب طراحی می‌شوند و در انتها مشخصات سیم‌بندی میدان محاسبه می‌گردد [۱-۳].

پس از طراحی ژنراتور و تعیین کلیه مشخصات ابعادی و موادی، لازم است که با استفاده از ابزار مناسب طرح حاصل قبل از ساخت تایید گردد تا بدینوسیله ریسک سرمایه‌گذاری سنگین برای نمونه‌سازی حداقل شود. تحلیل طرح را با استفاده از روش‌های ریاضی - فیزیکی یا اجزاء محدود می‌توان انجام داد [۴]. در روش اول سرعت محاسبات بالا بوده لیکن، دقت نتایج پایین می‌باشد در حالیکه در روش دوم زمان محاسبات و تحلیل بالا بوده لیکن دقت آنها زیاد می‌باشد. تحلیل ریاضی بی‌باری بر مبنای محاسبه افت آمپر دور در سایر اجزاء ژنراتور انجام می‌گیرد، بدین صورت که بر مبنای دامنه ولتاژ خروجی مقدار شار فاصله هوایی تعیین گردیده و با ملاحظه اصل پیوستگی شار، مقادیر چگالی شار و سپس شدت میدان مغناطیسی سایر اجزاء محاسبه می‌گردد و بدینوسیله مقدار جریان میدان متناظر با ولتاژ خروجی تعیین می‌شود.

بطور خلاصه در روش تحلیل ریاضی مشخصه‌ها و کمیت‌های زیر بدست می‌آید:

مراحل انجام طراحی و تحلیل حرارتی به این ترتیب است که با فرض مناسبی برای قطر داخل بدنه ژنراتور، سطح مجاری عبور هوا از داخل ژنراتور محاسبه می‌شود. سپس با توجه به تلفات حرارتی الکترومغناطیسی و خواص حرارتی اجزاء روتور و استاتور مقدار مناسبی برای دمای هوای خروجی فرض و سپس دبی کل، دمای استاتور، دمای روتور و دمای هوای خروجی محاسبه می‌شوند. در صورت تطبیق مقدار دمای هوای خروجی با مقدار فرضی و کمتر بودن دمای استاتور و روتور از حد مجاز، مقادیر افت فشار و توان فن محاسبه می‌شوند که توان فن باید کمتر از دو درصد توان ژنراتور باشد، در غیر این صورت باید مقادیر فرضی اصلاح شوند. سپس بکمک نرم‌افزارهای Gambit و Fluent تحلیل حرارتی مجموعه انجام شده و در صورت قرار گرفتن دمای استاتور و روتور در محدوده مجاز طرح از لحاظ حرارتی مورد تایید قرار می‌گیرد.

در طرح نمونه پس از تحلیل مشخص گردید که دمای اجزاء مختلف ژنراتور در طول مدل بطرف فن، به مقدار کوچکی افزایش می‌یابد که این به دلیل کوتاه بودن طول مدل و همچنین سطح تبادل کم انتقال حرارت می‌باشد.

۲-۲-۳- تحلیل خستگی محور

در ژنراتورهای سنکرون کوچک به لحاظ عدم وجود شرایط خورنده و نوسانات دمایی قابل توجه و همچنین نبود درجه حرارت خیلی بالا، محور آنها عمدتاً دچار خستگی مکانیکی می‌گردند. به منظور تحلیل خستگی محور ژنراتور با توجه به ابعاد محور و مشخصات فیزیکی آن از نرم‌افزار Ansys استفاده گردید [۷].

در بررسی انجام شده بر روی محور ژنراتور طراحی شده مشخص گردید که نقاطی که تغییر قطر در محور وجود دارد حداکثر تنشها به وجود آمده و لذا در هنگام ساخت و طراحی باید به این نقاط توجه ویژه‌ای نمود. نتایج تحلیل نشان داد که طراحی انجام شده از لحاظ خستگی مناسب می‌باشد. در شکل (۱) مقادیر مختلف تنش اندازه‌گیری به کمک نرم‌افزار Ansys بر روی محور ژنراتور طراحی شده نشان داده شده است.

