

تحلیل و مقایسه حوادث منجر به تریپ واحد سه و واحد یک نیروگاه طوس از نظر صحت عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور

علی ابراهیمی اله آبادی

دفتر مهندسی شرکت افق تأمین انرژی طوس

نیروگاه طوس

مشهد، ایران

a.ebrahimi@otet.co

چکیده — ژنراتورها یکی از تجهیزات پیچیده و گران قیمت نیروگاه محسوب می‌شوند. از این رو بررسی رفتار سیستم حفاظتی آنها هنگام بروز خطا و اطمینان از عملکرد صحیح و قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی، یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی، خصوصاً در نیروگاه‌های قدیمی (با سیستم حفاظتی قدیمی و غیر دیجیتالی) است. در این مقاله، به بررسی فنی عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور در تریپ واحد یک و واحد سه نیروگاه طوس پرداخته شده است. هر دو حادثه منجر به تریپ، ناشی از تریپ بویلر بوده است؛ لکن رله‌هایی که بعد از تریپ بویلر باعث از مدار خارج شدن ژنراتور شده‌اند متفاوت هستند. استفاده از تجربیات ارائه شده در این مقاله برای کاهش زمان عیب‌یابی و اطمینان از وضعیت ژنراتور برای راه‌اندازی مجدد در نیروگاه طوس (و نیروگاه‌های دارای سیستم حفاظتی مشابه) مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی — تحلیل حوادث؛ حفاظت ژنراتور؛ نیروگاه؛ رله استاتیکی؛ تریپ؛ خروج اضطراری؛ بویلر.

۱. مقدمه

توقف‌های اضطراری نیروگاه که در زمان نامشخص رخ می‌دهد، پایداری شبکه برق را کاهش می‌دهد؛ یکی از راه‌های کاهش خروج‌های اضطراری و محدودیت‌های تولید برق، بررسی نمودارها و اطلاعات ثبت شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری و حفاظتی در لحظه رخداد حادثه و انجام اقدامات اصلاحی، تغییر طرح و یا بهینه‌سازی برای جلوگیری از تکرار حوادث مشابه است [۱]. به‌عنوان مثال، در [۲] با استفاده از پارامترهای رله‌های حفاظتی خط و ژنراتور به بررسی خروج واحد یک اشکودا نیروگاه مشهد (و متعاقباً بی‌برقی پست‌های شعاعی غدیر و رضوی در حادثه شبکه فوق‌توزیع خراسان رضوی) در شهریورماه ۱۳۹۵ پرداخته شده و پیشنهادهایی برای جلوگیری از تکرار حوادث مشابه ارائه شده است.

واگذاری تدریجی نیروگاه‌های کشور به بخش خصوصی، فضای رقابتی بازار برق، جرائم ناشی از تریپ و خروج اضطراری نیروگاه‌ها و هزینه‌های سنگین ناشی از توقف تولید، باعث شده است که تجزیه و تحلیل و ثبت تجربیات در حوادث منجر به تریپ (خصوصاً در نیروگاه‌های قدیمی با سیستم‌های حفاظتی غیر دیجیتالی مانند نیروگاه طوس)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. تحلیل‌های ارائه شده در [۳] و محاسبه‌های هزینه‌های تریپ واحدهای بخاری نیروگاه شهید رجایی نیز اهمیت آنالیز حوادث منجر به تریپ را از دیدگاه اقتصادی، بیش از پیش نمایان می‌سازد. تفاوت در توپولوژی سیستم حفاظتی (خصوصاً در نیروگاه‌های بخاری قدیمی کشور)، گستردگی تجهیزاتی که نقص (احتمالی) در آنها منجر به تریپ واحد می‌شود و عدم وجود سیستم DCS و حفاظت پشتیبان دیجیتالی در نیروگاه‌های قدیمی نیز از دیگر عواملی است که ضرورت بررسی فنی و تحلیل رفتار سیستم حفاظتی ژنراتور در حوادث منجر به تریپ را نشان می‌دهد.

در این مقاله به بررسی فنی دو حادثه منجر به تریپ در نیروگاه طوس پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه در هر دو حادثه، تریپ بویلر باعث تریپ واحد شده و لکن عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور متفاوت بوده است، برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور، عملکرد رله‌های آن در هر دو حادثه بررسی و مقایسه شده است. نتایج صحت عملکرد سیستم حفاظتی در هر دو حادثه را نشان می‌دهد. علت اصلی تفاوت در عملکرد رله‌های حفاظتی ژنراتور،

تجهیزی است که ریشه اصلی بروز حادثه بوده است. به عبارت دیگر، تریپ بویلر در دو حادثه ناشی از نقص در یک تجهیز مشابه نبوده و این موضوع در عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور تأثیر گذاشته است. در ادامه پس از ارائه توضیحاتی در مورد سیستم حفاظتی ژنراتورهای نیروگاه طوس، به بررسی دقیق شرایط تریپ در هر دو حادثه (با استفاده از نمودارهای مستخرج از رکوردرها)، پرداخته خواهد شد.

