

ریشه‌یابی افزایش دمای استاتور ژنراتور واحد شماره یک گازی نیروگاه قم

علیرضا قائم پناه، سهراب امینی

گروه ماشین‌های الکتریکی

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

aghaempanah@nri.ac.ir

علی اکبر نوری

معاونت فنی و مهندسی

شرکت مدیریت تولید برق قم

قم، ایران

صورت مداوم پایش گردند. گرم شدن بیش از حد و غیر عادی ژنراتور یکی از پدیده‌هایی است که در ژنراتورهای نیروگاهی ممکن است رخ دهد و در گزارش‌های مختلف به آن پرداخته شده است.

برای ریشه‌یابی دلایل افزایش دمای قرائت شده توسط RTD های تعبیه شده در ژنراتور واحد شماره ۱ گازی نیروگاه قم، فعالیت هایی به این صورت انجام گرفت که ابتدا اطلاعات و سوابق ثبت شده موجود در نیروگاه در رابطه با این واحد جمع‌آوری گردید و مورد بررسی قرار گرفت. سپس بر اساس تخمین اولیه برای دلایل بروز عیب، مجموعه‌ای از آزمون‌ها تدوین گردید که با همکاری نیروگاه در طول چند روز انجام شد. با تفسیر نتایج این آزمون‌ها و اطلاعات تکمیلی که متعاقباً از عملکرد ژنراتور (از نیروگاه) و شرکت برق منطقه‌ای تهران اخذ گردید، منشا اصلی افزایش دما در ژنراتور تعیین گردید.

در این مقاله ابتدا نتایج مطالعات صورت گرفته در زمینه دلایل افزایش دما در سایر واحدهای نیروگاهی دنیا آورده شده است. مطالب این قسمت بر اساس گزارشات منتشر شده موسسه EPRI و همچنین مقالات ارایه شده در کنفرانس‌ها و یا مجلات مرتبط با صنعت نیروگاهی تنظیم شده است. در ادامه به فعالیت‌های انجام شده برای بررسی دلایل این افزایش دما در ژنراتور واحد ۱ گازی نیروگاه قم پرداخته شده است و در آن با در کنار هم قرار دادن شواهد و مستندات، منشا اصلی افزایش دما در این ژنراتور تعیین شده است. در پایان مقاله راه حل‌هایی برای تعیین موقعیت دقیق خطا در ژنراتور ارایه گردیده است.

چکیده — معمولاً خطا در ماشین‌های الکتریکی به صورت ناگهانی اتفاق نمی‌افتد و بیشتر در اثر مرور زمان و با گسترش یک عیب به ظاهر کوچک، در یک قسمت از ماشین ایجاد می‌گردد. در این مقاله به موضوع بررسی دلایل افزایش دما در واحد گازی شماره ۱ نیروگاه قم پرداخته می‌شود؛ برای این منظور ابتدا سوابق فنی ثبت شده هر چهار واحد گازی نیروگاه جمع‌آوری گردید. سپس بر اساس نتایج این بررسی‌ها و مطالعه منابع دیگر مجموعه‌ای از آزمون‌ها برای بررسی وضعیت اجزای اصلی الکتریکی - مغناطیسی ژنراتور تعریف شد و انجام گردید. بر اساس تفسیر نتایج این آزمون و همچنین سایر اطلاعات تکمیلی اخذ شده، ریشه‌های بروز عیب در ژنراتور تعیین گردیده و راهکارهای اصلاحی برای آن پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی — افزایش دما؛ خطا در سیم‌پیچی؛ خطا در هسته استاتور؛ عیب یابی

۱. مقدمه

در ژنراتورهای نیروگاهی خطاهای مختلفی ممکن است رخ بدهد که میزان تولید انرژی الکتریکی آن را تحت تاثیر قرار دهد. بسیاری از این عیوب به صورت لحظه‌ای و ناگهانی رخ نمی‌دهد، بلکه در اثر مرور زمان و با گسترش یک عیب به ظاهر کوچک در یک قسمت از ژنراتور ایجاد می‌گردد. برای جلوگیری از وقوع خطای جدی در این ماشین‌های الکتریکی و تخریب آنها، لازم است که وضعیت قسمت‌های مختلف ژنراتور به

(PD) و به طور کلی در هر قسمت از شینه که عایق دچار تخریب شود می‌تواند ایجاد گردد [۲].

۲. عیوب متداول در اجزای الکترومغناطیسی

ژنراتورهای نیروگاهی

۲.۱. سیم پیچی استاتور

لرزش انتهای شینه استاتور می‌تواند موجب تخریب عایق groundwall در قسمت انتهایی شینه‌های ژنراتور گردد. همچنین این لرزش‌ها می‌تواند موجب ایجاد تنش و آسیب در هادی‌های درون شینه‌ها و یا اتصالات آنها گردد. این لرزش‌ها در اثر نیروهای الکترومغناطیسی ناشی از هادی‌های حامل جریان (شینه‌ها)، ایجاد می‌گردد و اجتناب ناپذیر هستند. نگهدارنده‌های مکانیکی که انتهای شینه‌ها را از لرزش زیاد حفظ می‌کنند (تا موجب خسارت به شینه‌ها و یا عایق آن نگردد)، در صورتی که در اثر مرور زمان (و یا طراحی‌های ناصحیح) این نگهدارنده‌ها شل شوند و یا دچار عیب گردند، لرزش انتهای شینه افزایش می‌یابد و در نتیجه به مرور زمان موجب ایجاد خطا در سیم‌پیچی استاتور می‌گردد [۱].