مراحل انجام فعالیتها در تحلیل دینامیکی نیز به این صورت است که ابتدا برای مقاطع مختلف محور طول و قطر مناسبی فرض شده و سپس جرم و اینرسی اجزای روتور محاسبه می‌شوند. همچنین نیروی جانب مرکز ناشی از جرم نامیزانی روتور برای حداکثر نامیزانی مجاز (طبق استاندارد) محاسبه می‌شود. در مرحله بعد نیروهای وارد بر تکیه‌گاهها و ممانهای خمشی وارد بر محور (شفت) در نواحی تغییر قطر و گشتاورهای پیچشی وارد بر شفت محاسبه و با توجه به اطلاعات مربوط به خواص فلزات، جنس مناسب برای محور انتخاب و حداقل قطر لازم در هر مقطع محاسبه می‌شود. سپس با توجه به قطرهای محاسبه شده، بلبرینگها انتخاب می‌شوند.

سپس در تحلیل دینامیکی که بر روی مدل کامل مجموعه ژنراتور انجام می‌شود دو پارامتر سرعت‌های بحرانی و دامنه نوسان مجموعه محاسبه و در صورت تجاوز دامنه نوسان از میزان مجاز، یا قرار گرفتن سرعت نامی در محدوده سرعت بحرانی، طرح مرجوع و اصلاح می‌شود و در غیر این صورت طرح از نظر دینامیکی قابل قبول می‌باشد. در این پروژه از روش المان محدود برای تحلیل دینامیکی استفاده شده است. به این ترتیب که پس از مش‌بندی کل محور (شافت) اثرات سیم پیچ، فن و تحریک کننده بر روی آن منظور و با اعمال شرایط مرزی در یاتاقانها، تحلیل دینامیکی مجموعه بکمک برنامه‌ای که به زبان فرترن تهیه شده انجام گرفته است و در انتها نتیجه شده که سرعت های بحرانی طرح نمونه چندین برابر سرعت کارکرد محور بوده و جابجایی محور (شفت) نیز بسیار کمتر از فاصله هوایی بین روتور و استاتور است.

۲-۲-۲- تحلیل حرارتی

بررسی و تحلیل انتقال حرارت در بخش‌های مختلف یک ماشین الکتریکی دوار بخصوص در انتخاب کلاس‌های عایقی و طراحی آن نقش بسزایی دارد و نباید دمای طراحی از حد تحمل عایق‌ها تجاوز نماید، بلکه بر طبق استاندارد کلاس عایقی مربوط به طراحی باید از کلاس عایقی بهره‌برداری یک واحد بالاتر باشد.

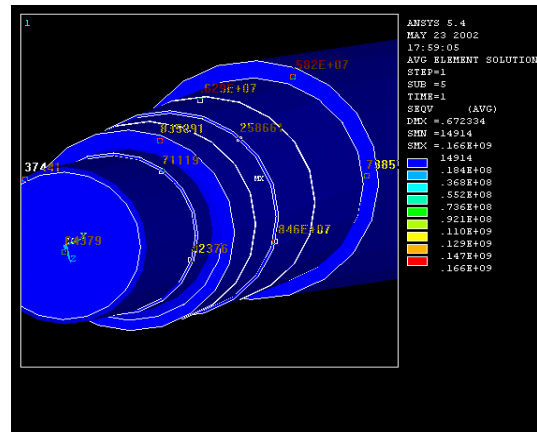
جدول (۲): مشخصات هندسی روتور و استاتور

mm	نام مشخصه روتور	mm	نام مشخصه استاتور
۴	تعداد قطبهای روتور	۳۰۰	قطر داخلی استاتور
۷۸	عرض تنه قطب	۴۲۳/۲	قطر خارجی استاتور
۳	ارتفاع کفش قطب	۱/۵	عمق دهانه شیار استاتور
۱۴۴	پهنای کفش قطب	۱۱	ارتفاع دندانه استاتور
۲۳/۱	ارتفاع پیشانی قطب	۵/۳	عرض دهانه شیار استاتور
۸	تعداد دمپرها	۸/۹	پهنای دندانه استاتور
۵	قطر دمپرها	۴۸	تعداد شیارهای استاتور
۱	ارتفاع دهانه شکاف دمپر	۱/۴	فاصله هوایی حداقل
۱	عرض دهانه شکاف دمپر	۲/۷	فاصله هوایی ماکزیمم
۱۵/۷	گام میله‌های دمپر	۱۹/۶	گام شیار در استاتور
		۲۰۲	طول هسته مغناطیسی

