

بررسی عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور و باس ۶kV نیروگاه طوس

در یک حادثه واقعی با شبیه‌سازی در نرم‌افزار DIGSILENT

علی ابراهیمی اله آبادی

شرکت افق تأمین انرژی طوس

نیروگاه بخاری طوس

مشهد، ایران

a.ebrahimi@otet.co

از عیوب و شرایط خطا ناتوان بوده و قادر به عملکرد صحیح نیستند [۱]. یکی از راه‌های کاهش زمان خروج‌های اضطراری و محدودیت‌های تولید، بررسی نمودارها و اطلاعات ثبت شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری و حفاظتی در لحظه رخداد حادثه و انجام اقدامات اصلاحی (تعمیراتی، تغییر طرح و یا در صورت نیاز بهینه‌سازی) برای جلوگیری از تکرار حوادث مشابه است [۲]. در [۲] تجربیات مشابهی در بررسی عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور، در تریپ واحد سه نیروگاه طوس ارائه شده و با بررسی اطلاعات رکوردرهای توان و فرکانس ژنراتور، شبیه‌سازی عملکرد رله‌ها در نرم‌افزار دیگسایلنت و بررسی علل صدور فرامین تریپ رله‌های حفاظتی (با استفاده از اطلاعات رکوردرها)، لزوم نصب حفاظت پشتیبان دیجیتالی برای ژنراتورهای نیروگاه طوس بررسی شده است. در [۳] 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 شهریور ۱۳۹۵ پرداخته شده و پیشنهادهایی برای جلوگیری از تکرار حوادث مشابه ارائه شده است.

جرائم ناشی از خروج اضطراری نیروگاه‌ها و هزینه‌های سنگین ناشی از توقف تولید (خصوصاً در نیروگاه‌های خصوصی مانند نیروگاه طوس)، باعث شده تجزیه و تحلیل و ثبت تجربیات در حوادث منجر به تریپ (خصوصاً در نیروگاه‌های قدیمی با سیستم حفاظتی غیر دیجیتالی مانند نیروگاه طوس)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. تفاوت در توپولوژی سیستم حفاظتی

چکیده — بررسی رفتار سیستم‌های حفاظتی مربوط به تجهیزات حساس نیروگاهی (از جمله ژنراتورها، باس‌بارها و ...) هنگام بروز خطا و اطمینان از عملکرد صحیح و قابلیت اطمینان آنها، یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی، خصوصاً در نیروگاه‌های قدیمی (با سیستم حفاظتی قدیمی و غیر دیجیتالی) است. در این مقاله ضمن تحلیل حادثه منجر به تریپ واحد ۳ نیروگاه طوس ناشی از بی‌رق شدن پمپ‌های روغن کنترل توربین، به بررسی دلایل تریپ و شبیه‌سازی شرایط واقعی حادثه و عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور و باس‌های مصرف داخلی واحد (در نرم‌افزار DIGSILENT) پرداخته شده است. نتایج، عملکرد اشتباه یکی از حفاظت‌های باس مصرف داخلی واحد را نشان می‌دهد. استفاده از تجربیات ارائه شده در این مقاله برای کاهش زمان عیب‌یابی در حوادث مشابه و اطمینان از وضعیت سیستم‌های حفاظتی برای راه‌اندازی مجدد واحد در نیروگاه‌های دارای سیستم حفاظتی مشابه مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی — آندر ولتاژ، رله، حفاظت ژنراتور، دیگسایلنت