مساله دیگری که ممکن است برای قسمت انتهایی شینه‌ها رخ دهد این است که لرزش‌های انتهای شینه موجب تحریک سیستم نگهدارنده مکانیکی شود و در نتیجه هسته استاتور در فرکانس طبیعی نزدیک به ۱۰۰ هرتز (دو برابر فرکانس سیستم) تحریک گردد؛ در این حالت یک نیروی کوچک می‌تواند ایجاد لرزش با دامنه زیاد و در نتیجه آن ایجاد خسارت نماید. این پدیده معمولاً در نزدیکی شرایط نامی ژنراتور رخ می‌دهد. در طراحی ژنراتورهایی که بعد از سال ۱۹۸۰ میلادی ساخته می‌شوند، به افزایش استحکام در سیستم نگهدارنده برای جلوگیری از ایجاد این پدیده اهمیت زیادی داده می‌شود. به طور خلاصه می‌توان گفت لرزش در ناحیه انتهایی شینه‌ها می‌تواند موجب ایجاد مشکلات زیر گردد [۱]:

- ایجاد سایش و خراشیدگی در عایق groundwall انتهای شینه که موجب "خاکی" و یا "روغنی" شدن آن قسمت می‌گردد.
- ترک در عایق groundwall انتهای شینه و ایجاد خطای اتصال به زمین.
- سایش عایق‌های دور هادی‌های درون شینه و اتصال بین این هادی‌ها.
- شکستن هادی‌ها و در نتیجه افزایش محلی دما که سوختن عایق groundwall را در پی خواهد داشت.

در این حالت‌ها سایدگی عایق باعث می‌شود که پودر سفید رنگی بر روی انتهای شینه‌ها بنشیند. لازم به ذکر است که این پودر در اثر تخلیه جزئی

۲.۲. هسته استاتور

اتصال کوتاه بین عایق ورقه‌های هسته در اثر عواملی مانند تغییرات حرارتی، الکتریکی، مکانیکی، طراحی ناصحیح و یا اشکالات ساختی می‌تواند رخ دهد. در ماشین‌های الکتریکی هوا خنک، مهمترین عامل گرم شدن بیش از حد هسته، مسدود شدن مسیر تهویه - به دلیل وجود روغن و یا گرد و خاک - است. اگر مدت زمان این اشکال طولانی گردد، روند تخریب عایق سرعت می‌گیرد. وقتی دمای هسته به بیش از مقادیر طراحی افزایش یابد، نیروهای محوری و شعاعی وارد بر نگهدارنده‌های هسته به مقدار کافی بزرگ هستند که آن را تغییر شکل دائمی دهند؛ بنابراین حتی پس از رفع مشکل گرمایش بیش از حد نیز امکان دارد که تخریب هسته و سایش عایق بین ورقه‌های آن ادامه یابد. همچنین اگر به منظور سیم‌پیچی مجدد و برای درآوردن سیم‌پیچی‌های قبلی از روش گرم کردن استفاده شود، مناسب نبودن دمای گرمایش (گرم کردن بیش از حد) می‌تواند باعث تخریب عایق بین ورقه‌ها گردد. افزایش بیش از حد چگالی شار (بیش از مقادیر طراحی) در یوگ استاتور نیز می‌تواند منشا گرمایش بیش از حد آن گردد که تخریب عایقی و افزایش ارتعاشات مکانیکی، از پیامدهای آن است [۴].

اگر در اثر هر نوع خطا در سیم‌پیچی درون شیارها، جریان زیادی از آنها عبور کند، امکان سوختن عایق بین هسته‌ها و ذوب شدن ورقه‌ها وجود دارد.

در برخی ژنراتورها، هسته استاتور از طریق عبور دادن پیچ (میله عایق شده) از سوراخی که در هسته ایجاد می‌گردد و با مهره و جوش کردن آن به هم، محکم می‌شوند. با از بین رفتن این مهره‌ها و یا گشاد شدن پیچ‌ها، عایق دور میله از بین می‌رود و ورقه‌های استاتور اتصال کوتاه می‌شوند. همین‌طور شل شدن این اتصالات باعث می‌شود که ارتعاشات هسته افزایش یابد و امکان تخریب عایق‌ها و سوختن هسته فراهم گردد. مسایل مکانیکی که می‌تواند موجب صدمه زدن به هسته شوند، به صورت خلاصه عبارتند از:

- فشردن نکردن به مقدار کافی هسته در موقع ساخت
- کاهش فشردگی هسته در موقع کار به دلیل شل شدن سیستم نگهدارنده - لرزش هسته
- تخریب ضربه‌گیرها (back - of - core)
- آلودگی‌های سطح هسته و یوغ آن که ناشی از صدمات مکانیکی باشد.
- تخریب عایق بین ورقه های هسته در اثر ارتعاش های مکانیکی غالباً در توربین- ژنراتورهای دو قطبی بزرگ اتفاق می‌افتد [۴]. زمانی که برخی ورقه‌ها و یا قسمتی از آنها از بین می‌رود، سایر ورقه‌ها در اثر نیروهای الکترومغناطیسی و یا مکانیکی نسبت به هم سایش پیدا می‌کنند و در نتیجه عایق روی ورقه‌ها از بین می‌رود و یا باعث [۵]:
- ترک خوردن و شکستن دندانه‌ها و جداکننده‌های تهویه شود.
- نشستن خاک بر روی گوه‌ها شود.
- جدا شدن و پخش شدن ورقه به صورت ذراتی در محیط ژنراتور که می‌تواند منشا خطای عایقی گردد.
- همچنین اگر فرکانس طبیعی هسته و بدنه خارجی در حدود دو برابر فرکانس اصلی سیستم باشد، ارتعاشات مکانیکی نیز می‌تواند عایق ورقه‌ها را از بین ببرد. در صورتی که بین هسته و میله نگهدارنده پشت هسته (یا همان Key Bar که در برخی انواع ژنراتورها استفاده می‌شود) فاصله بیفتد، جرقه بین آنها ایجاد و در نتیجه ورقه‌ها به هم اتصال کوتاه می‌شوند [۴].

۳. بررسی مشاهدات واحد شماره ۱ گازی

۳.۱. بررسی‌های اولیه

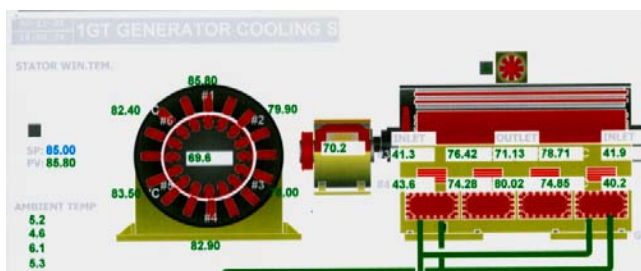
افزایش دمای ژنراتور واحد ۱ گازی نیروگاه قم در سال ۱۳۸۵ و پس از انجام تعمیرات آغاز گردید. این افزایش دما در سال ۱۳۸۹ (پس از اورهال) رشد زیادی کرد؛ به نحوی که مقادیر قرائت شده توسط حسگرهای RTD افزایش دمای قابل ملاحظه‌ای را نسبت به واحدهای مشابه نشان می‌دادند.

مقایسه اندازه‌گیری‌های PD هر چهار واحد گازی نیز موید بالا رفتن متوسط دمای سیمپیچها (کوچک شدن سایز حفره‌های موجود در سیستم عایقی در اثر انبساط حرارتی) در ژنراتور واحد شماره ۱ گازی بود. سایر اطلاعات ارسالی از طرف نیروگاه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و به دلایلی که در ادامه آورده شده است، پیش‌بینی گردید که ریشه اصلی افزایش دمای ژنراتور ایجاد عیب در سیم‌پیچی استاتور آن می‌باشد.

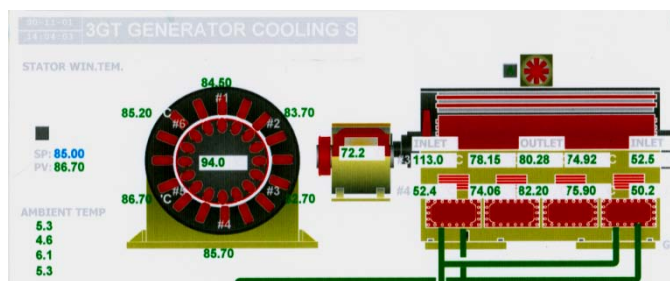
حسگرهای RTD بین شینه‌های استاتور قرار می‌گیرد و دمای اندازه‌گیری شده با این حسگرها مقداری متوسط از کل طول شینه است. بنابراین اولین چیزی که به نظر می‌آید که می‌تواند موجب افزایش دمای خوانده شده توسط RTDها گردد، مشکلات ایجاد شده در سیم‌پیچی‌های استاتور می‌باشد. مقدار مقاومت عایقی سیم‌پیچی استاتور واحد ۱ که در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ اندازه‌گیری شده است با گذشت زمان افزایش یافته است؛ به نحوی که اندیس پلوریزاسیون (PI) افزایشی مطابق با جدول ۱ داشته است. اگر اندیس پلوریزاسیون با گذشت زمان، بدون آنکه تغییری در شرایط عایق از نظر رفع آلودگی یا رطوبت ایجاد شود، به میزان ۲۰٪ رشد داشته باشد، عایق‌بندی شینه‌ها دارای اشکال گردیده است و لازم است مورد بررسی قرار بگیرد؛ به عبارت دیگر مقدار اندیس پلوریزاسیون عایق‌بندی شینه‌ها نباید خود به خود افزایش بیابد. از طرف دیگر بررسی اطلاعات مربوط به مقاومت سیم‌بندی‌های ژنراتورهای نیروگاه قم در سال‌های مختلف - که در جدول ۲ آورده شده است - نشان می‌دهد که مقاومت اهمی سیم‌پیچی فازهای استاتور واحد شماره ۱ با گذشت زمان افزایش یافته است، درحالی که این مقدار در واحدهای دیگر کاهش نشان می‌دهد. توجه شود که در جدول ۳ برای ایجاد امکان مقایسه، مقاومت‌های هر فاز به مقاومت معادل در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد تبدیل شده است. همین مقدار افزایش مقاومت در حدود جریان‌های نامی ژنراتور می‌تواند به عنوان یک منبع اضافی گرما عمل کند و موجب افزایش دمای استاتور گردد. بررسی بیشتر نتایج ثبت شده PD در واحد شماره ۱ نیز نشان می‌دهد که به دلیل کاهش اندازه حفره‌ها (که در اثر افزایش گرما صورت پذیرفته است) دامنه تخلیه جزیی کاهش یافته است. همچنین دامنه تخلیه جزیی در فاز S از بقیه فازها بالاتر است؛ تمرکز فاز S در یک مسیر موازی در بالای ژنراتور و در اطراف RTD شماره ۱ - که بالاترین دما را نشان می‌دهد - قرار دارد.