جدول (۳): مشخصات سیم‌بندی استاتور و روتور

واحد	مقدار	نام مشخصه
mm	۴۲/۸	ارتفاع سیم‌پیچ میدان با عایق روتور
mm	۳۱/۵	ضخامت سیم‌پیچ میدان
mm	۱۳۳۸/۷	طول متوسط هر دو کلاف استاتور
mm	۳۹۸۶/۱	طول متوسط هر کلاف استاتور
-	۱	تعداد مسیرهای موازی
-	۲	تعداد لایه‌های سیم‌بندی
-	۳	تعداد دور هر کلاف
-	۴	تعداد شیار در قطب در فاز
mm	۴/۵	قطر هر هادی سیم‌بندی
-	۹	تعداد هادیهای موازی در هر فاز
mm	۶۷۱/۵	طول متوسط هر دور سیم‌پیچ میدان
-	۱۱۷	تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ در هر قطب
mm	۳۱۵٫۴۴۰	طول کل هادی‌های روتور
mm	۶۶٫۶۵۸	طول کل هادی‌های هر فاز استاتور
mm	۱۹۹٫۹۷۰	طول کل هادی‌های استاتور

در ادامه پس از انجام بررسیهای لازم و با توجه به شرایط کارکرد قطعات در مجموعه ژنراتور، آلیاژهای مناسب جهت ساخت این قطعات انتخاب گردید. در جدول (۴) ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در ساخت ژنراتور مورد نظر ارائه شده است. در جدول (۵) نیز پارامترهای مهم در انتخاب آلیاژ قطعات ارائه گردیده است.



شکل (۱): مقادیر مختلف تنش وان مایز در نقاط بحرانی

۳- مشخصات نمونه آزمایشگاهی

پس از استخراج روندهای طراحی و تحلیل لازم است که این الگوریتم‌ها با ساخت یک نمونه و آزمایش آن تایید نهایی گردند. بدین منظور ژنراتوری با مشخصات خروجی مندرج در جدول (۱) انتخاب شده تا پس از طراحی و تحلیل به ساخت برسد.

جدول (۱): مشخصات خروجی ژنراتور نمونه آزمایشگاهی

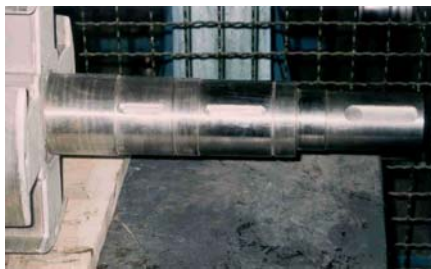
واحد	مقدار	پارامتر
ولت	۴۰۰	ولتاژ خط
کیلوولت آمپر	۵۰	توان ظاهری
-	۰/۸ lag	ضریب قدرت
دور بر دقیقه	۱۵۰۰	سرعت

در جدول (۲) مشخصات هندسی استاتور و روتور طرح الکترومغناطیسی نهایی ارائه شده است و مشخصات سیم‌بندی آمیچر و میدان نیز در جدول (۳) ارائه گردیده است. استخراج طرح در جهت کاهش هزینه ساخت قالب پانچ ورق‌های استاتور و روتور (و در نهایت اقتصادی نمودن هزینه خط تولید)، و همچنین با توجه به امکان استفاده از ورق‌های مزبور جهت ساخت ژنراتورهایی با توان ۵۰ الی ۱۰۰ کیلوولت آمپر صورت گرفته و لذا بدین منظور اولاً در طراحی سیم‌بندی آمیچر طرح ۵۰ کیلوولت آمپری تعداد مسیرهای موازی یک عدد فرض شده و ثانیاً طراحی سیستم تهویه و محور و سایر اجزاء مکانیکی با توجه به مقدار سقف توان (۱۰۰ کیلوولت آمپر) انجام گردیده است.