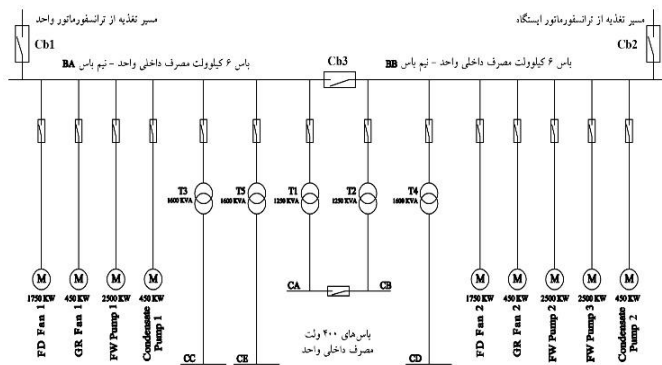
۱. مقدمه

توقف‌های اضطراری نیروگاه‌ها که در زمان نامشخص رخ می‌دهد، پایداری شبکه برق را کاهش می‌دهد. تجربه نشان می‌دهد، سیستم حفاظتی واحدهایی که بیش از ۲۰ سال از عمر آنها سپری شده، در تشخیص بعضی

به دلیل اهمیت بالای ژنراتور و برای اطمینان از موتوری نشدن ژنراتور، دو دستگاه رله برگشت بار که به صورت پشتیبان هم عمل می‌کنند، در نظر گرفته شده است. در صورتی که 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 فرمان‌های تریپ صادر خواهد شد. حالت سومی هم پیش‌بینی شده که چنانچه توان تولیدی حالت نوسانی داشته و کم و زیاد شود، کارت جمع‌کننده‌ای به نام انتگرال‌گیر وارد مدار شده و با جمع کردن سطح زیر منحنی‌های نوسانات، بعد از حدود ۱۰ نوسان، فرمان‌های تریپ را صادر خواهد کرد [۷].

۲.۲. رله Under Voltage باس مصرف داخلی 6kV

دیاگرام تک‌خطی باس ۶kV یک واحد نیروگاه در «شکل ۱» نشان داده شده که شامل باس‌ها و الکتروموتورهای ۶kV، مسیرهای تغذیه باس‌ها، بریکرها و ترانسفورماتورهای مصرف داخلی کمکی می‌باشد [۴].



شکل ۱: دیاگرام تک‌خطی مصرف داخلی ۶ کیلوولت نیروگاه طوس [۴]

این رله حفاظت باس ۶kV (اصطلاحاً BA-BB) و مصرف‌کننده‌های آن را در مقابل افت ولتاژ بر عهده دارد. نمونه ولتاژ مورد نیاز رله از ترانسفورماتورهای ولتاژ نصب شده روی باس ۶kV با نسبت تبدیل 6kV:100V تغذیه می‌شود. در صورتی که ولتاژ باس به کمتر از مقدار تنظیم

گسترده‌گی 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 و تحلیل رفتار سیستم‌های حفاظتی نیروگاه در حوادث منجر به تریپ را نشان می‌دهد.

در این مقاله از دیدگاه حفاظتی به بررسی حادثه رخ داده در واحد ۳ نیروگاه طوس (مورخ ۱۳۹۷/۰۹/۲۶) که منجر به خروج واحد و بروز محدودیت در تولید به مدت تقریبی ۵ ساعت گردیده، پرداخته شده و با شبیه‌سازی شرایط خطا در نرم‌افزار DigSILENT عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور و باس‌های مصرف داخلی ۶kV، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج، عملکرد صحیح سیستم حفاظتی ژنراتور و عملکرد کاذب رله ولتاژی باس مصرف داخلی (و یک نقص عملیاتی که منجر به تریپ واحد شده است) را نشان می‌دهد. در ادامه پس از توضیحاتی در مورد سیستم‌های حفاظتی مرتبط با حادثه، به بررسی شرایط تریپ (با استفاده از نمودارهای مستخرج از رکوردرها و شبیه‌سازی شرایط خطا)، پرداخته خواهد شد.

۲. سیستم حفاظتی ژنراتور و باس ۶kV

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
۱۵۰MW	۱۱٫۵ kV	۹۴۱۳A	۵۰Hz	٪ ۹۸٫۵	۰٫۸

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 باس‌های مصرف داخلی ۶kV و ۴۰۰V در نیروگاه طوس که با موضوع مورد بحث مرتبط است، به اختصار معرفی می‌گردد. ذکر این نکته ضرورت دارد که با توجه به مقایسه نتایج تست‌های انجام شده رله‌های ژنراتور 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].