از طرف دیگر در بازدید انجام شده از واحد بهره‌برداری نیروگاه قم مشاهده گردید که در توان خروجی تقریباً یکسان، در واحدهای ۱ و ۳ (در

نکته دیگری که قابل توجه است وجود لقی در گوه‌های درون شیارهای استاتور است؛ با بررسی سوابق ثبت شده از اورهال سال ۱۳۸۹ مشاهده گردید که لقی گوه‌ها (به دلیل لرزش شینه‌ها) در هر سه فاز وجود دارد. لرزش شینه‌ها درون شیارها اگر مدت زیادی طول بکشد و یا اگر دامنه آن زیاد (در مدت زمان کم) باشد، می‌تواند موجب خسارت به استرندهای درون شینه‌ها گردد؛ به نحوی که باعث قطع ارتباط و شکستن آنها شود. پدیده‌ای که در صورت بروز به میزان قابل توجهی مقاومت سیم‌پیچی استاتور را افزایش خواهد داد.



شکل ۱: دمای نشان داده شده توسط RTDهای ژنراتور واحد ۱



شکل ۲: دمای نشان داده شده توسط RTDهای ژنراتور واحد ۳

نکته مهمی که باید در این‌جا به آن توجه نمود این است که در تمامی این شیارهایی که گوه لق شده دارند، گوه لق شده در یک موقعیت از شیار قرار ندارد؛ یعنی در شیارهای شماره ۱، ۴ (مربوط به فاز S) و ۵۶ (مربوط به فاز T) گوه‌های لق شده در ابتدای شیار قرار دارند ولی در شیارهای شماره ۱۲، ۱۳ و ۱۴ (مربوط به فاز R) گوه‌های لق شده درون شیار قرار گرفته‌اند. این نکته نشان دهنده آن است که لق شدن گوه‌ها در همه این شیارها ناشی از لرزش شینه‌ها نمی‌تواند باشد و عامل دیگری نیز در این پدیده نقش داشته است. همچنین می‌توان گفت که در شیارهای ۱، ۴ و ۵۶ (به دلیل قرار گرفتن گوه‌های لق شده در ابتدای شیار) لرزش بیشتری در شینه‌ها وجود دارد.

حالی که مطابق شکل‌های ۱ و ۲ در سیستم تهویه واحد ۳ و واحد ۱ به ترتیب یک فن و دو فن روشن است)، دمای ثبت شده در RTD شماره ۱ واحد ۱، بیش از RTD مشابه در واحد ۳ است. همچنین دمای ثبت شده بقیه RTDهای واحد ۱ در حدود سه درجه کمتر از RTDهای مشابه در واحد ۳ است. به عبارت دیگر این گونه می‌توان نتیجه گرفت که وارد شدن یک فن اضافی در سیستم خنک‌کننده‌گی باعث شده است که دمای نشان داده شده در RTDها (واحد ۱) به اندازه ۳ درجه کاهش یابد، در حالی که RTD شماره ۱ افزایش دما را نشان می‌دهد. این مطلب نشان می‌دهد که اگر منشأ افزایش دما در ژنراتور واحد شماره ۱ افزایش مقاومت سیم‌پیچی فازها باشد، باید این افزایش مقاومت در فاز S (که در محدوده RTD شماره ۱ تمرکز دارد) رخ داده باشد.

