

## تحلیل فنی حفاظتی تریپ واحد ۳ نیروگاه طوس با شبیه‌سازی در نرم‌افزار DigSILENT و بررسی لزوم استفاده از حفاظت پشتیبان برای ژنراتورها

علی ابراهیمی اله آبادی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس الکترونیک شرکت افق تأمین انرژی طوس، هلدینگ انرژی شرکت شستا، نیروگاه طوس، مشهد

a.ebrahimi@otet.co

### چکیده

ژنراتور از نظر فنی یکی از تجهیزات پیچیده و گران قیمت نیروگاه می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد زیادی از ژنراتورهای نیروگاهی در سراسر دنیا به پایان عمر مفیدشان نزدیک شده‌اند؛ لذا استفاده از سیستم‌های حفاظتی پیشرفته با قابلیت اطمینان و سرعت بالا در جلوگیری از گسترش خرابی، تشخیص عیوب و تحلیل حوادث بسیار مؤثر هستند. در این مقاله ضمن تحلیل حادثه منجر به تریپ واحد ۳ نیروگاه طوس ناشی از اتصال کوتاه کابل افدی فن ۲، به بررسی دلایل تریپ، عملکرد سیستم حفاظتی و لزوم نصب حفاظت پشتیبان برای ژنراتورهای نیروگاه پرداخته شده است.

### کلمات کلیدی

حفاظت دیجیتال پشتیبان، ژنراتور، نیروگاه، دیگسایلنت.

### ۱- مقدمه

تشخیص سیستم حفاظتی سنتی\* گردد که از ایجاد هزینه‌های هنگفت تعمیر ژنراتور و از دست رفتن درآمد آمادگی و تولید برای شرکت مالک جلوگیری می‌کند. در مرجع [۱] به مزیت‌های فراوان استفاده از رله‌های دیجیتال با قابلیت مانیتورینگ شکل موج‌ها و بررسی علت صدور فرامین تریپ و ... اشاره شده است. در مرجع [۲] با توجه به مزیت‌های رله‌های حفاظت مجتمع و نتایج تست‌های انجام شده بر روی سیستم حفاظتی واحدهای گازی آلستوم نیروگاه مشهد، بهینه‌سازی سیستم حفاظتی انجام شده است. در مرجع [۳] نیز با توجه به شناسایی نقاط ضعف سیستم حفاظت الکترونیکی ژنراتور واحدهای بخار نیروگاه سیکل ترکیبی خیام نیشابور و شریعتی مشهد، رله‌های پیشنهادی برای Retrofit سیستم حفاظتی ارائه گردیده که برای واحدهای مشابه از جمله شهید رجایی قزوین، سیکل ترکیبی فارس، خوی و منتظر قائم نیز قابل استفاده است. در این مقاله از دیدگاه حفاظتی به بررسی حادثه رخ داده در واحد ۳ نیروگاه طوس که منجر به خروج واحد و بروز محدودیت در تولید به مدت

در نیروگاه‌های برق مسئله پایداری تولید و حفاظت تجهیزات اصلی (ژنراتور، توربین، ترانسفورماتورها، تجهیزات بویلر و ...) از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا تاکنون مطالعات زیادی در مورد بهینه‌سازی سیستم حفاظتی، بازبینی و تنظیم مجدد رله‌ها برای هماهنگی و ... انجام شده است. 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. اضافه کردن حفاظت دیجیتال مدرن به سیستم حفاظت سنتی، قابلیت رصد کردن عملکرد سیستم سنتی (عدم عملکرد و عملکرد اضافی) را فراهم می‌کند. این موضوع می‌تواند باعث جلوگیری تریپ‌های غیرضروری و یا خارج کردن واحد از مدار تولید در صورت عدم

\* تجربه نشان می‌دهد، حفاظت واحدهایی که بیش از ۲۰ سال از عمر آنها سپری شده است، در تشخیص بعضی از عیوب در شرایط کاری ژنراتور ناتوان بوده و قادر به عملکرد صحیح نمی‌باشند [۱].

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.

## 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 ولت 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.

## ۲-۴- رله اضافه جریان (ITX) الکتروموتورهای ۶kV

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

- 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 را در مقابل اتصال کوتاه داخلی بر عهده دارد. ستینگ حالت اتصال کوتاه برای الکتروموتور FDF روی ۱۹ برابر جریان نامی (۱۹۹×۱۹) 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.