۲.۱. رله برگشت بار ژنراتور

رله برگشت بار یک رله سنجش توان است که برای جلوگیری از حالت موتوری شدن ژنراتور و در واقع برای حفاظت از توربین استفاده شده است.

توضیحات	قابلیت تولید	نشان عملی	سوخت مانع	علت وضعیت	نوع وضعیت	تجهیز	ساعت شروع	تاریخ شروع
	140.0	140.0	X		نرمال در مدار 50	707-U:53	10:57	1397/09/24
	75.1	140.0	X	...محدودیت	مشکل شبکه - منطقه م-LG3	707-U:53	16:57	1397/09/25
	140.0	140.0	X		نرمال در مدار 50	707-U:53	10:55	1397/09/26
	0.0	140.0	X	بهبود	خروج اضطراری 40	707-U:53	14:21	1397/09/26
	140.0	140.0	X		نرمال در مدار 50	707-U:53	17:52	1397/09/26

شکل ۳: وضعیت کدهای اختصاص یافته به واحد در روز حادثه [۸]



شکل ۴: نمودارهای مربوط به سیگنال‌های الکتریکی واحد سه از لحظه تریپ تا راه‌اندازی و پایداری مجدد (ضمیمه یک)

۳.۱. شرح وقایع بهره‌برداری مربوط به روز حادثه

در نیروگاه طوس در حالت عادی دو دستگاه پمپ آب تغذیه (FWP) در مدار قرار دارد و پمپ سوم به‌عنوان رزرو خواهد بود؛ برنامه منظمی در نیروگاه برای بهره‌برداری چرخشی (Change Over) پمپ‌های آب تغذیه وجود دارد. این عملیات هر ۲ ماه یکبار انجام می‌شود. رویه عملیات مذکور به این صورت است که ابتدا پمپ سوم (یعنی FWP خاموش و نه الزاماً FWP شماره ۳) روشن می‌شود؛ پس از ۵ تا ۱۰ دقیقه بهره‌برداری آزمایشی و پایدار شدن شرایط، یکی از پمپ‌های اول و دوم (طبق برنامه‌ی دستی تنظیم شده در امور بهره‌برداری) خاموش می‌شود.

در حادثه مذکور، پس از انجام عملیات Change، رله Under Voltage باس مصرف‌ داخلی ۴۰۰ ولت واحد عمل کرده و با بی‌برق شدن پمپ‌های کنترل روغن توربین، توربین تریپ کرده است. لازم به ذکر است بعد از تریپ توربین، ژنراتور با عملکرد رله برگشت بار از مدار خارج شده است.

در هر واحد نیروگاه طوس دو دستگاه پمپ کنترل روغن توربین وجود دارد که یک دستگاه در مدار و در صورت نقص، پمپ دیگر وارد مدار می‌شود. تست عملکرد سیستم ۲ از ۱ پمپ‌های کنترل روغن توربین پس از پایان تعمیرات بر روی پمپ‌ها و قبل از راه‌اندازی واحد انجام می‌شود تا در صورت وجود نقص، نسبت به رفع آن اقدام گردد. در روز حادثه مذکور با از مدار خارج شدن یک نیم‌باس مصرف‌ داخلی ۴۰۰V (CA-CB) ناشی از

شده (0.85pu) روی رله برسد، بعد از چهار ثانیه فرمان قطع به بریکر تغذیه کلیه مصرف کننده‌های در حال کار روی باس صادر و آنها را از مدار خارج خواهد کرد. چنانچه زمان افت ولتاژ کمتر از ۴ ثانیه باشد و سطح ولتاژ قبل از آن به حالت عادی برگردد، رله خروجی نداشته و اتفاقی نخواهد افتاد [۴].