جدول ۱: تغییرات اندیس پلوریزاسیون با گذشت زمان

T	S	R	فاز / سال
۶.۳۷	۶.۵۵	۶.۴۱	۱۳۸۵
۷.۴۸	۷.۳۶	۷.۵۹	۱۳۸۹

جدول ۲: مقاومت اهمی سیم‌پیچی فازهای استاتور واحدهای گازی نیروگاه

ردیف	واحد	فاز	مقاومت اولیه (mΩ)	دمای اولیه (°C)	سال	دمای ثانویه (°C)	مقاومت ثانویه (mΩ)	اختلاف مقاومت دو سال
۱	۱	R	۰.۹۲	۷	۸۵	۱۰۰	۱.۲۷۴	۱.۳۵۲
۲		S	۰.۹۲	۷		۱۰۰	۱.۲۷۴	۱.۳۵۲
۳		T	۰.۹۲	۷		۱۰۰	۱.۲۷۴	۱.۳۵۲
۴	۱	R	۰.۹۳۹	۵	۸۹	۱۰۰	۱.۳۱۱	۰.۳۷۲
۵		S	۰.۹۳۹	۵		۱۰۰	۱.۳۱۱	۰.۳۷۲
۶		T	۰.۹۵۳	۵		۱۰۰	۱.۳۳۱	۰.۳۷۲
۷	۲	R	۰.۹۴	۹	۸۶	۱۰۰	۱.۲۹۱	۱.۳۵۲
۸		S	۰.۹۴	۹		۱۰۰	۱.۲۹۱	۱.۳۵۲
۹		T	۰.۹۵	۹		۱۰۰	۱.۳۰۵	۱.۳۵۲
۱۰	۲	R	۰.۹۸۲	۲۶	۹۰	۱۰۰	۱.۲۶۱	۰.۳۰۰
۱۱		S	۰.۹۹۷	۲۶		۱۰۰	۱.۲۸۰	۰.۲۸۰
۱۲		T	۰.۹۸۳	۲۶		۱۰۰	۱.۲۶۲	۰.۲۸۰
۱۳	۳	R	۱.۰۰۳	۲۶	۸۴	۱۰۰	۱.۲۸۸	۱.۲۸۸
۱۴		S	۱.۰۰۶	۲۶		۱۰۰	۱.۲۹۲	۱.۲۹۲
۱۵		T	۱.۰۰۳	۲۶		۱۰۰	۱.۲۸۸	۱.۲۸۸
۱۶	۳	R	۰.۹۵۱	۱۵	۸۷	۱۰۰	۱.۲۷۵	۰.۳۲۴
۱۷		S	۰.۹۵۱	۱۵		۱۰۰	۱.۲۷۵	۰.۳۲۴
۱۸		T	۰.۹۵۱	۱۵		۱۰۰	۱.۲۷۵	۰.۳۲۴
۱۹	۴	R	۰.۹۵	۱۰	۸۳	۱۰۰	۱.۳۰۰	۱.۳۰۰
۲۰		S	۰.۹۵	۱۰		۱۰۰	۱.۳۰۰	۱.۳۰۰
۲۱		T	۰.۹۵	۱۰		۱۰۰	۱.۳۰۰	۱.۳۰۰
۲۲	۴	R	۰.۹۸۵	۲۵	۸۷	۱۰۰	۱.۲۷۰	۰.۳۰۰
۲۳		S	۰.۹۸۳	۲۵		۱۰۰	۱.۲۶۷	۰.۳۰۰
۲۴		T	۰.۹۸۳	۲۵		۱۰۰	۱.۲۶۷	۰.۳۰۰

۳.۲. آزمون‌ها

تمامی این اطلاعات و تحلیل‌ها موجب گردید که حدس اولیه درباره منشأ اصلی افزایش دما در ژنراتور واحد شماره ۱، افزایش مقاومت سیم‌پیچی و به تبع آن افزایش تلفات اهمی و در نتیجه افزایش دما باشد. لذا مجموعه‌ای از آزمون‌ها تدوین گردید که به کمک آنها، این مساله با دقت بیشتر و به صورت عملی بررسی گردد. این آزمون‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- اندازه گیری دقیق مقاومت سه فاز با استفاده از دستگاه میکرواهم متر.
- ۲- اندازه گیری راکتانس سه فاز با استفاده از دستگاه RLC متر در جریان پائین (در زاویه‌های مختلف روتور).
- ۳- اندازه‌گیری مقاومت اهمی و راکتانس هر فاز با استفاده از تزریق جریان متناوب در فازهای استاتور (در زاویه‌های مختلف روتور).

برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری مقاومت اهمی سیم‌پیچی فازهای استاتور، مقاومت یک بار با استفاده از دستگاه میکرواهم متر متعلق به پژوهشگاه نیرو و بار دیگر با استفاده از دستگاه متعلق به نیروگاه قم انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که مقاومت اهمی فاز S در واحد شماره ۱ - که با دو دستگاه مختلف اندازه‌گیری شده- از بقیه فازها بیشتر است؛ که تحلیل‌های قبلی در خصوص بیشتر بودن مقاومت سیم‌پیچی فاز S را تایید می‌کند.

جدول ۳: مقاومت اهمی سیم‌پیچی فازهای استاتور واحد شماره ۱

فازها	دستگاه پژوهشگاه نیرو (mΩ)	دستگاه نیروگاه (mΩ)
R	۲.۲۲۶	۲.۲۳۴
S	۲.۳۴۶	۲.۳۵۷
T	۲.۱۸۱	۲.۱۸۹

با استفاده از دستگاه RLC متر و در فرکانس‌های ۵۰ و ۱۵۰ هرتز، تغییرات پارامترهای الکتریکی سیم‌پیچی سه فاز استاتور، در زوایای مختلف روتور، اندازه‌گیری گردید. همچنین امپدانس هر سه فاز استاتور ژنراتور، با تغییر زاویه روتور، با تغذیه جداگانه هر فاز استاتور با استفاده از یک دستگاه اتوترانس اندازه‌گیری گردید در بررسی نتایج این اندازه‌گیری‌ها مشاهده گردید که هر چند با تغییر موقعیت روتور - به دلیل تغییر مدار مغناطیسی - جریان تغییر می‌نماید، ولی محدوده تغییرات در هر سه فاز ثابت و یکسان می‌باشد؛ به عبارتی سیم‌پیچی هر سه فاز ژنراتور دارای شرایط یکسانی می‌باشند.