۲. سیستم حفاظتی ژنراتورهای نیروگاه طوس

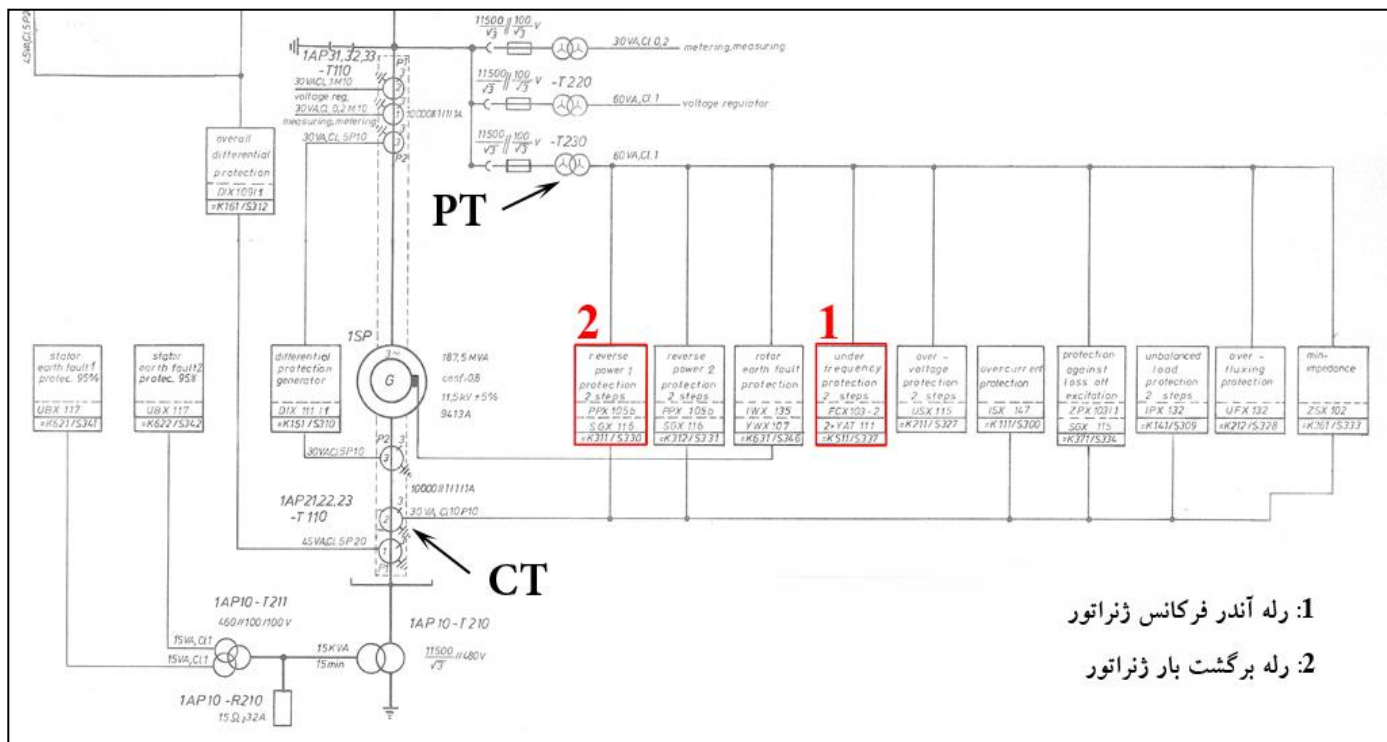
نیروگاه طوس دارای ۴ دستگاه ژنراتور ۱۵۰ مگاواتی است. برخی از مشخصات این ژنراتورها در «جدول ۱» قابل مشاهده است [۴].

جدول ۱: برخی از مشخصات ژنراتورهای نیروگاه طوس

توان	ولتاژ	جریان	فرکانس	بازده	ضریب قدرت
۱۵۰ MW	۱۱.۵ kV	۹۴۱۳ A	۵۰ Hz	٪ ۹۸.۵	۰.۸

دیاگرام تک خطی سیستم حفاظتی ژنراتورهای نیروگاه طوس در «شکل ۱» نشان داده شده است. رله‌هایی که با کادر ضخیم (قرمز رنگ) مشخص شده‌اند، به ترتیب رله‌هایی هستند که در دو حادثه تریپ، که در ادامه توضیح داده خواهند شد، عملکرد داشته‌اند.

هر کدام از رله‌های حفاظتی در نیروگاه برای هدف معینی نصب گردیده است. با توجه به تنوع زیاد آنها (خصوصاً در مورد ژنراتور)، در این بخش برخی از حفاظت‌های اصلی ژنراتورها و الکتروموتورهای هوای احتراق بویلر (FDF) در نیروگاه طوس که با موضوع مورد بحث مرتبط است، مختصراً معرفی می‌گردد. ذکر این نکته ضرورت دارد که با توجه به مقایسه نتایج تست‌های انجام شده رله‌های ژنراتور و باس‌های ۶kV در تعمیرات اساسی و نیمه‌اساسی و مقایسه با نتایج تست‌های نصب راه‌اندازی (شرکت BBC آلمان)، رله‌های حفاظتی در وضعیت مطلوبی از نظر حساسیت، سرعت، انتخاب‌گری، قابلیت اطمینان و غیره قرار دارند [۵] و [۶].



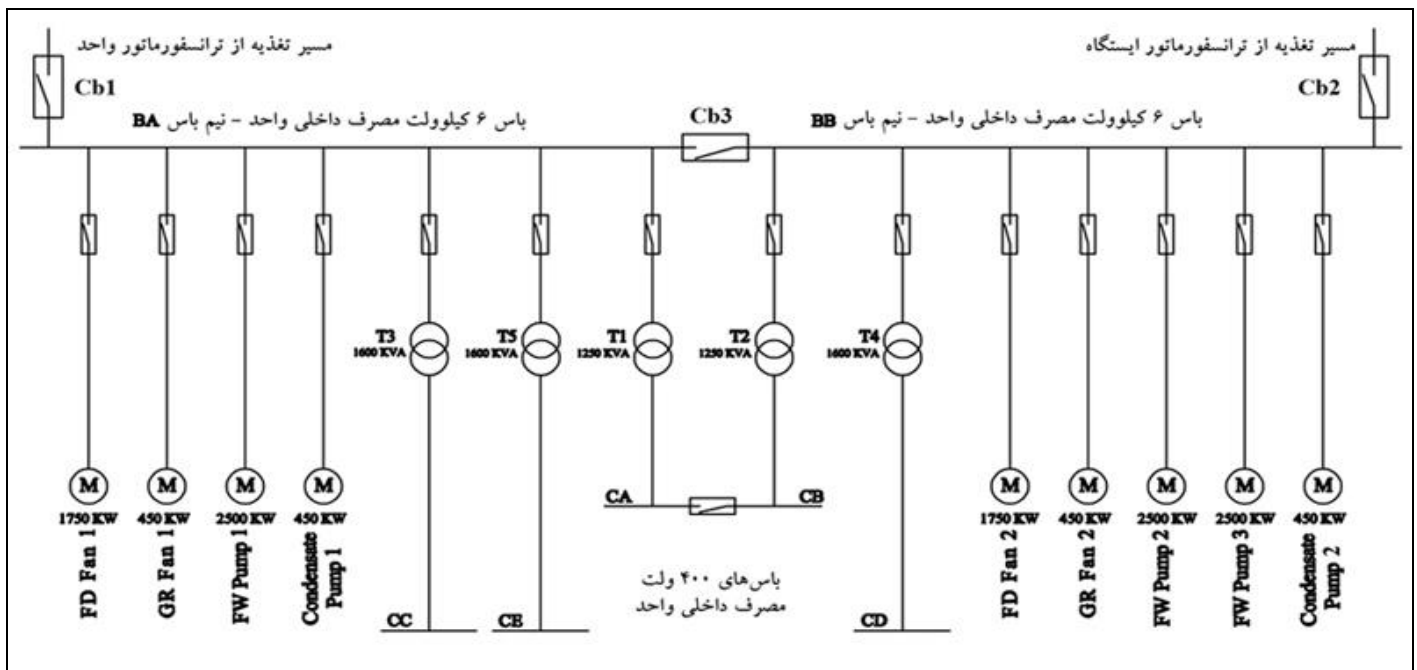
شکل ۱: دیاگرام تک خطی سیستم حفاظت ژنراتور نیروگاه طوس