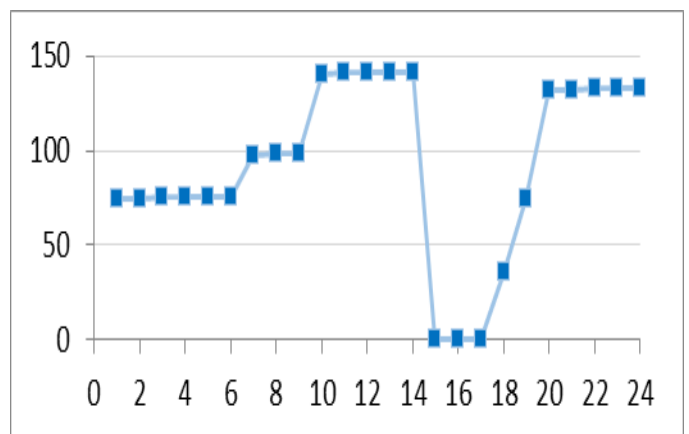
۲.۳. رله Under Voltage باس مصرف داخلی

400V

این رله حفاظت باس مصرف داخلی ۴۰۰ ولت (اصطلاحاً CA-CB) و مصرف کننده‌های آن را در مقابل افت ولتاژ بر عهده دارد. در اثر کاهش سطح ولتاژ (0.80pu) یا بی‌برق شدن باس ۶kV مصرف داخلی BA-BB که ولتاژ تغذیه این باس را فراهم می‌کند) یا قطع ولتاژ تغذیه باس ۴۰۰ ولت مصرف داخلی (CA-CB)، رله بعد از یک ثانیه فرمان باز شدن بریکر ورودی به باس را صادر و متعاقباً واحد با عملکرد حفاظت Under Voltage تریپ می‌کند. چنانچه زمان افت ولتاژ کمتر از یک ثانیه بوده و سطح ولتاژ قبل از آن به حالت عادی برگردد، رله خروجی نداشته و اتفاقی نخواهد افتاد [۴].

۳. شرح حادثه

در ساعت ۱۴:۱۰ مورخه ۱۳۹۷/۰۹/۲۶ واحد سه نیروگاه با عملکرد حفاظت آندر ولتاژ باس مصرف داخلی ۴۰۰ ولت، از مدار خارج و منجر به بروز محدودیت در تولید به مدت (تقریبی) پنج ساعت گردید. «شکل ۲» نمودار توان تولیدی ژنراتور را در روز حادثه نشان می‌دهد. در «شکل ۳» وضعیت کدهای اختصاص یافته به واحد در روز حادثه و در «شکل ۴» نیز نمودارهای مربوط به سیگنال‌های الکتریکی واحد از لحظه تریپ تا راه‌اندازی و پایداری مجدد نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار توان تولیدی ژنراتور در روز حادثه

کیلوولت به صورت خودکار جبران نشده است. در ادامه بررسی خواهد شد که آیا این کاهش ولتاژ منجر به پیک‌آپ رله‌های ولتاژی می‌شود یا خیر.

یکی از مواردی که تحلیل حوادث در نیروگاه‌های قدیمی را دشوار می‌سازد، عدم وجود سیستم‌های DCS و ثبت دیتای دیجیتالی است. یعنی در شرایط عادی امکان تریپ کردن ولتاژ باس مصرف‌ داخلی 6kV وجود ندارد. در نیروگاه طوس رله اضافه جریان، اتصال کوتاه، اضافه بار و عدم تعادل بار) را بر عهده دارد. با توجه به سابقه بروز نقص و عملکرد کاذب این رله در الکتروموتورهای 6kV فن دمنده هوای بویلر (FD.Fan)، به تدریج (از سال ۱۳۹۱ تاکنون) رله ITX الکتروموتورهای مذکور با رله دیجیتالی مجتمع (SYMAP) تعویض گردید. اگر سطح ولتاژ باس مصرف‌ داخلی 6kV به حد تنظیم شده رله Under Voltage باس برسد، رله دیجیتالی نصب شده روی اف‌دی‌فن‌ها (SYMAP) اطلاعات لحظه رخداد را ذخیره می‌کند. نکته جالب در این است که در حادثه مورد بررسی، رله مذکور اطلاعاتی را ثبت نکرده؛ به عبارت دیگر این رله شرایط ولتاژی باس مصرف‌ داخلی 6kV را عادی تشخیص داده است.