## ۳- بروز نقص و شرح حادثه

در ساعت ۱۴:۳۰ مورخه ۱۳۹۶/۰۱/۱۶ و در بار حداکثر، FDF شماره ۲ با عملکرد رله اضافه جریان از مدار خارج شده و باعث کاهش سریع هوای احتراق بویلر گردیده. در ادامه با ظاهر شدن آلامر سیگما (اختلال در سیستم سوخت و هوا) بویلر و متعاقباً واحد تریپ کرده است [۶]. 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

تقریبی ۱۸ ساعت گردیده، پرداخته شده و ضرورت بهینه‌سازی سیستم‌های حفاظتی برای آنالیز حوادث مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- ژنراتورها، الکتروموتورها و باس‌های ۶kV و حفاظت‌های آنها در نیروگاه طوس

هر کدام از رله‌های حفاظتی در نیروگاه برای هدف معینی نصب گردیده است که 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 ... قرار دارند [۴] و [۵].

## 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. استپ 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، استپ دوم رله عمل کرده و فرمان تریپ ژنراتور را صادر خواهد کرد.

## ۲-۲- رله ارت فالت باس ۶kV مصرف داخلی

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

در ابتدا و 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 این الکتروموتور و ناشی از سوختن الکتروموتور بوده است. شکل ۲ وضعیت بریکر الکتروموتور مذکور را پس از عملکرد و قطع جریان خطا نشان می‌دهد.

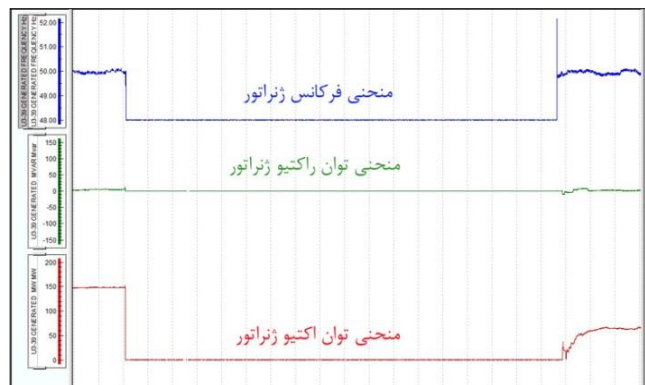
پس از بررسی رله‌های حفاظتی که با عملکرد صحیح و به موقع از گسترش نقص و ایجاد خرابی عمده جلوگیری کرده بودند و همچنین وضعیت بریکر که در اثر قطع جریان خطا دچار پاشش شدید روغن شده بود، عملیات تعمیراتی با باز کردن سرکابل الکتروموتور و انجام تست‌ها عایقی (Megger) ادامه یافت که نتایج نشانی از وجود سوختگی در 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 اتصال در کابل، اتصالات مربوطه از سمت باس  $6kV$  نیز باز گردید. با محرز شدن وجود اتصال 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 ۳ کابل آسیب‌دیده را نشان می‌دهد.



شکل ۳: 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 نویز فراوان همراه بوده و یافتن محل آسیب‌دیده را به تعویق انداخت. شکل ۴ مراحل عیب‌یابی کابل را با دستگاه مذکور را نشان می‌دهد. نهایتاً با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که علت حادثه ناشی بخار یکی 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 (که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است)، املاح زمین و همچنین زلزله‌ای به قدرت ۶ ریشتر که صبح روز حادثه و در ساعت ۱۰:۳۹ حوالی شهر سفیدسنگ در فاصله ۸۶ کیلومتری مشهد را لرزاند [۷] و لرزش آن کاملاً در محل نیروگاه قابل احساس بود از دیگر عواملی هستند که در بروز حادثه بی تأثیر نبوده‌اند.

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 ۱ 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.



شکل ۱: فرکانس، توان اکتیو و راکتیو ژنراتور از قبل از شروع حادثه تا حدود ساعت ۲۰:۰۰



نشستی روغن و وجود سیاهی بر اثر قطع جریان خطا



نشستی روغن شدید



نشستی شدید روغن بریکر



پاشیدن روغن به داخل کابین بریکر

شکل ۲: قطع جریان شدید اتصال کوتاه و پاشش شدید روغن بریکر

در اولین نگاه به نمودار فوق، با توجه به اینکه محدوده مقاومت‌های اندازه‌گیری شده در حد گیگا اهم است، وجود عیب قطعی در هنگام اندازه‌گیری‌ها نقض می‌شود. علت تفاوت نتایج تست‌های انجام شده در واحدهای مختلف ناشی از وابستگی نتایج به عواملی همچون دمای هوا، رطوبت، کالیبره بودن دستگاه و ... است که در تست فرم‌های موجود ثبت نشده است.