۲.۱. رله آندر فرکانس ژنراتور (FCX 103-1 K511)

رله‌ای ولت‌متریک بوده و از ولتاژ خروجی ترانسفورماتورهای ولتاژ اتاق ارت تغذیه می‌شود. این رله کنترل فرکانس ولتاژ خروجی ژنراتور را بر عهده دارد؛ بدین صورت که، اگر فرکانس ولتاژ خروجی ژنراتور (که خود تابعی از دور ژنراتور است) کاهش پیدا کند، رله با دو حالت عملکردی وارد مدار می‌شود. استیپ یک رله روی ۴۷٫۹ هرتز تنظیم شده و در صورت عملکرد، باعث قطع بریکر ۱۳۲ کیلوولت خروجی ژنراتور به سمت شبکه شده و ژنراتور را از شبکه جدا می‌کند؛ لکن فرمان تریپ ژنراتور صادر نمی‌شود. چنانچه کاهش دور ادامه داشته باشد و فرکانس به ۴۷ هرتز برسد، استیپ دوم رله عمل کرده و فرمان تریپ ژنراتور را صادر خواهد کرد [۱۲].

۲.۲. رله ارت فالت باس ۶kV مصرف داخلی

دیاگرام تک خطی باس ۶kV یک واحد نیروگاه در «شکل ۲» نشان داده شده که شامل باس‌ها و الکتروموتورهای ۶kV، مسیره‌های تغذیه باس‌ها، بریکرها و ترانسفورماتورهای مصرف داخلی کمکی می‌باشد [۴].



شکل ۲: دیاگرام تک خطی مصرف داخلی ۶ کیلوولت نیروگاه طوس [۴]

نقطه ستاره سیستم تغذیه داخلی ۶kV نیروگاه از زمین ایزوله است. در سیستم‌های ایزوله اگر یکی از فازها ارت شود، ولتاژ آن فاز کاهش یافته و ولتاژ فازهای سالم به اندازه $\sqrt{3}$ برابر افزایش پیدا خواهد کرد. این شرایط ضمن برهم زدن تعادل (برداری) ولتاژها، باعث جابجایی نقطه ستاره ولتاژها شده و جریان خازنی از سیستم تغذیه به زمین منتقل خواهد شد. بنابراین با اتصال زمین یک فاز مشکل حادی اتفاق نخواهد افتاد، لکن اگر این وضعیت ادامه پیدا کند و اتصال زمین دومی رخ دهد (اتصال کوتاه دو فاز اتفاق افتاده)، می‌تواند باعث وارد شدن صدمات زیادی به سیستم گردد. برای تشخیص ارت شدن سیستم تغذیه باس‌های ۶kV، از رله ولتاژی به نام رله ارت فالت استفاده شده است. این رله حفاظت باس و مصرف کننده‌های روی آن را در قبال وقوع اتصال زمین بر عهده دارد و در صورت وقوع اتصال زمین فقط آلامر داشته و در اولین فرصت باید نسبت به رفع نقص اقدام کرد [۴].

۲.۳. رله آندر ولتاژ باس ۶kV مصرف داخلی

این رله حفاظت باس ۶kV و مصرف کننده‌های آن را در قبال افت ولتاژ بر عهده دارد. نمونه ولتاژ مورد نیاز رله از ترانسفورماتورهای ولتاژ نصب شده روی باس ۶kV با نسبت تبدیل 6000V:100V تغذیه می‌شود. در صورتی که سطح ولتاژ باس به کمتر از مقدار تنظیم شده (0.8pu) روی رله برسد، بعد از چهار ثانیه فرمان قطع به بریکر تغذیه کلیه مصرف کننده‌های در حال کار روی باس را صادر و آنها را از مدار خارج خواهد نمود. چنانچه زمان افت ولتاژ کمتر از چهار ثانیه بوده و سطح ولتاژ قبل از آن به حالت عادی برگردد، رله خروجی نداشته و هیچ اتفاقی نخواهد افتاد [۴].

۲.۴. رله اضافه جریان (ITX) الکتروموتورهای ۶kV

این رله حفاظت‌های مختلف الکتروموتورهای ۶kV را بر عهده دارد. حفاظت‌های رله شامل موارد ذیل می‌باشد [۴]:

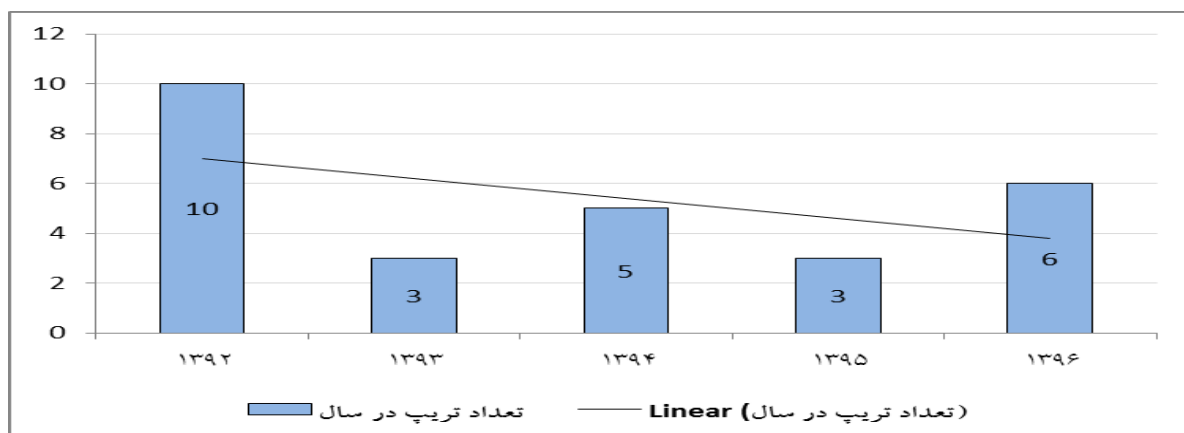
- حفاظت جریان زیاد: اگر جریان الکتروموتور بیش از مقدار تنظیم شده رله باشد، با عملکرد رله، الکتروموتور از مدار خارج می‌شود.
- حفاظت اتصال کوتاه: حفاظت الکتروموتور در مقابل اتصال کوتاه داخلی را بر عهده دارد. حالت اتصال کوتاه برای الکتروموتور FDF روی ۱۹ برابر جریان نامی (۱۹×۱۹۹) تنظیم شده است.
- حفاظت اضافه بار: اگر در اثر بار اضافی اعمال شده به الکتروموتور، جریان و در نتیجه درجه حرارت سیم‌پیچ آن افزایش پیدا کند، رله عمل کرده و الکتروموتور را از مدار خارج می‌کند.
- حفاظت عدم تعادل بار: اگر در اثر اتصال حلقه در سیم‌پیچ‌های الکتروموتور و یا قطع یک فاز، جریان‌های سه فاز از حالت تعادل خارج شوند، با عملکرد رله، الکتروموتور از مدار خارج می‌شود.