این اندازه‌گیری‌ها مویید وجود اشکال در سیم‌پیچی استاتور (و افزایش دمای ژنراتور به همین) نبودند، لذا برای اطمینان از صحت تحلیل فوق و

همچنین دقت اندازه‌گیری‌های انجام شده، مقاومت اهمی سیم‌پیچی‌های فازهای استاتور واحد ۴ این نیروگاه نیز با استفاده از دستگاه میکرواهم متر پژوهشگاه نیرو اندازه‌گیری گردید. برای ایجاد امکان مقایسه در مقدار مقاومت‌های اهمی واحدهای ۱ و ۴، لازم است که این مقاومت‌ها در یک دمای برابر محاسبه شوند که نتیجه این محاسبات در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول دیده می‌شود که مقاومت سیم‌پیچی‌های واحد ۴ اندکی بیشتر از اندازه‌گیری‌های واحد ۱ می‌باشد؛ به عبارت دیگر اگر منشأ افزایش دما در واحد شماره ۱، افزایش مقاومت سیم‌پیچی آن باشد، می‌بایست افزایش دما در واحد ۴ بیشتر از واحد ۱ می‌بود. بنابراین افزایش مقاومت سیم‌پیچی دلیل اصلی افزایش دما در ژنراتور واحد ۱ نیست و لازم بود که بررسی‌های بیشتری در این زمینه انجام گردد و سایر دلایل افزایش دما مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۴: مقاومت اهمی سیم‌پیچی استاتور واحد شماره ۱ و ۴ در ۵۰ °C

فازها	مقاومت واحد شماره ۱ (mΩ)	مقاومت واحد شماره ۴ (mΩ)
R	۲.۳۵۹	۲.۶۳۳
S	۲.۴۸۶	۲.۴۲۳
T	۲.۳۱۱	۲.۵۲۳

۳.۳. هسته استاتور

یکی از مسایلی که می‌تواند موجب افزایش دمای هسته استاتور گردد، وجود آلودگی‌های مختلف بر روی سطح هسته است که مانع از خنک شدن آن توسط سیستم تهویه می‌گردد. برای بررسی این مساله و تحقیق وضعیت هسته استاتور، آزمون بی‌باری انجام گرفت. در این آزمون جریان تحریک روتور به گونه‌ای تنظیم گردید که ولتاژ خروجی استاتور، در حالت بی‌باری و سرعت نامی روتور، به ترتیب مقادیر ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ مقدار ولتاژ نامی ژنراتور گردد. ژنراتور در هرکدام از این پله‌های ولتاژی مدتی نگه داشته شد و دمای RTDها ثبت گردید. برای ایجاد امکان مقایسه در نتایج ثبت شده، وضعیت تهویه تا پایان آزمون یکسان نگه داشته شد. در پایان آزمون، برای بررسی اثر سیستم خنک‌کنندگی بر دما، یک فن جدید (که در موقعیتی قرار دارد که بیشترین تاثیر را بر خنک شدن ژنراتور دارد) وارد سیستم گردید و تغییرات دما با گذشت زمان ثبت گردید. با بررسی دقیق اطلاعات ذخیره شده نتیجه گیری شد که سیستم خنک‌کننده گرمای ناشی از هسته را می‌تواند تهویه نماید؛ به عبارتی اشکالاتی مانند نشستن گرد و غبار و یا سایر منابع آلودگی بر روی هسته، مانع از خنک شدن آن توسط سیستم تهویه نمی‌گردد.

شایان ذکر است که در ژنراتور واحد ۱ نیروگاه قم، برخی پیچ‌های مربوط به میله‌های نگهدارنده هسته استاتور در محل جوش خوردگی دچار شکستگی می‌شوند. این مساله به معنی وجود لرزش‌های قابل توجه در هسته استاتور می‌باشد. این لرزش‌های مکانیکی باعث ساییده شده ورقه‌های استاتور به هم گردیده و با نازک‌تر شدن و تخریب تدریجی عایق بین ورقه‌ها، جریان گردابی بیشتری بین آنها جاری می‌شود که می‌تواند تولید گرمای اضافی در ژنراتور نماید و در نتیجه دمای آن افزایش می‌یابد. روند تدریجی افزایش دمای ژنراتور موید وجود این اشکال در هسته استاتور می‌باشد. سوال مهمی که در اینجا مطرح می‌شود این است که چه عاملی می‌تواند موجب ایجاد این لرزش‌ها در ورقه‌های هسته استاتور گردد.

یکی از عواملی که می‌تواند موجب ایجاد لرزش در ورقه‌های استاتور شود، وجود لرزش در انتهای شینه‌ها می‌باشد. این لرزش می‌تواند به صورت دائمی و با دامنه کم و یا به صورت کوتاه مدت و با دامنه زیاد (مانند آنچه در اتصال کوتاه رخ می‌دهد) باشد. برای تحقیق این فرضیه، اطلاعات زیر از مراجع مربوطه اخذ و بررسی گردید:

۱- دیاگرام تک خطی نیروگاه به همراه خطوط انتقال متصل به نیروگاه (شامل واحدهای گازی و بخار)

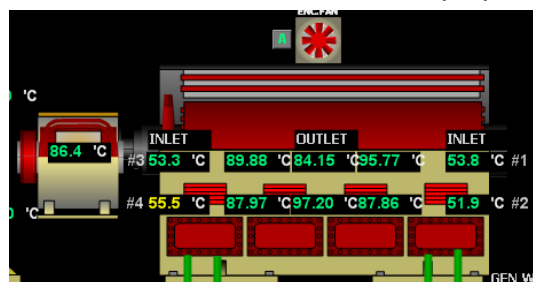
۲- خطاهای اتصال کوتاه که در خطوط انتقال اطراف نیروگاه رخ داده، به‌همراه تاثیرات احتمالی آنها بر روی واحدها (بخاری و گازی)