عملیات ماشینکاری خشن مطابق با نقشه‌های مکانیکی تهیه می‌گردد. جای خارها جهت نصب قطعات بر روی محور مانند اسلیپ رینگ، فن، قطب روتور و ... توسط دستگاه تراش یا فرز بر روی محور تعبیه می‌شود. به منظور بدست آوردن استحکام مکانیکی مطلوب عملیات حرارتی کوینچ-تمپر¹ بر روی محور انجام می‌شود و سپس عملیات ماشینکاری نهایی جهت حصول ابعاد نهایی و کیفیت سطحی مناسب بر روی محور انجام می‌گیرد. در شکل (۲) تصویر شفت تمام کاری شده و مونتاژ شده در روتور نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲): تصویر (الف): محور تمام کاری شده و (ب): محور مونتاژ شده در روتور و موقعیت جاخارها



شکل (۳): فرآیند برشکاری ورق‌های هسته روتور

جدول (۴): ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در ساخت قطعات ژنراتور نمونه

اسم قطعه	Fe	C	Si	Mn	P	S
هسته استاتور	Bal	۰/۱۰	۱/۵۷	۰/۳۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵
بدنه استاتور	Bal	۰/۱۷	-	۱/۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
صفحه نگهدارنده هسته	Bal	۰/۱۷	-	۱/۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
درپوش ژنراتور	Bal	۰/۱۷	-	۱/۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
محفظه فن	Bal	۰/۱۷	-	۱/۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
هسته روتور	Bal	۰/۰۸	-	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳
محور	Bal	۰/۴۵	۰/۴	۰/۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
پره فن	Bal	۰/۱۷	-	۱/۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
نگهدارنده بلبرینگ	Bal	۳/۴	۲/۵	۰/۷	۰/۱	۰/۱۲

جدول (۵): پارامترهای مهم در انتخاب آلیاژ قطعات

اسم قطعه	خواص مغناطیسی	خواص مکانیکی	ابعاد	قابلیت جوشکاری	قابلیت ماشینکاری
هسته استاتور	√	√	√		
بدنه استاتور		√		√	√
صفحه نگهدارنده هسته		√			√
درپوش ژنراتور		√			
محفظه فن		√			
هسته روتور	√	√			
محور	√	√			
پره فن		√		√	
نگهدارنده بلبرینگ		√			

۴- فرآیند ساخت اجزاء و مونتاژ مجموعه

روند ساخت اجزایی نظیر محور که بطور دائم در معرض تنشهای مکانیکی و الکترومغناطیسی قرار دارد یا هسته استاتور که حاوی هادیهای آرمیچر بوده و عمده تلفات هسته در آن بوقوع می‌پیوندد، تأثیر بسزایی در کیفیت عملکرد و عمر آنها داشته و لازم است در چهارچوب محدودیت‌های امکانات، زمان و هزینه بهترین روند انتخاب شده و در حین ساخت نیز با نظارت دقیق از انطباق روند ساخت با روند مورد نظر اطمینان حاصل شود. در ادامه فرآیند ساخت بعضی از قطعات مهم ارائه شده است.

۴-۱- محور (شافت)

محور ژنراتور پس از انتخاب آلیاژ مناسب و با توجه به ابعاد موردنظر بصورت شمش خریداری شده و پس از انجام

¹- Quench-Temper



شکل (۵): فرآیند برشکاری هسته استاتور



شکل (۴): قالب‌های مورد استفاده جهت برشکاری

۲-۴- هسته یا قطب روتور

جهت ساخت هسته یا قطب روتور پس از انتخاب آلیاژ مناسب (DIN St 14) در ابعاد و ضخامت موردنظر (۱/۰ میلیمتر) با استفاده از قالب‌های برش که برای این منظور طراحی و ساخته شده، ورق‌ها مطابق با نقشه‌های طراحی شده تحت عملیات برشکاری قرار می‌گیرند. در شکل‌های (۳) و (۴) فرآیند برشکاری و تهیه ورق‌های هسته روتور و قالب‌های مورد استفاده ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۶): قالب‌های برش مورد استفاده در برشکاری هسته استاتور،
(الف) قالب‌های برش سوراخ داخلی و (ب) قالب برش شیار هسته

۴-۴- قطعات دیگر

قطعات دیگر مجموعه ژنراتور مانند فن، اسلیپرینگ، درب‌پوش‌ها، بدنه، هادیها و ... با توجه به فرآیند مشخص شده و مطابق با نقشه‌های تهیه شده برای این منظور ساخته می‌شود.