۲.۵. رله برگشت بار ژنراتور

رله برگشت بار یک رله سنجش توان است و برای جلوگیری از حالت موتوری شدن ژنراتور و در اصل برای حفاظت از توربین استفاده می‌شود. به دلیل اهمیت بالای ژنراتور و برای اطمینان از موتوری نشدن آن، دو عدد رله برگشت بار (به صورت پشتیبان) در نظر گرفته شده است. اگر قدرت تولیدی ژنراتور از ۰.۵٪ توان نامی یعنی ۷۵۹ کیلووات کمتر شود، ژنراتور برای جبران تلفات داخلی خود از شبکه جریان کشیده و با عکس شدن جهت جریان رله فعال خواهد شد. رله‌ها دارای دو عمل کرد سریع و آهسته می‌باشند. مرحله سریع بعد از ۲ ثانیه و مرحله آهسته بعد از ۱۰ ثانیه عمل خواهد کرد. اگر کاهش توان تولیدی ژنراتور سریع باشد یعنی والو بخار ورودی به توربین‌ها کاملاً بسته باشد، مرحله سریع رله وارد مدار شده و بعد از ۲ ثانیه فرمان‌های تریپ صادر خواهد شد. در این حالت، تریپ توربین باعث تریپ ژنراتور می‌شود. در حالت دوم اگر توان تولیدی که تابعی از بخار ورودی به توربین‌ها می‌باشد به آرامی کاهش پیدا کند و والو ورودی بخار به توربین کاملاً بسته نباشد، مرحله آهسته رله وارد مدار شده و بعد از ۱۰ ثانیه فرمان تریپ صادر خواهد شد. حالت سومی هم پیش‌بینی شده که چنانچه توان تولیدی حالت نوسانی داشته و کم و زیاد شود، کارت جمع‌کننده به نام انتگرال‌گیر وارد مدار شده و با جمع کردن سطح زیر منحنی‌های نوسانات بعد از حدود ۱۰ نوسان، فرمان تریپ را صادر خواهد کرد [۱۲].

۳. تشریح و تحلیل حوادث منجر به تریپ

تعداد تریپ‌ها یا خروج‌های اضطراری خودکار واحدهای نیروگاه طوس (با عملکرد سیستم حفاظتی و نه به صورت دستی برای رفع نقص و تعمیرات)، از سال ۱۳۹۲ تا سال ۱۳۹۶ نشان داده شده است. هر حادثه تریپ یک بررسی و تحلیل جداگانه دارد؛ لکن در دو مورد در سال ۱۳۹۶ با تریپ بویلر و متعاقباً تریپ واحد، عملکرد رله‌های حفاظتی ژنراتور باهم متفاوت بود که در این بخش به تشریح حوادث و تحلیل عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور پرداخته می‌شود.

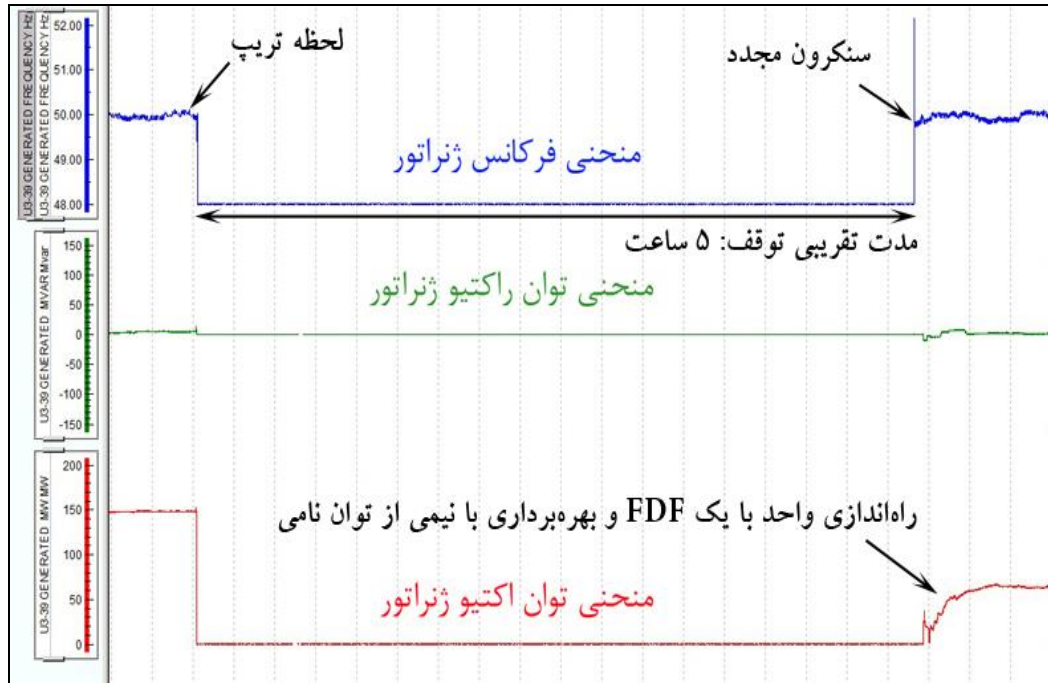


شکل ۳: خروج‌های اضطراری خودکار نیروگاه طوس از سال ۹۲ تا ۹۶ [۸]