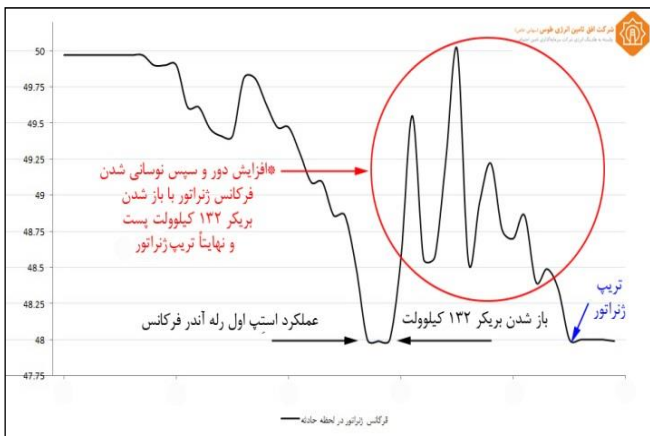
## ۴- تحلیل فنی و حفاظتی شرایط واحد در لحظه حادثه

در این بخش با استفاده از اطلاعات لحظه‌ای رکوردرهای مربوط به توان اکتیو و فرکانس ژنراتور، به تحلیل وضعیت ژنراتور و تریپ آن در لحظه حادثه پرداخته خواهد شد. همان‌طور که اشاره شد، علت اصلی تریپ ژنراتور (نه حادثه کابل) ایجاد شرایط ناپایدار در سیستم سوخت و دوغ هوای بویلر به علت خروج الکتروموتور FDF بوده است. با توجه به توضیحات داده شده، تحلیل فرکانسی ژنراتور و تریپ واحد در شکل ۶ 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 نواسانی شدن فرکانس به صورت لحظه‌ای شده و در ادامه با کاهش دور ژنراتور، استپ دوم رله نیز عمل کرده که منجر به تریپ ژنراتور شده است.



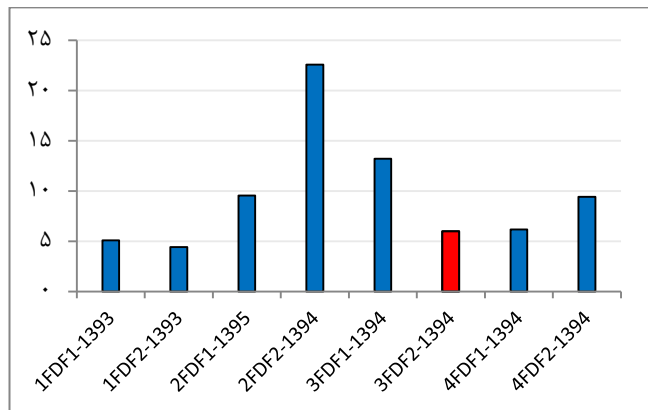
شکل ۴: استفاده از دستگاه عیب‌یاب کابل برای یافتن محل آسیب‌دیده

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 ۶kV 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 ۵ قابل مشاهده است. در این نمودار هر ستون معرف مقدار عددی مقاومت عایقی کابل بر حسب گیگا اهم بوده و به‌عنوان مثال، منظور از 3FDF2-1394 مقدار مقاومت عایقی الکتروموتور FDF شماره دو، واحد سه در سال ۱۳۹۴ است [۸].