۴. 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 6kV و 400V، برخی از رله‌های حفاظتی مربوط به تجهیزات فوق، الکتروموتورهای 6kV با مدل دینامیکی بار، الکتروموتورهای کندانسور هوایی و ... می‌باشد. «شکل ۶» وضعیت پخش بار در شبکه مصرف‌ داخلی نیروگاه طوس را نشان می‌دهد. «شکل ۷» و «شکل ۸» نیز بعضی از دستگاه‌های اندازه‌گیری و رله‌های تعریف شده برای تجهیزات مذکور در واحد یک را نشان می‌دهد [۹].

با توجه به توضیحات فوق، برای بررسی وضعیت ولتاژی باس‌های مصرف‌ داخلی (6kV و 400V) در شرایط اضافه شدن پمپ آب تغذیه سوم، شبیه‌سازی شرایط در بار ۱۴۰ مگاوات (مشابه شرایط واقعی رخ‌دار حادثه) در شرایطی که سیستم AVR در وضعیت Out of Service قرار دارد، انجام شد. نتایج عدم پیک‌آپ رله‌های Under Voltage باس‌های مصرف‌ داخلی را نشان می‌دهد؛ ولتاژ باس‌های تحت تست در «شکل ۹» قابل مشاهده است.

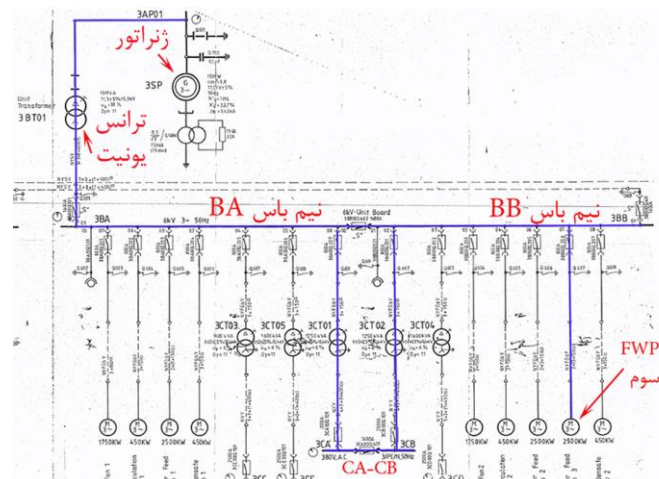
عملکرد رله Under Voltage، بایستی Change خودکار پمپ کنترل روغن دوم انجام می‌شده؛ لکن با عدم استارت پمپ رزرو، واحد تریپ کرده است.

تا این قسمت، یکی از دلایل بروز حادثه که استارت نشدن خودکار پمپ کنترل روغن توربین رزرو بوده (و یک نقص عملکردی محسوب می‌شود)، آشکار می‌گردد. از دلایل این اتفاق می‌توان به نقص گذرا در کارت‌های الکترونیکی و اهمی شدن کنتاکت‌های مدار فرمان و اشاره داشت. در ادامه دلیل عملکرد رله Under Voltage باس مصرف‌ داخلی 400 ولت واحد طی انجام عملیات بهره‌برداری چرخشی (Change Over) پمپ‌های آب تغذیه (FWP) که یک فعالیت روتین بهره‌برداری محسوب می‌شود؛ بررسی خواهد شد.