۳,۱. حادثه اول: تریپ واحد سه

در ساعت ۱۴:۳۰ مورخه ۱۳۹۶/۰۱/۱۶ و در بار حداکثر، FDF شماره ۲ واحد سه با عملکرد رله اضافه جریان از مدار خارج شد و باعث کاهش سریع هوای احتراق بویلر گردید. در ادامه با ظاهر شدن آلام سیگما (اختلال در سیستم سوخت و هوا)، بویلر و متعاقباً واحد تریپ کرده است [۷]. علاوه بر رله مذکور، رله ارت فالت باس ۶kV مصرف داخلی نیز عملکرد داشته است. در مورد عملکرد سایر رله‌ها، با توجه به اینکه بلافاصله پس از تریپ، اقدامات لازم برای فراهم کردن مقدمات راه‌اندازی واحد با یک دستگاه FDF انجام شده و رله‌های نیروگاه نیز قابلیت ثبت شکل موج‌های لحظه خطا را ندارند، اطلاعات دقیقی در دسترس نیست و بایستی با استفاده از سیگنال‌های رکوردرها به تحلیل حوادث پرداخت. «شکل ۴» نمودارهای فرکانس، توان اکتیو و راکتیو ژنراتور را از قبل از شروع حادثه تا بعد از راه‌اندازی واحد با یک FDF (حدود ساعت ۲۰:۰۰) نشان می‌دهد.

با بررسی‌های اولیه، با توجه به وجود پاشش شدید روغن و وجود دوده و سیاهی در روغن بریکر الکتروموتور FDF شماره دو، حدس بر این بود که نقص از ناحیه الکتروموتور و ناشی از سوختن آن بوده است. «شکل ۵» وضعیت بریکر مذکور را پس از عملکرد و قطع جریان خطا نشان می‌دهد.



شکل ۴: توان اکتیو، راکتیو و فرکانس ژنراتور، قبل از تریپ تا سنکرون مجدد



شکل ۵: قطع جریان شدید اتصال کوتاه و پاشش شدید روغن بریکر

پس از بررسی رله‌های حفاظتی که با عملکرد صحیح و به‌موقع از گسترش نقص و ایجاد خرابی عمده جلوگیری کرده بودند، عملیات تعمیراتی با باز کردن سرکابل الکتروموتور و انجام تست‌ها عایقی (Megger) ادامه یافت که نتایج نشانی از وجود سوختگی در الکتروموتور را در پی نداشت و مقاومت عایقی

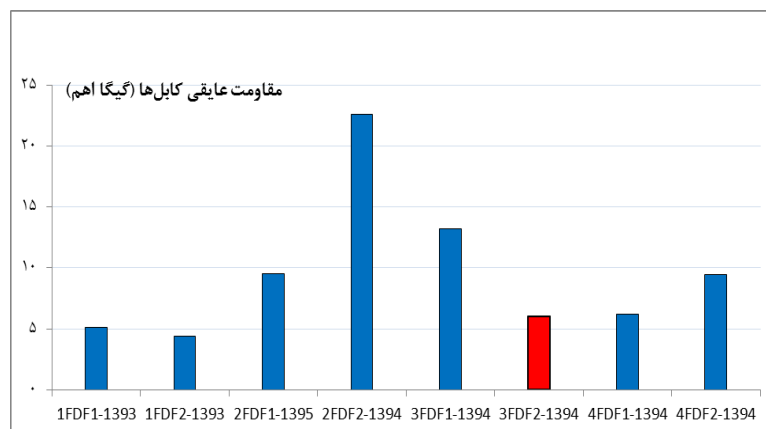
الکتروموتور در همان ثانیه‌های ابتدایی تست، از مرز $2G\Omega$ گذشت. در ادامه با توجه به احتمال بروز اتصالی در کابل، اتصالات مربوطه از سمت باس $6kV$ نیز باز گردید. با محرز شدن وجود اتصالی در کابل الکتروموتور با توجه به تست‌های عایقی، ردیابی کابل برای پیدا کردن محل زدگی و تصمیم‌گیری برای تعویض یا ترمیم کابل آغاز شد. نهایتاً محل آسیب‌دیده در فاصله (تقریبی) بیست‌متری الکتروموتور شناسایی شد. «شکل ۶» کابل آسیب‌دیده را نشان می‌دهد.



شکل ۶: کابل آسیب‌دیده

لازم به ذکر است، تست مکان‌یابی عیب با استفاده از دستگاه عیب‌یاب کابل نیز انجام شد که به علت وجود لوله‌های مختلف در اطراف محل خطا، با نوبز فراوان همراه بوده و یافتن محل آسیب‌دیده را به تعویق انداخت. نهایتاً با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که علت حادثه ناشی از لوله‌های مربوط به قسمت بهره‌برداری (تانک بویلر امپتی) بوده است. ناشی بخار پُر فشار و داغ، باعث آسیب دیدن لوله محافظ کابل و عایق آن شده و منجر به اتصال کوتاه شده است. وجود آب باران، آب‌های ناشی از قلیاشویی بویلر و باران‌های اسیدی، املاح زمین و زلزله‌ای به قدرت ۶ ریشتر که صبح روز حادثه و در ساعت ۱۰:۳۹ حوالی شهر سفیدسنگ در فاصله ۸۶ کیلومتری مشهد را لرزاند [۹] و لرزش آن کاملاً در محل نیروگاه قابل احساس بود از دیگر عواملی هستند که در بروز حادثه بی‌تأثیر نبوده‌اند.