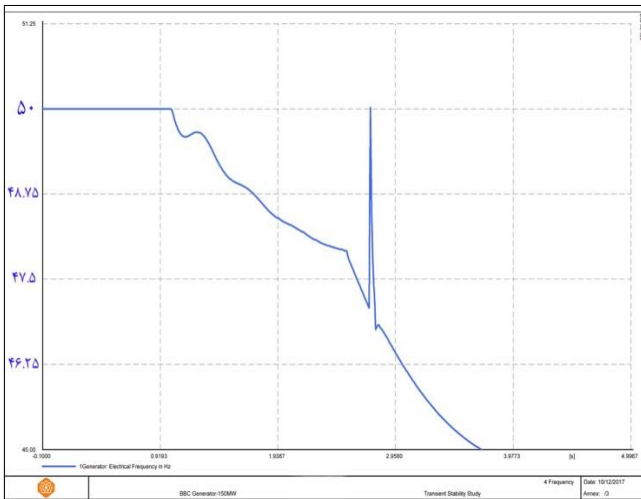


شکل ۶: تحلیل فرکانسی حادثه و تریپ ژنراتور

در شکل ۷ نیز وضعیت توان اکتیو ژنراتور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توان اکتیو ژنراتور با خروج FDF به شدت کاهش پیدا کرده و پس از آن ژنراتور از مدار خارج شده است.

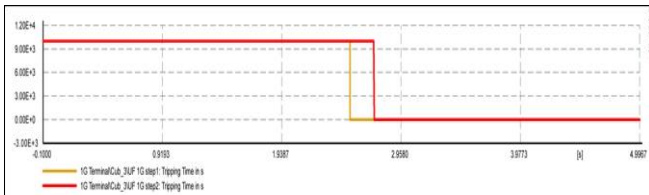


شکل ۵: مقاومت عایقی کابل الکتروموتورهای FDF در ۴ واحد از سال ۹۳



شکل ۹: فرکانس ژنراتور یک واحد با شبیه‌سازی شرایط خطا و عملکرد هر دو استپ رله آندر فرکانس

شکل ۱۰ نیز (زمان) عملکرد رله آندر فرکانس ژنراتور با شبیه‌سازی شرایط خطا در یک واحد، در هر دو استپ را نشان می‌دهد.



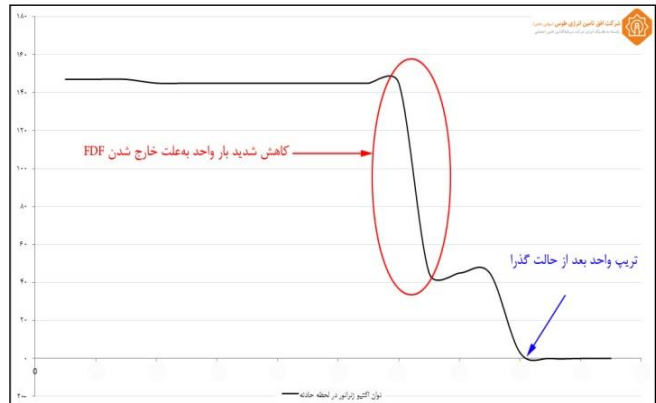
شکل ۱۰: عملکرد رله آندر فرکانس ژنراتور در هر دو استپ

## ۶- لزوم استفاده از حفاظت دیجیتال

### پشتیبان برای مانیتورینگ و آنالیز حوادث

در واحدهای صنعتی قدیمی که دارای امکان مانیتورینگ شکل موج‌های مختلف سیستم در شرایط خطا نیستند، عیب‌یابی سیستم بسیار مشکل و بعضاً غیرممکن می‌شود. رله‌های دیجیتالی جدید با امکان مانیتورینگ تغییرات لحظه‌ای جریان، ولتاژ، فرکانس و ... در لحظه صدور فرامین حفاظتی، امکان تشخیص ترتیب رله‌های عمل کرده و متعاقباً عیب‌یابی و صدور فرمان برق‌دار شدن مجدد یا توقف واحد را با اطمینان بیشتر فراهم می‌کند [۲].