۳-۴- هسته استاتور

ورق‌های هسته استاتور از جنس فولادهای الکتریکی سیلیسیم‌دار با گرید و ضخامت مورد نظر بصورت رول تهیه می‌شود. پس از موج‌گیری ورق‌ها، برشکاری آنها توسط قالب‌هایی که برای این منظور طراحی شده است انجام می‌گیرد. لازم به توضیح می‌باشد که شیارهای هسته بصورت منفرد برشکاری شده و پس از موقعیت‌دهی آن داخل قالب توسط فیکسچر شیارهای دیگر برشکاری خواهد شد در شکل‌های (۵) و (۶) فرآیند برشکاری هسته استاتور و قالب‌های مورد استفاده برای این منظور نشان داده شده است.

۴-۵- مونتاژ

پس از ساخت قطعات، مونتاژ مجموعه‌های روتور و استاتور انجام می‌گردد. در شکل‌های (۷) الی (۹) مونتاژ مجموعه‌های روتور، استاتور و ژنراتور آزمایشگاهی ساخته شده ارائه شده است.



شکل (۹): تصویر ژنراتور ساخته شده (۵۰ کیلوولت آمپر)



(الف)



۵- آزمایش

تضمین روند ساخت و تایید انطباق طرح ساخته شده با طرح مورد نظر در نقشه‌های ساخت، مستلزم انجام آزمایش‌های کنترل کیفی در حین ساخت می‌باشد. این آزمایش‌ها شامل دو دسته کلی زیر می‌باشند:

- اندازه‌گیری‌های ابعادی قطعات ساخته شده جهت ارزیابی میزان انطباق با نقشه‌های ساخت.
- آزمایش‌های متالورژیکی برای تعیین جنس مواد مورد استفاده در قطعات مختلف و بررسی صحت و سقم جنس بکار رفته.

پس از انجام آزمایش‌های فوق‌الذکر و تایید مراحل ساخت، لازم است تا با انجام آزمایش‌های نهایی نمونه آزمایشگاهی ارزیابی شده و مشخصه‌های تجربی آن با مشخصه‌های پیش‌بینی شده در روند طراحی و تحلیل مورد مقایسه قرار گیرد. این آزمایش‌ها عمدتاً ماهیت الکتریکی و مکانیکی داشته و بیشتر ناظر بر مشخصه‌های عملکردی می‌باشند.



(ب)

شکل (۷): مراحل مونتاژ مجموعه روتور الف هسته چینی روتور ب) نصب صفحات آلومینیومی دو انتهای هسته



(ب)



(الف)

۵-۱- آزمایش‌های حین ساخت

به منظور کنترل فرآیند ساخت قطعات مورد استفاده در ژنراتور با توجه به جنس و خواص مورد نظر و همچنین پارامترهای مهم آزمایش‌ها و بررسی‌هایی در حین فرآیند ساخت قطعات در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۶) آزمایش‌های انجام شده بر روی قطعات ساخته شده ارائه شده است.



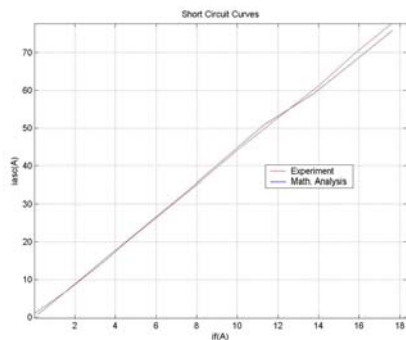
(ج)

شکل (۸): مراحل مونتاژ مجموعه استاتور الف هسته چینی استاتور ب) نصب هسته در داخل بدنه استاتور ج) سیم‌پیچی و عایق‌بندی استاتور

انطباق قابل قبول منحنی‌های حاصله حاکی از دقت مناسب الگوریتم‌های تحلیل ریاضی و تحلیل اجزاء محدود است و خطای فوق در حالست که در حین ساخت ژنراتور نمونه آزمایشگاهی بواسطه عدم امکان تهیه ورق با گرید M43 از ورق‌های سیلیکونی با گریدهای نزدیکتر استفاده شد که این جایگزینی می‌تواند منشا بروز اختلاف در نتایج باشد، که بدلیل مصرف آمپر دور متفاوت ورق بکار رفته نسبت به ورق مورد نظر بوده و با افزایش ولتاژ مدار باز و نتیجتاً افزایش آمپر دور مصرفی و اشباع ورق، اختلاف مزبور افزایش خواهد یافت.