۳.۲. بررسی عملکرد رله Under Voltage باس

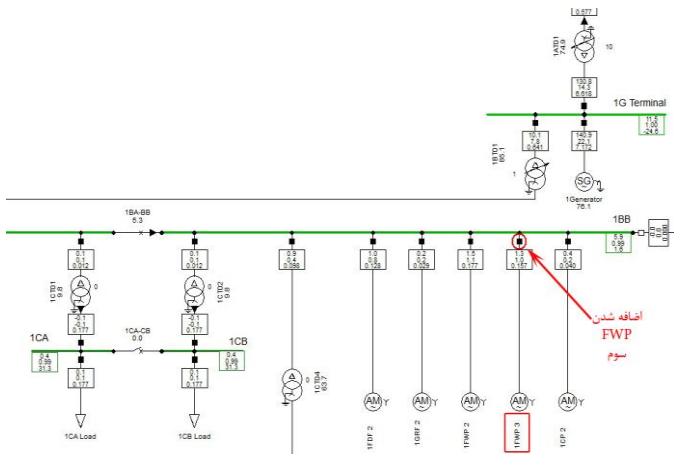
مصرف‌ داخلی 400 ولت

قطعاً هنگامی که پمپ آب تغذیه سوم وارد مدار می‌شود، کاهش ولتاژ (Under Voltage) روی باس مصرف‌ داخلی 6 کیلوولت (BA-BB) خواهیم داشت (مسیر بنفش رنگ در شکل ۵).

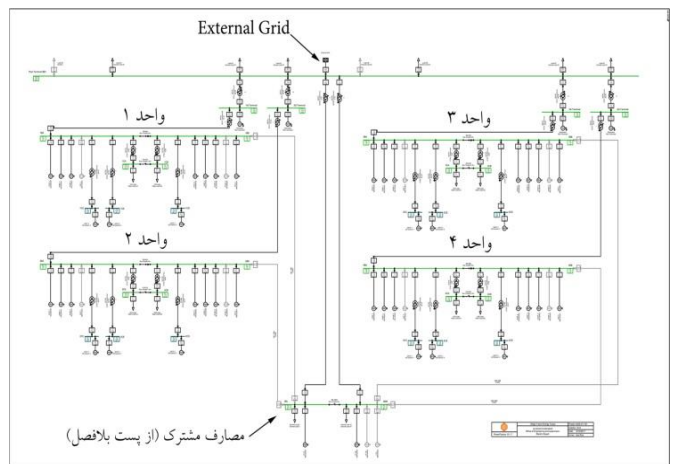


شکل ۵: مسیر تغذیه باس‌های مصرف‌ داخلی و پمپ آب تغذیه سوم

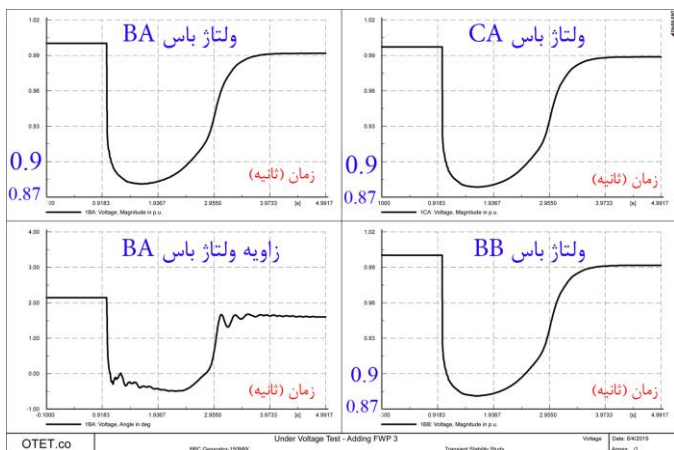
این کاهش ولتاژ بایستی به وسیله سیستم خودکار کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور (Automatic Voltage Regulation) جبران شود. در روز حادثه سیستم AVR ژنراتور واحد سه به علت وجود نقص (در کارت‌های الکترونیکی) از حالت بهره‌برداری خودکار به حالت دستی تغییر وضعیت داشته؛ لذا جبران خودکار ولتاژ در شرایط اضافه شدن پمپ آب تغذیه سوم انجام نشده است. در واقع ولتاژ ژنراتور و به تبع آن افت ولتاژ ترانس مصرف‌ داخلی (Unit Transformer) و سپس باس‌های مصرف‌ داخلی 6



شکل ۹-ب: اضافه شدن پمپ آب تغذیه سوم



شکل ۶: نتایج پخش بار شبکه مصرف داخلی نیروگاه طوس [۹] - ضمیمه ۲



شکل ۹-ج: وضعیت ولتاژ باس‌های مصرف داخلی پس از اضافه شدن پمپ آب تغذیه سوم در بار ۱۴۰ مگاوات در شرایطی که سیستم AVR ژنراتور در وضعیت Out of Service قرار دارد (مشابه شرایط واقعی رخ‌دار حادثه)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاهش ولتاژ از نظر اندازه و زمان به مقدار تنظیم شده رله‌های ولتاژی باس مصرف داخلی ۶kV (۰.۸۵pu) چهار ثانیه) و ۴۰۰V (یک ثانیه) ۰.۸۰pu) نمی‌رسد. عدم عملکرد رله‌های ولتاژی باس‌های مصرف داخلی در «شکل ۱۰» نشان داده شده است.