در بررسی‌های این اطلاعات مشخص گردید که خطای اتصال کوتاه در داخل نیروگاه و در نزدیکی ژنراتورها رخ نداده است. همچنین مشخص گردید که در سال ۱۳۸۵، یعنی سالی که آغاز فرایند افزایش دما در استاتور رخ داده است، تعداد ۸ بار اتصال کوتاه در خط انتقال بین پست‌های سیکل قم و پرند رخ داده که از بین آنها تعداد ۵ بار قبل از تاریخ آغاز تعمیر اساسی واحد ۱ می‌باشد. ضمناً، بیشتر این خطاها در زون یک خط انتقال منتهی به پست سیکل قم رخ داده است؛ یعنی دامنه جریان‌های اتصال کوتاه بالاست و اتصال کوتاه نزدیک ژنراتور است. این جریان زیاد، باعث وارد شدن نیروی ناگهانی زیادی به انتهای شینه‌ها در ژنراتور می‌گردد و نوسانات با دامنه بالا در آنها ایجاد می‌کند. شینه‌ها در محل خروج از درون شیراها مانند اهرم عمل می‌کنند و می‌توانند بدون این که تخریب قابل توجهی به عایق وارد شود، به هسته نیرو وارد کنند و در نتیجه ورقه‌های هسته استاتور نسبت به هم حرکت و سایش داشته باشند. ساییده شدن عایق بین ورقه‌ها در برخی نقاط باعث جاری شدن جریان گردابی در بین ورقه‌ها می‌گردد که این

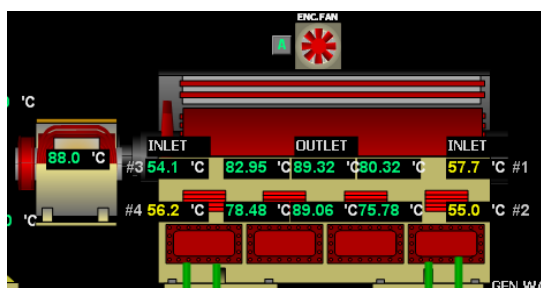
مساله موجب گرم‌تر شدن هسته استاتور می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که بررسی خطاهای اتصال کوتاه رخ داده در خطوط انتقال اطراف نیروگاه، این فرضیه را که منشأ اصلی افزایش دما در ژنراتور واحد ۱ وجود اشکال در هسته استاتور می‌باشد را تایید می‌کند. در ادامه شواهد دیگری در این رابطه بررسی می‌گردد.

همانطور که قبلاً مطرح گردید در شیراهای شماره ۱، ۴ (مربوط به فاز S) و ۵۶ (مربوط به فاز T) گوه‌های لق شده در ابتدای شیر و در سمت توربین قرار دارند (اطلاعات مربوط به بازبینی سال ۱۳۸۵). این مطلب تایید می‌کند که در این مکان‌ها، نیروی قابل توجهی به گوه‌ها (از طرف انتهای شینه‌ها) وارد شده است. از طرف دیگر پیچ‌هایی که در محل جوش خوردگی دچار شکست می‌گردند همگی در سمت توربین ژنراتور قرار دارند؛ به عبارت دیگر در این سمت نوسانات هسته استاتور به صورتی است که باعث صدمه دیدن اتصالات نگهدارنده ورقه‌های هسته استاتور می‌گردد. مطلب دیگری که می‌تواند به تایید کردن این فرضیه کمک کند این است که روند افزایش دما در استاتور ژنراتور تدریجی بوده است؛ به این معنی که در اثر ضربه اولیه ناشی از اتصال کوتاه، هسته در برخی نقاط دچار آسیب شده است و به دلیل کاهش استحکام سیستم نگهدارنده، لرزش‌های هسته استاتور افزایش یافته است و عایق بین ورقه‌ها دچار سایش شده است. این امر به نوبه خود باعث جاری شدن جریان گردابی در بین ورقه‌ها در این ناحیه می‌گردد که خود این کار زمینه را برای گسترش عیب و از بین رفتن بیشتر عایق بین ورقه‌ها فراهم می‌آورد. هر چه عایق بین ورقه‌ها بیشتر تخریب می‌گردد، افزایش دما در استاتور بیشتر خواهد بود.

برای تحقیق این مطلب به شکل‌های ۳ و ۴ توجه گردد که در آنها وضعیت دماهای هوای ورودی و خروجی ژنراتور واحد ۱ و ژنراتور یک واحد دیگر، در دو زمان مختلف و در توان تقریباً مشابه، نشان داده شده است. در این شکل‌ها دیده می‌شود که در هر یک از واحدهای ۲ و ۳، دمای هوای خروجی در سمت چپ (تحریک) بیشتر از دمای هوا در سمت راست (توربین) است. همچنین در هر دو شکل دیده می‌شود که در ژنراتور واحد ۱، با وجود کاهش دمای هوای ورودی نسبت به ژنراتورهای دیگر، دمای سمت راست (توربین) بیشتر از دمای سمت چپ (تحریک) همان ژنراتور است و حتی از دمای سمت توربین ژنراتور واحد دیگر نیز بیشتر است. به این معنی که با وجود خنک‌تر شدن دمای هوای ورودی به ژنراتور واحد ۱، سیستم تهویه نتوانسته دمای هوا در سمت توربین را کاهش دهد، ولی دمای هوا در سمت تحریک را کاهش داده است. از این مطلب این گونه می‌توان