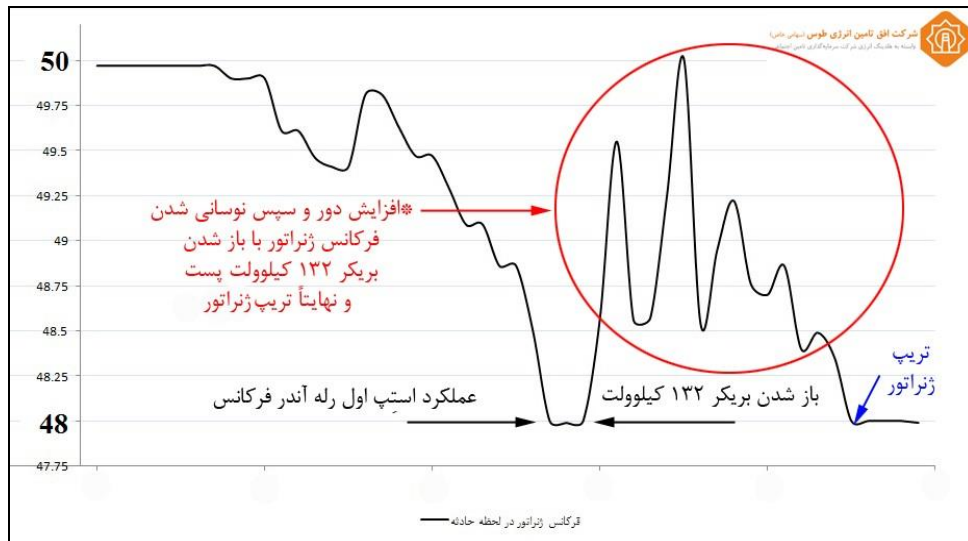
در ادامه نتایج آزمون‌های مقاومت عایقی مربوط به کابل الکتروموتورهای FDF از سال ۱۳۹۳ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه تست مقاومت عایقی کابل الکتروموتورهای $6kV$ به صورت جداگانه، از چند سال اخیر وارد چرخه فعالیت‌های تعمیراتی شده، لذا تست‌های مقاومت عایقی کابل به صورت جداگانه، دامنه آماری گسترده‌ای نداشته و به همین علت برای بررسی آماری، از مقایسه مقاومت عایقی کابل آسیب‌دیده با سایر کابل‌های مشابه (الکتروموتورهای FDF) در سایر واحدها استفاده شده که در «شکل ۷» قابل مشاهده است. در این نمودار هر ستون معرف مقدار عددی مقاومت عایقی کابل برحسب گیگا اهم بوده و به‌عنوان مثال، منظور از 3FDF2-1394 مقدار مقاومت عایقی الکتروموتور FDF شماره دو، واحد سه در سال ۹۴ است [۵]. با توجه به اینکه محدوده مقاومت‌های اندازه‌گیری شده در حد گیگا اهم است، وجود عیب قطعی در هنگام اندازه‌گیری‌ها نقض می‌شود. علت تفاوت نتایج تست‌ها ناشی از وابستگی نتایج به عواملی همچون دمای هوا، رطوبت، کالیبره بودن دستگاه، طول کابل و ... است که در تست فرم‌های موجود ثبت نشده است.



شکل ۷: مقاومت عایقی کابل الکتروموتورهای FDF در ۴ واحد از سال ۹۳

همان‌طور که اشاره شد، علت اصلی تریپ ژنراتور (نه حادثه کابل) ایجاد شرایط ناپایدار در سیستم سوخت و دود هوای بویلر به علت خروج الکتروموتور FDF بوده است. تحلیل فرکانسی ژنراتور و تریپ واحد در «شکل ۸» نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تریپ بویلر و متعاقباً توربین، دور ژنراتور افت کرده و استپ اول رله آندر فرکانس، ارتباط ژنراتور و پست بلافاصله را قطع کرده؛ لکن هنوز ژنراتور تریپ نکرده است. برداشته شدن بار از روی ژنراتور منجر به افزایش دور و نوسانی شدن فرکانس به صورت لحظه‌ای شده و در ادامه با کاهش دور، استپ دوم رله نیز عمل کرده که منجر به قطع تحریک و تریپ ژنراتور شده است. رکوردهای فرکانس در نیروگاه طوس، مقداری کمتر از ۴۸ هرتز را ثبت نمی‌کنند.

در «شکل ۹» نیز وضعیت توان اکتیو ژنراتور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توان اکتیو ژنراتور با خروج FDF به شدت کاهش پیدا کرده، سپس با عملکرد استپ اول رله اندر فرکانس بار شبکه از روی ژنراتور برداشته شده است. در ادامه با توجه به تریپ توربین، کاهش دور، اتصال خروجی ژنراتور به باس ۶kV با فرکانسی کمتر از ۵۰Hz و افت فرکانس مضاعف، ژنراتور از مدار خارج شده است (ر.ک جدول ۲).



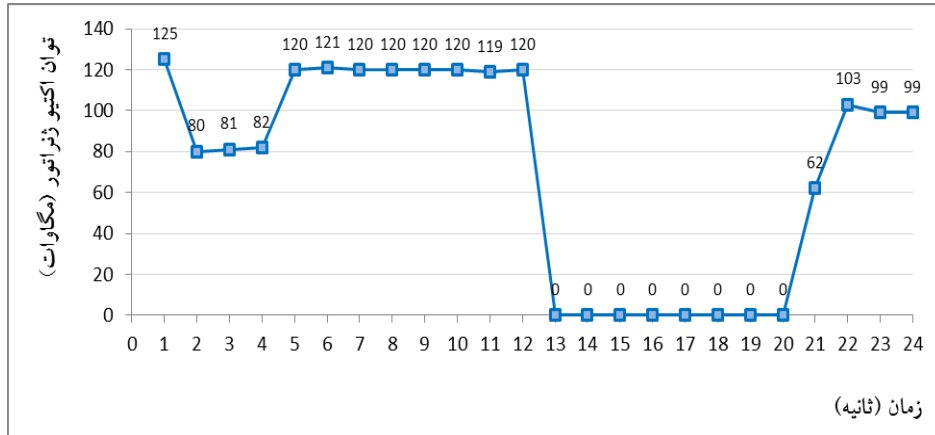
شکل ۸: تحلیل فرکانسی حادثه و تریپ ژنراتور