با توجه به توضیحات فوق و بررسی مستندات مربوط به تست رله Under Voltage باس مصرف داخلی ۴۰۰V (CA-CB) در امور تعمیرات الکتریک نیروگاه، عملکرد رله مذکور کاذب/ اشتباه بوده است. علت عملکرد اشتباه رله نیز خارج از رنج شدن (و بهم خوردن تنظیمات رله) بوده است. لذا با توجه به نقص و عملکرد اشتباه رله، حتی اگر سیستم AVR ژنراتور در مدار قرار داشت^۱، باز هم امکان تریپ واحد وجود داشته است.

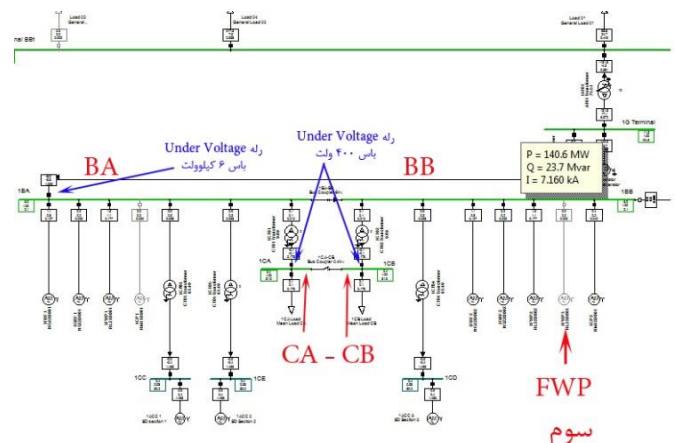
^۱ منظور عملکرد خودکار سیستم تحریک (AVR) و نه بهره‌برداری در حالت دستی

Name	Type	حفاظت‌های شبیه‌سازی شده برای ژنراتور
OC G1	Over Current G1	<input type="checkbox"/> رله اضافه جریان ژنراتور
Reverse Power G1	RP PPX 105B K311	<input type="checkbox"/> رله برگشت بار (جهتی)
UF 1G step1	UF FCX103 step1 G1	<input type="checkbox"/> رله آندر فرکانس (استپ یک)
UF 1G step2	UF FCX103 step2 G1	<input type="checkbox"/> رله آندر فرکانس (استپ دو)
CT G1	CT Gne1	<input type="checkbox"/> ترانسفورماتور جریان
Switch		
PT G1	PT Gen1	<input type="checkbox"/> ترانسفورماتور ولتاژ
Name	Type	حفاظت‌های شبیه‌سازی شده برای ترانس یونیت
OC 1BT	OC 1BT01	<input type="checkbox"/> رله اضافه جریان ترانسفورماتور یونیت (سمت LV)
UV 1BA	UV 1BA XT 374	<input type="checkbox"/> رله آندر ولتاژ باس ۶ کیلوولت
CT 1BT	CT 1BT01	<input type="checkbox"/> ترانسفورماتور جریان
Switch		
PT 1BA	PT 1BA	<input type="checkbox"/> ترانسفورماتور ولتاژ

شکل ۷: حفاظت‌های ژنراتور، ترانسفورماتور یونیت و باس ۶ کیلوولت

- UF FCX103 step1 G1
- UF FCX103 step2 G1
- UF FCX103 step1 G2
- UF FCX103 step2 G2
- UF FCX103 step1 G3
- UF FCX103 step2 G3
- UF FCX103 step1 G4
- UF FCX103 step2 G4
- UV 1BA XT 374
- UV 3BA XT 374
- UV 2BA XT 374
- UV 4BA XT 374
- F20 1CA Bus
- F20 3CA Bus
- F20 1CB Bus
- F20 3CB Bus
- F20 2CA Bus
- F20 4CA Bus
- F20 2CB Bus
- F20 4CB Bus