الف) ژنراتور واحد ۱



ب) ژنراتور واحد ۲

شکل ۴: دمای ورودی و خروجی واحد ۱ و ۲ مورخ ۱۳۹۰/۰۴/۱۹

۴. نتیجه‌گیری

برای ریشه‌یابی دلایل افزایش دمای استاتور ژنراتور واحد شماره ۱ گازی نیروگاه قم، پس از بررسی سوابق فنی ثبت شده هر چهار واحد گازی تخمین اولیه برای دلایل بروز عیب، مجموعه‌ای از آزمون‌ها تدوین گردید. با تفسیر نتایج آزمون‌ها و اطلاعات تکمیلی دریافت شده از نیروگاه، این جمع‌بندی به دست آمد که منشا اصلی افزایش دما در استاتور واحد گازی شماره ۱، ایجاد آسیب اولیه به هسته در سمت توربین و در حوالی موقعیت RTD شماره ۱ و ۲ - در اثر حادثه‌ای مانند اتصال کوتاه - می‌باشد که به مرور زمان در حال گسترش می‌باشد.

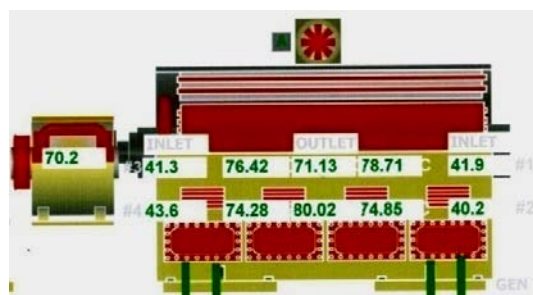
منابع

- [1] "Plant Support Engineering: Main Generator End-of-Life and Planning Considerations", EPRI Report, June 2007.
- [2] G.C. Stone, M. Sasic, D. Dunn, I. Culbert, "RECENT PROBLEMS EXPERIENCED WITH MOTOR AND GENERATOR WINDINGS", ...
- [3] Clyde V. Maughan P.E., "MONITORING OF GENERATOR CONDITION AND SOME LIMITATIONS THEREOF", IEEE, 2005.
- [4] "Plant Support Engineering: Large Motor End of Expected Life and Planning Considerations", EPRI Report, December 2007.
- [5] "Large Air-Cooled Generators Driven by Combustion Turbines", EPRI Report, January 1997.

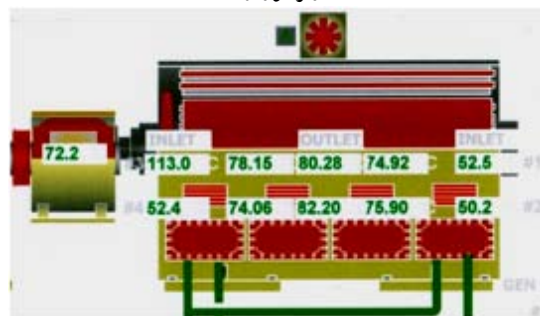
نتیجه‌گیری کرد که منشا اصلی افزایش دما در استاتور ژنراتور واحد شماره ۱ در سمت توربین آن قرار دارد. جهت افزایش اطمینان از تحلیل‌های فوق، درخواست گردید که دمای قسمت‌های مختلف ژنراتور واحد ۱ و ژنراتور یک واحد مشابه دیگر را، در حالتی که هر دو ژنراتور وضعیت خنک‌کنندگی یکسان داشته باشند و به پایداری دمایی رسیده باشند، ثبت و ارسال نماید که نتایج اطلاعات ارسالی از این آزمون در جدول ۵ آورده شده است. نتایج فوق نشان می‌دهد که در شرایط یکسان، دمای هوای خروجی سمت توربین در ژنراتور واحد ۱ بیشتر از دمای هوا در سمت تحریک است، در حالی که این قضیه در ژنراتور واحد ۲ برعکس می‌باشد که موبد تحلیل فوق می‌باشد. همچنین با توجه به این که دمای RTD شماره ۲ در ژنراتور واحد ۱، نسبت به همان RTD در ژنراتور واحد ۲ به صورت غیر طبیعی بیشتر است، می‌توان تخمین زد که احتمالاً اشکال در هسته استاتور و در نزدیکی این RTD رخ داده است.

جدول ۵: دماهای ژنراتور واحدهای ۱ و ۲ در شرایط خنک‌کنندگی یکسان

هوای ورودی	هوای خروجی	هوای خروجی	هوای خروجی	هوای ورودی	
۳۹.۵	۷۵.۷	۷۲.۲	۷۸.۷	۴۰.۲	ژنراتور واحد ۱
۴۱.۹	۷۳.۲	۷۹.۴	۷۲.۴	۳۸.۶	ژنراتور واحد ۲
۴۳.۰	۷۲.۰	۶۸.۲	۶۸.۲	۴۴.۸	ژنراتور واحد ۳
۴۵.۸	۷۵.۰۳	۷۵.۷	۶۹.۳	۴۳.۶	



الف) ژنراتور واحد ۱



ب) ژنراتور واحد ۳

شکل ۳: دماهای ورودی و خروجی در واحد ۱ و ۳ مورخ ۱۳۹۰/۱۱/۱