شکل ۹: توان اکتیو ژنراتور در لحظه حادثه

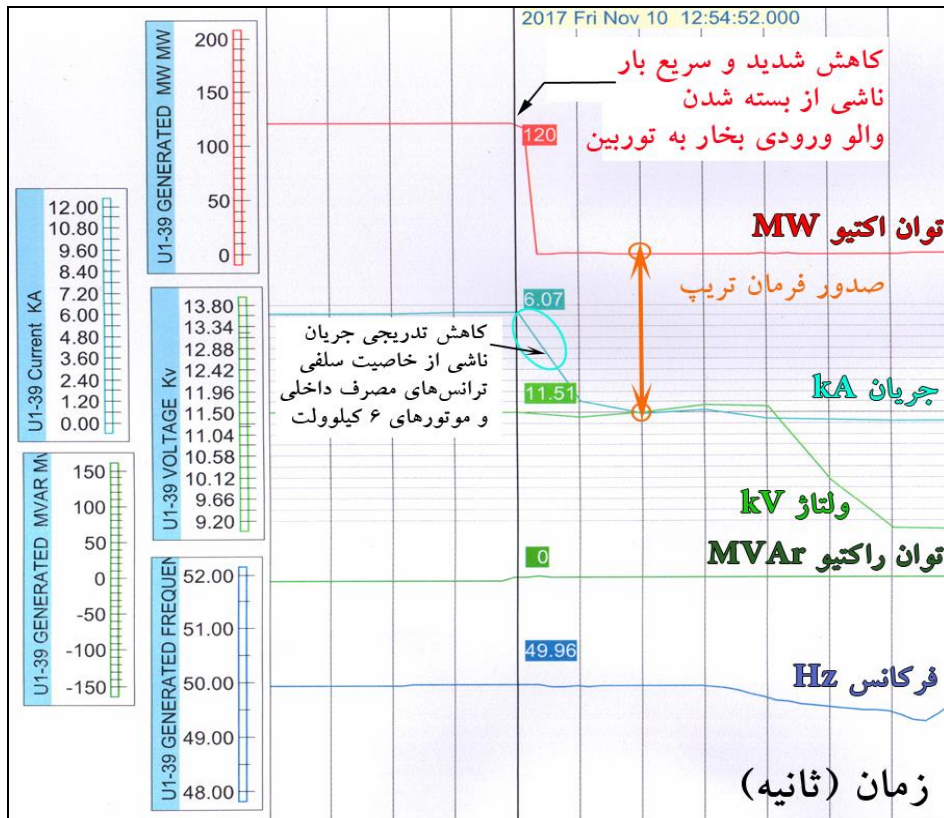
۳,۲. حادثه دوم: تریپ واحد یک

همان‌طور که در «شکل ۱۰» مشاهده می‌شود، واحد ۱ در حدود ساعت ۱۳:۰۰ مورخ ۱۳۹۶/۰۸/۱۹ (با عملکرد حفاظت برگشت بار) از مدار خارج شده است. علت اصلی حادثه، بروز نقص در (یکی از خازن‌های) تابلوی اینورتر واحد و خرابی یکی از کنتاکتورهای مسیر قدرت و سوختگی بخشی از کابل‌های مدار فرمان و قدرت مربوط به رکتیفایر واحد ۱ و ۲ (ناشی از اضافه ولتاژ با منشأ ناشناخته) بوده است. متعاقباً قطع تغذیه باس IEM (و قطع تغذیه سیستم نظارت کننده شعله برنرها و بخشی از تغذیه ۲۲۰ ولت safe مربوط به تابلوهای سیستم تحریک) منجر به تریپ شده است [۱۰].



شکل ۱۰: نمودار توان اکتیو (MW) ژنراتور واحد ۱ در مورخ ۱۳۹۶/۰۸/۱۹

با حضور گروه‌های تعمیراتی تغذیه اینورتر واحد یک از طریق اینورتر مشترک برقرار و واحد در کمتر از ۸ ساعت مجدداً با شبکه پارالل گردید. «شکل ۱۱» نمودارهای توان اکتیو و راکتیو، فرکانس، جریان و ولتاژ ژنراتور واحد یک در لحظه حادثه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از «شکل ۱۱» قابل برداشت است، با قطع تغذیه شعله‌بین‌ها، بویلر بلافاصله تریپ کرده و استپ یک رله برگشت بار پیک‌آپ کرده و در ادامه واحد تریپ کرده است.



شکل ۱۱: شکل موج‌های الکتریکی مربوط به واحد ۱ در لحظه تریپ

با بسته شدن والو اصلی بخار توربین، بار واحد به شدت کاهش یافته و رله برگشت بار (سریع) پیک‌آپ کرده است، با ادامه شرایط پس از ۲ ثانیه سیگنال‌های تریپ ارسال شده است (ر.ک جدول ۲). جریان ژنراتور نیز با توجه به خاصیت سلفی ترانسفورماتورهای مصرف‌داخلی و الکتروموتورهای ۶kV به تدریج کاهش یافته است. پس از جدا شدن ژنراتور از پست، ولتاژ آن نیز بعد یک مرحله نوسان، به سمت صفر میل می‌کند.

با بررسی انجام شده برای استخراج سوابق تکرار موضوع در گذشته به منظور مقایسه‌های آماری و تهیه تاریخچه، مورد مشابهی از سال ۱۳۸۶ تاکنون یافت نشد [۱۱]. در «شکل ۱۲» بخشی از مراحل تست (و عیب‌یابی) سیستم حفاظتی (رله برگشت بار) ژنراتور برای اطمینان از وضعیت آن قبل از راه‌اندازی مجدد واحد نشان داده شده است.



شکل ۱۲: بخشی از مراحل تست سیستم حفاظتی ژنراتور قبل از راه‌اندازی واحد

۳.۳. مقایسه نهایی با تحلیل عملکرد حفاظت ژنراتور

در هر دو حادثه، به دلیل تریپ بویلر (و متعاقباً توربین)، ژنراتور تریپ کرده است؛ لکن در حادثه واحد سه با عملکرد رله آندر فرکانس و در حادثه واحد یک با عملکرد رله برگشت بار تریپ ژنراتور را داشته‌ایم. با توجه به توضیحات داده شده در بخش‌های قبل و فانکشن رله‌های آندر فرکانس و برگشت بار ژنراتور، عملکرد صحیح سیستم حفاظتی قابل نتیجه‌گیری است. چراکه در حادثه واحد یک، با قطع تغذیه شعله‌بین‌ها، بویلر بلافاصله تریپ کرده و استپ یک رله برگشت بار پیک‌آپ کرده است؛ ولی در مورد تریپ واحد سه بعد از خارج شدن یک FDF، قبل از تریپ بویلر و در طی حالت گذرا، یک FDF در مدار بوده که در این حالت والو ورودی بخار به توربین کاملاً بسته نشده و استپ یک رله برگشت بار بلاک شده است و لذا رله آندر فرکانس (در هر دو استپ) عملکرد داشته است.

در پایان با توجه به [۱۲] ماتریس عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور برای رله‌های برگشت بار و آندر فرکانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده عملکرد صحیح تمام فانکشن‌های عملکردی رله‌ها بود. بخشی از ماتریس عملکرد سیستم حفاظت ژنراتورهای نیروگاه طوس (مربوط به رله‌های مذکور) در «جدول ۲» نشان داده شده؛ نمای دور ماتریس نیز در «شکل ۱۲» قابل مشاهده است.