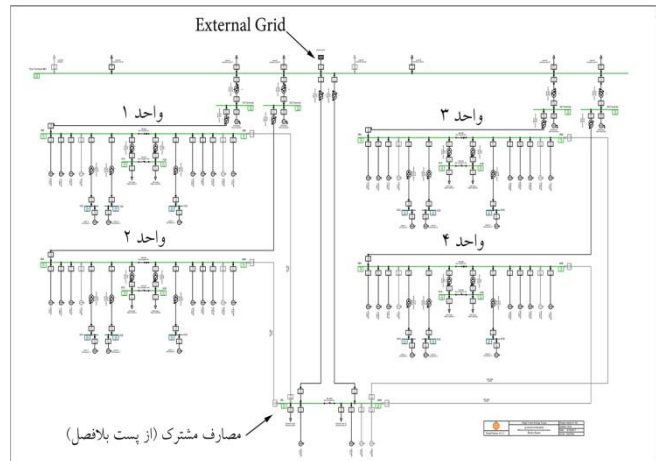
جهت دست‌یابی به قابلیت اطمینان بالاتر سیستم و دریافت اطلاعات کامل‌تر از رله‌ها، استفاده از رله‌های دیجیتالی مجتمع که دارای اکثر توابع استاندارد با قیمت بسیار مناسب‌تر نسبت به رله‌های قدیمی هستند، اجتناب ناپذیر است. در حفاظت دیجیتال امکان تحلیل وقایع و ترتیب عملکرد رله‌های مختلف در حوادث منجر به خروج اضطراری واحد (تریپ)



شکل ۷: توان اکتیو ژنراتور در لحظه حادثه

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله از مدل شبیه‌سازی شده شبکه مصرف داخلی نیروگاه طوس در نرم‌افزار دیگسایلنت استفاده شده است [۹]. این مدل شامل شبیه‌سازی ژنراتورها به همراه گاورنر و AVR مطابق با اطلاعات ارائه شده در [۱۰]، ترانسفورماتورها (و تپ چنجر)، باس‌های ۶kV و ۴۰۰V، برخی از رله‌های حفاظتی مربوط به تجهیزات فوق، الکتروموتورهای ۶kV با مدل دینامیکی بار، الکتروموتورهای کندانسور هوایی و ... می‌باشد. شکل ۸ پخش بار در شبکه مصرف داخلی نیروگاه طوس را نشان می‌دهد.



شکل ۸: نتایج پخش بار شبکه مصرف داخلی نیروگاه طوس [۹]

با توجه به اینکه امکان شبیه‌سازی بویلر و توربین در نرم‌افزار وجود ندارد، برای شبیه‌سازی شرایطی نزدیک به آنچه در واقعیت رخ داده، از تعریف گشتاور مخالف برای ژنراتور یک واحد استفاده شده است. نتایج در شکل ۹ نشان داده شده که شباهت قابل قبولی با آنچه در شکل ۶ نشان داده شده دارد. ذکر این نکته ضروری است که رکورد رله‌های فرکانس در نیروگاه طوس، مقداری کمتر از ۴۸ هرتز را ثبت نمی‌کنند.

### مراجع

- [1] N.H Chau, S.C. Patel, Jonathan D & Gardell, "Upgrading and Enhancing the Generator Protection System by Making Use of Digital Systems," Protective Relay Engineers, Texas A&M University, College Station, Texas, April 6-8, 1998.
- [۲] هاشم مرتضوی، اکبر کاشی الحسینی، محمد تقی قنبری "بهینه‌سازی حفاظت ژنراتورهای قدیمی به کمک رله‌های دیجیتال" هجدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، پژوهشگاه نیرو، شماره 98-F-CAP-296، پائیز ۱۳۸۲، صفحات ۳۳-۴۸.
- [۳] بهروز شوقی مطلق، "بهینه‌سازی رله‌های حفاظت مجتمع ژنراتور (REG\*316) واحدهای بخار نیروگاه شریعتی و خیام نیشابور"، سومین کنفرانس نیروگاه‌های برق، شماره EPGC03\_002، ۱۳۸۹.
- [۴] مرکز اسناد فنی نیروگاه طوس، بایگانی نتایج تست‌های انجام شده گروه ES1، EH و EG در تعمیرات اساسی و نیمه اساسی، ۱۳۹۵ - ۱۳۹۰.
- [۵] مصطفی ابراهیمی اله آبادی، "دستورالعمل تست‌های ژنراتور، سیستم تحریک و کابین‌های MV"، امور تعمیرات الکتریک نیروگاه طوس، ۱۳۹۰.
- [۶] شرکت مدیریت تولید برق طوس، "گزارش حادثه اfdی‌فن دو واحد سه"، شماره ۳۵۳۱/۴۱۵۰۲، خرداد ۱۳۹۶.
- [۷] موسسه ژئوفیزیک مرکز لرزه‌نگاری کشوری، دانشگاه تهران، "گزارش زمین‌لرزه ۶ ریشتری سفیدسنگ خراسان رضوی"، فروردین ۱۳۹۶.
- [۸] مرکز اسناد فنی نیروگاه طوس، بایگانی نتایج تست‌های انجام شده گروه EMH در تعمیرات اساسی و نیمه اساسی، ۱۳۹۵ - ۱۳۹۳.
- [۹] علی ابراهیمی اله آبادی، مهدی نجار، اسماعیل نیازی "تحلیل نقص سیستم پنج‌آور نیروگاه طوس هنگام قطع تغذیه مصرف داخلی با شبیه‌سازی در نرم‌افزار DigSILENT و ارائه راه‌کار برای رفع آن" ۳۲ کنفرانس بین‌المللی برق، پژوهشگاه نیرو، 17-F-PSS-1057، پائیز ۱۳۹۶.
- [۱۰] گزارش‌های مستخرج از پروژه "تعیین پارامترهای دینامیکی یک واحد نیروگاه طوس"، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی بهره‌برداری شبکه، کد پروژه: PONBH01، ۱۳۸۳.
- [11] G. Benmouyal, S. Barceloux, R. Pelletier, "Field Experience with a Digital Relay for Synchronous Generators", IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, CA 1989.