۲-۲-۵- منحنی اتصال کوتاه دائمی

در شکل (۱۲) منحنی‌های اتصال کوتاه دائمی حاصل از اندازه‌گیری تجربی و تحلیل ریاضی نمایش داده شده‌اند. انطباق بسیار مناسب دو منحنی حاکی از صحت طراحی و پیاده‌سازی مدارهای مغناطیسی و الکتریکی استاتور و روتور می‌باشد.



شکل (۱۲): منحنی‌های اتصال کوتاه دائمی حاصل از اندازه‌گیری تجربی و تحلیل ریاضی

عدم اشباع ماشین در شرایط اتصال کوتاه و انطباق منحنی‌های شکل (۱۲) مؤید تفسیرهای بند (۱-۲-۵) مبنی بر وجود عامل اشباع در اختلاف منحنی‌های اشباع بی‌باری است، چرا که اشباع مدار مغناطیسی عامل بسیار مهمی در شکل و نحوه تغییرات منحنی اشباع بی‌باری است.

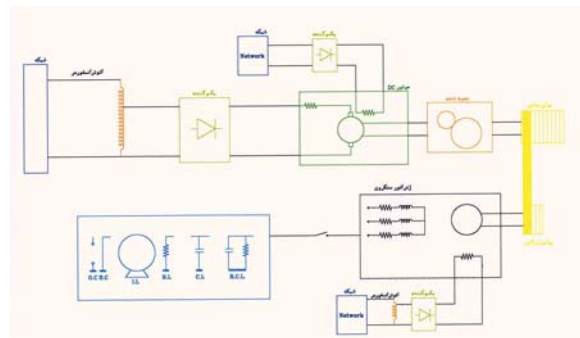
جدول (۶): عناوین آزمایش‌های کنترل کیفی انجام شده بر روی اجزاء مهم

کنترل ابعادی	بررسی غیر مخرب	متالوگرافی	سختی سنجی	آنالیز شیمیایی	اسم قطعه
✓	✓	✓	✓	✓	محور
✓				✓	هسته روتور
✓		✓		✓	هسته استاتور
✓				✓	اسلیپ رینگ

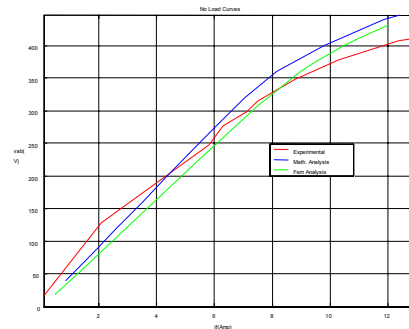
۲-۵- آزمایش‌های نهایی (عملکردی)

۱-۲-۵- آزمایش تعیین منحنی اشباع بی‌باری

در شکل (۱۰) دیاگرام شماتیک ترکیب بندی اجزاء برای پیاده‌سازی آزمایشهای عملکردی ژنراتور سنکرون نمایش داده شده است. پس از راه‌اندازی ژنراتور در سرعت نامی و در حالت مدار باز و تغذیه تحریک آن بوسیله یک منبع ولتاژ مستقیم قابل کنترل، منحنی اشباع بی‌باری استخراج می‌گردد. در شکل (۱۱)، نمودار منحنی اشباع بی‌باری حاصل از اندازه‌گیری به همراه منحنی‌های اشباع بی‌باری حاصل از تحلیل ریاضی و تحلیل اجزاء محدود ارائه شده است.



شکل (۱۰): دیاگرام شماتیک ترکیب بندی اجزاء برای پیاده‌سازی آزمایش‌های عملکردی



شکل (۱۱): منحنی‌های اشباع بی‌باری حاصل از اندازه‌گیری تجربی، تحلیلی ریاضی و تحلیل اجزاء محدود

۵-۲-۳- بازده

و پولی راه اندازی شد و خروجی ژنراتور به یک الکتروموتور (بدون بار) بتوان حدود IMW و ولتاژ ۴۰۰ ولت متصل بود. همچنین سرعت محور ژنراتور در هنگام اندازه گیری در حدود ۱۵۰۰ دور در دقیقه بوده است.