جدول ۲: ماتریس عملکرد رله‌های آندر فرکانس و برگشت بار نیروگاه طوس

	132kV CB	Magnetic field switch	Turbine shut down	6kV CB	Cross feeder	Collective indication
under frequency step I	*				*	*
under frequency step II	*	*		*	*	*
reverse power	*	*	*	*	*	*

در مورد تریپ توربین در حادثه اول با توجه به ماتریس، همان طور که توضیح داده شد، علت تریپ توربین، تریپ بویلر بوده و عدم ارسال فرمان تریپ توربین از طرف سیستم حفاظتی (رله آندر فرکانس) مطابق ماتریس عملکرد، صحیح بوده است. در مورد حادثه دوم نیز با عملکرد رله برگشت بار، کلیه سیگنال‌های تریپ از طرف سیستم حفاظتی ارسال شده است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه‌های (مستقیم و غیر مستقیم) ناشی از خروج اضطراری واحدهای نیروگاهی، کاهش حوادث منجر به تریپ (با کمک گرفتن از تعمیرات پیشگیرانه بر اساس نتایج سوابق پیشین) و راه‌اندازی هرچه سریع‌تر واحدها بعد از هر تریپ امری اجتناب ناپذیر است. یکی از راه‌های کاهش خروج‌های اضطراری و محدودیت‌های تولید، بررسی نمودارها و اطلاعات ثبت شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری و حفاظتی در لحظه رخداد حادثه و انجام اقدامات اصلاحی، تغییر طرح و یا بهینه‌سازی برای جلوگیری از تکرار حوادث مشابه است. در این مقاله به تحلیل فنی و حفاظتی دو مورد از حوادث تریپ نیروگاه طوس در سال ۱۳۹۶ با دلیل مشابه و عملکرد سیستم حفاظتی متفاوت پرداخته شد؛ با توجه به قدیمی بودن رله‌های ژنراتورها و عدم وجود رله‌های دیجیتالی پشتیبان، برای تحلیل و بررسی از اطلاعات رکوردرهای توان، فرکانس و در واحد یک علاوه بر این رکوردرهای جریان و ولتاژ ژنراتور استفاده شد. نتایج تحلیل‌های انجام شده عملکرد صحیح سیستم حفاظتی را نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت فراوان مانیتورینگ شکل موج‌های ژنراتور در لحظه تریپ برای تحلیل شرایط خطا و بررسی علت صدور فرامین تریپ رله‌های حفاظتی (که در شرایط فعلی در دسترس نیست و از اطلاعات رکوردرها استفاده می‌شود)، نصب حفاظت پشتیبان برای ژنراتورهای نیروگاه طوس پیشنهاد می‌شود. استفاده از تجربیات ارائه شده در این مقاله برای کاهش زمان عیب‌یابی، تحلیل و اطمینان از وضعیت ژنراتور برای راه‌اندازی مجدد در نیروگاه طوس (و سایر نیروگاه‌های قدیمی بخاری دارای سیستم حفاظتی مشابه) مفید خواهد بود.

منابع

- [۱] علی ابراهیمی اله آبادی، "تحلیل فنی حفاظتی تریپ واحد سه نیروگاه طوس با شبیه‌سازی در نرم‌افزار DIgSILENT و بررسی لزوم استفاده از حفاظت پشتیبان برای ژنراتورها" دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی حفاظت و اتوماسیون در سیستم در سیستم‌های قدرت، زمستان ۱۳۹۶.
- [۲] محمد طلوع خیامی، سید مجید هاشمی، رضا دولت آبادی، اباذر دهقان‌پور، "تحلیل خروج مولد نیروگاه مشهد و بی‌برقی پست‌های غدیر و رضوی در حادثه شبکه فوق‌توزیع خراسان رضوی"، فصل‌نامه فصل برق، انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران-شاخه خراسان، سال چهارم، شماره هشت، زمستان ۱۳۹۶.
- [۳] میلاد حاجی‌پور، عبدالمجدی دیناروند، "تحلیل روش محاسبه هزینه‌ها تریپ واحدهای بخار نیروگاه شهید رجایی و تأثیر آن بر بهبود بهره‌وری"، یازدهمین همایش ملی کیفیت و بهره‌وری، انجمن مهندسی بهره‌وری صنعت برق ایران، اسفند ۱۳۹۵.
- [۴] نقشه‌ها و اسناد فنی مربوط به سوئیچگیرها، بریکرهای ۶ کیلوولت و ۴۰۰ ولت، الکتروموتورهای ۶ کیلوولت، ترانسفورماتورها و ژنراتورهای نیروگاه طوس (شرکت BBC آلمان)، مرکز اسناد فنی نیروگاه طوس، ۱۹۸۴.
- [۵] بایگانی نتایج تست‌های انجام شده گروه EG.EH.ES1 و EMH در تعمیرات اساسی و نیمه اساسی، مرکز اسناد فنی نیروگاه طوس، ۱۳۹۵-۱۳۹۰.
- [۶] مصطفی ابراهیمی اله آبادی، "دستورالعمل تست‌های ژنراتور، سیستم تحریک و کابین‌های MV"، امور تعمیرات الکتریک نیروگاه طوس، ۱۳۹۰.
- [۷] شرکت مدیریت تولید برق طوس، "گزارش حادثه اف‌دی‌فن دو واحد سه"، شماره ۳۵۳۱/۴۱۵۰۲، خرداد ۱۳۹۶.
- [۸] بایگانی گزارشات عملکرد سالانه نیروگاه طوس، مرکز اسناد فنی و دفتر مهندسی نیروگاه طوس، ۱۳۹۲ لغایت ۱۳۹۶.
- [۹] موسسه ژئوفیزیک مرکز لرزه‌نگاری کشوری، دانشگاه تهران، "گزارش زمین‌لرزه ۶ ریشتری سفیدسنگ خراسان رضوی"، فروردین ۱۳۹۶.
- [۱۰] شرکت مدیریت تولید برق طوس، "گزارش حادثه اینورتر واحد یک"، شماره ۱۱۶۵۷/۴۲۲۰۰، آبان ۱۳۹۶.
- [۱۱] علی ابراهیمی اله آبادی، مهدی نجار، اسماعیل نیازی "تحلیل نقص سیستم چنج‌آور نیروگاه طوس هنگام قطع تغذیه مصرف داخلی با شبیه‌سازی در نرم‌افزار DIgSILENT و ارائه راه‌کار برای رفع آن" سی و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، پژوهشگاه نیرو، 17-F-PSS-1057، پائیز ۱۳۹۶.
- [۱۲] نقشه‌ها و اسناد فنی مربوط به سیستم حفاظتی ژنراتورهای نیروگاه طوس (شرکت BBC آلمان)، شماره JOB NO. 3EC4، مرکز اسناد فنی نیروگاه طوس، ۱۹۸۳.