جهت دستیابی به نقاط ضعف سیستم حفاظتی و یا تحلیل خطای موجود در شبکه بسیار کامل‌تر از رله‌های فعلی نیروگاه است [۲]. از مهم‌ترین مشکلات تأمین رله‌های فعلی نیروگاه می‌توان به وابستگی به کارخانه سازنده، عدم موجودی کافی در انبار و از رده تولید خارج شدن برخی آنها اشاره کرد.

دو روش جهت استفاده از سیستم‌های حفاظتی دیجیتال برای نیروگاه‌هایی که به منظور ارتقاء سطح حفاظت ژنراتورها، قصد استفاده از رله‌های دیجیتال را دارند، وجود دارد. در روش اول تمامی سیستم حفاظتی قدیمی با مجموعه‌ای از یک سیستم حفاظت چند کاره تعویض می‌گردد و روش دوم، سیستم حفاظت جدید به مجموعه سیستم حفاظتی قبلی اضافه می‌گردد. در بیشتر مواقع پیشنهاد کارشناسان برای تعویض یک سیستم حفاظتی روش دوم است که ترکیبی از رله‌های حفاظتی چند کاره با سیستم حفاظتی قدیمی است [۱۱].

### ۷- نتیجه‌گیری

با پیشرفت دانش حفاظت و افزایش تجربه سازندگان و بهره‌برداران، سیستم‌های حفاظتی در واحد نیروگاهی جدید دستخوش تغییرات گسترده‌ای شده است. عرضه رله‌های حفاظت مجتمع ژنراتور با امکانات بالا و قیمت پایین‌تر نسبت به مجموعه رله‌های مجزای استاتیکی، این رله‌ها را به انتخاب مناسبی برای بهینه‌سازی حفاظت واحدهای قدیمی تبدیل کرده است. در این مقاله، ضمن تحلیل حادثه منجر به تریپ واحد ۳ نیروگاه طوس ناشی از اتصال کوتاه کابل اfdی‌فن ۲، به بررسی دلایل تریپ، عملکرد سیستم حفاظتی (با توجه به اطلاعات رکورد‌های توان و فرکانس ژنراتور) و شبیه‌سازی عملکرد رله‌ها در نرم‌افزار دیگسایلنت پرداخته شد. همچنین با توجه به اهمیت فراوان مانیتورینگ شکل موج‌ها و بررسی علت صدور فرامین تریپ رله‌های حفاظتی (که در شرایط فعلی در دسترس نیست و از اطلاعات رکورد‌ها برای تحلیل شرایط خطا و عملکرد رله‌ها استفاده می‌شود)، لزوم نصب حفاظت پشتیبان برای ژنراتورهای نیروگاه طوس بررسی گردید. استفاده از تجربیات ارائه شده در این مقاله می‌تواند کمک شایانی به کاهش زمان تعمیرات و عیب‌یابی و همچنین هزینه‌های سنگین توقف واحد در حوادث مشابه نماید.

### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از زحمات و همکاری آقایان مهندسین مصطفی ابراهیمی اله آبادی، اسماعیل نیازی، مرتضی قانع عبادی استاد و محمدرضا پاشایی تقدیر می‌گردد.