لازم بذکر است که حداکثر مقدار مجاز دامنه میانگین سرعت (V_RMS) ارتعاشات برای چنین ژنراتوری (در محدوده ۱۵ تا ۷۵ کیلو وات) طبق استاندارد VDI 2056/1964 حدود ۲ میلیمتر بر ثانیه می باشد.

جدول (۷): مقادیر میانگین دامنه ارتعاشات بر حسب (mm/sec)

موقعیت	یاتاقان طرف فن		یاتاقان پشت	
	بدون بار	تحت بار	بدون بار	تحت بار
عمودی	۰,۱۱	۰,۰۸	۰,۱۴	۰,۰۹
افقی	۰,۴۶	۰,۵۳	۰,۴۸	۰,۴۴
محوری	۰,۳۵	۰,۱۸	۰,۱۱	۰,۰۱

۵-۲-۶- اندازه گیری دمای هوای ورودی و خروجی ژنراتور

- دمای هوای ورودی ژنراتور: ۳۰ درجه سلسیوس
 - دمای هوای خروجی ژنراتور در حالت بی باری: ۳۱,۳ درجه سلسیوس
 - دمای هوای خروجی ژنراتور در حالت بار داری: ۳۴ درجه سلسیوس
- البته دمای سایر نقاط ژنراتور نظیر دندانه های دو انتها، یوغ استاتور و روتور و انتها، هادی ها، انتهای کلافها و ... در شرایط باری مختلف اندازه گیری گردید که در اینجا صرفاً به برخی از موارد اشاره شده است.

۵-۲-۷- آزمایش افزایش سرعت و بار داری

در حالت بی باری سرعت محور ژنراتور را به ۱۸۰۰ دور در دقیقه افزایش داده و برای مدت سه دقیقه در این حالت نگهداشته شد و هیچ مشکلی در کارکرد ژنراتور مشاهده نگردید. همچنین بمدت ۲ ساعت ژنراتور تحت بار ولت آمپر نامی با ضریب قدرت پایین گذاشته شد و در این حالت نیز مشکلی در کارکرد ژنراتور مشاهده نگردید.

محاسبه بازده با محاسبه تلفات تفکیکی انجام می گردد. این تلفات شامل تلفات تهویه و مکانیکی، تلفات هسته، تلفات مس و تلفات پراکندگی می باشد که لازم است با انجام آزمایش مناسب محاسبه شده و در نهایت بازده تعیین گردد. بر طبق اندازه گیری ها و محاسبات صورت گرفته بازده ژنراتور در حدود ۹۵ درصد می باشد که در مقایسه با مقدار پیش بینی شده (۹۳ درصد)، در حدود دو درصد بیشتر است. علت اختلاف در مقادیر بازده اولاً خطای مربوط به برآورد تلفات تهویه و هسته بوده و ثانیاً ناشی از تعویض ورق سیلیکونی هسته استاتور است در حالیکه به دلایل اخیر، خطای اندازه گیری و تخمین بازده تسمه پروانه را می توان افزود. محاسبه تلفات تهویه و هسته با استفاده از روابط تجربی و تقریبی انجام می گردد که یقیناً بدون خطا نبوده و از سوی دیگر با تعویض ورق، میزان تلفات بر واحد وزن آن در چگالی شار یکسان نسبت به ورق M43 متفاوت بوده که خود عامل بروز اختلاف در نتایج می گردد.

۵-۲-۴- بالانس دینامیکی روتور

عملیات بالانس روتور بدین صورت است که دامنه ارتعاشات شعاعی روتور در هر دو یاتاقان در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه اندازه گیری شده و سپس وزنه های مینا در زاویه صفر درجه بر روی هر دو صفحه بالانس نصب می شوند. دوباره ارتعاشات دو یاتاقان اندازه گیری شده و دستگاه بالانس دو وزنه با مقدار و زاویه مشخص پیشنهاد می دهد، پس از نصب وزنه ها عملیات فوق آنقدر تکرار می شود تا مقدار ارتعاشات به حد مطلوب برسد.

۵-۲-۵- اندازه گیری ارتعاشات

پس از بالانس روتور، مقدار میانگین دامنه ارتعاشات بر روی دو یاتاقان ژنراتور در سه جهت عمودی، افقی، محوری و در دو حالت بار داری و بی باری ژنراتور اندازه گیری شده که تمامی مقادیر کمتر از ۰,۶ میلیمتر بر ثانیه می باشند (جدول ۷). در حالت بی باری، ژنراتور بصورت موتوری و در حالت بار داری محور ژنراتور توسط یک موتور DC و بکمک تسمه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله پس از مروری مختصر بر روند طراحی و تحلیل ژنراتورهای سنکرون کوچک، نحوه ساخت و آزمایش یک ژنراتور سنکرون نمونه آزمایشگاهی بطور تفصیلی ارائه گردید. براساس نتایج حاصل از آزمایش که در بند ۵ صرفاً به برخی از آنها اشاره شد، مشخصات حاصل از آزمایش نمونه آزمایشگاهی اختلاف قابل قبول و موجهی با مشخصات مورد نظر داشته که این نکته تاییدی بر روندهای طراحی و تحلیل می باشد. ضمناً لازم بذکر است که بر مبنای فعالیت های صورت گرفته در ارتباط با امکان سنجی تهیه مواد اولیه و ساخت داخل، طراحی و ساخت ژنراتور مزبور بر مبنای مواد اولیه داخل کشور انجام گردیده است و لذا این طرح از حیث مواد اولیه در زمره موارد نیمه صنعتی بوده که پس از انجام آزمایش های مشخص و اعمال اصلاحات احتمالی مورد نیاز می توان آنرا از نظر فنی نیز نیمه صنعتی تلقی نمود. از سوی دیگر روند طراحی و ساخت ژنراتورهای سنکرون کوچک مشابهت زیادی با روند طراحی و ساخت ژنراتورهای متوسط (بوئژه در بخش های الکترومغناطیسی) داشته و لذا امکان حرکت به سمت تدوین دانش فنی این دسته از ژنراتورها که عمدتاً مصارف برق - آبی دارند، مهیا می باشد.

مراجع

- [۱] سودابه سلیمانی، سهراب امینی ولاشانی، عماد شریفی، "الگوریتم طراحی عملی ژنراتورهای سنکرون قطب برجسته کوچک و تأیید آن"، هفدهمین کنفرانس بین المللی برق، پاییز ۱۳۸۱، تهران.
- [2] A. K. SAWHNGY, "Electrical Machine Design", Dhanpat Pai & Sons, Delhi, 1991.
- [3] V. N. Mittle, "Design of Electrical Machines", Standard Publishers Distributors, Delhi, 1996.
- [۴] سودابه سلیمانی، سهراب امینی ولاشانی، حسام میرعابدینی، "تعیین مزایا و معایب کاربرد الگوریتم های تحلیل ریاضی در ماشین های الکتریکی"، مجله برق، شماره ۳۴، بهار ۱۳۸۱.
- [۵] مسعود توسلی جهرمی، سهراب امینی ولاشانی، "تعیین شکل موج زمانی ولتاژ بی باری ژنراتور سنکرون در حالت شیار مستقیم و شیار مورب بوسیله پردازش اطلاعات حاصل از تحلیل امان محدود"، شانزدهمین کنفرانس بین المللی برق، پاییز ۱۳۸۰، تهران.
- [۶] محمد صاحبکار خراسانی، مهدی بهزاد، آرش حسنی شبستری، "تحلیل ارتعاشی ژنراتور با توان کمتر از یک مگاوات و مقایسه اثر نامیزانی مغناطیسی و نامیزانی جرمی"، هفدهمین کنفرانس بین المللی برق، آبان ۱۳۸۱، تهران.
- [۷] حسن کاظم پورلیاسی، علی اکبر فلاح شیخلری، "تحلیل خستگی محور ماشین های الکتریکی کوچک به کمک نرم افزار انسیس"، مجله برق، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۸۲.
- [8] Ivanov, Smolensky, "Electrical Machines", Vol 1,2,3, Mir Publisher, Moscow 1982.