شکل ۸: حفاظت‌های ولتاژی باس‌ها و حفاظت فرکانسی ژنراتور



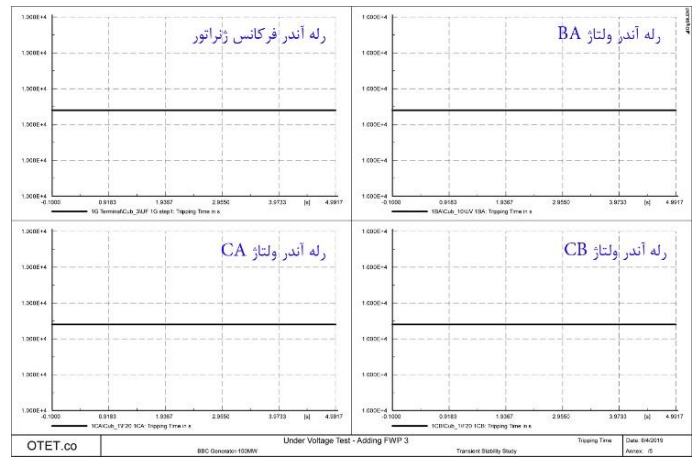
شکل ۹-الف: وضعیت پخش بار قبل از شروع شبیه‌سازی حادثه

قدردانی

بدین‌وسیله از زحمات و همکاری آقایان مهندسین محمدرضا زاهد، مصطفی ابراهیمی اله آبادی و اسماعیل نیازی تقدیر می‌گردد.

منابع

- [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] 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.
- [۳] 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 مهندسين برق و الکترونیک ایران- شاخه خراسان، سال چهارم، شماره هشت، زمستان ۱۳۹۶.
- [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 ES1, EG, EMH و در تعمیرات اساسی و نیمه اساسی، مرکز اسناد فنی نیروگاه طوس، ۱۳۹۵.
- [۶] مصطفی ابراهیمی اله آبادی، "دستورالعمل تست‌های ژنراتور، سیستم تحریک و کابین‌های MV"، امور تعمیرات الکتریک نیروگاه طوس، ۱۳۹۰.
- [۷] نقشه‌ها و اسناد فنی مربوط به سیستم حفاظتی ژنراتورها (شرکت BBC آلمان)، شماره JOB NO. 3EC4، مرکز اسناد فنی نیروگاه طوس، ۱۹۸۳.
- [۸] اطلاعات روزانه استخراج شده از سامانه اطلاعات دیسپاچینگ ملی ایران (SCCIS)، ۱۳۹۷/۰۹/۲۷.
- [۹] علی ابراهیمی اله آبادی، مهدی نجار، اسماعیل نیازی "تحلیل نقص سیستم چنج‌آور نیروگاه طوس هنگام قطع تغذیه مصرف‌داخلی 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.



شکل ۱۰: عدم عملکرد رله‌های ولتاژی باس‌های مصرف‌داخلی

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل حادثه منجر به تریپ واحد ۳ نیروگاه طوس که منجر به خروج واحد و بروز محدودیت در تولید به مدت تقریبی ۵ ساعت گردید، پرداخته شد و با شبیه‌سازی شرایط خطا در نرم‌افزار DiGSILENT عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور و باس‌های مصرف‌داخلی ۶kV و ۴۰۰V، مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به قدیمی بودن رله‌های ژنراتورها و عدم وجود رله‌های دیجیتال پشتیبان، برای تحلیل و بررسی شرایط رخداد حادثه از اطلاعات رکوردرهای توان، فرکانس، جریان و ولتاژ ژنراتور و اطلاعات رله دیجیتال مجتمع الکتروموتور ۶kV فن دمنده هوای بویلر (رله SYMAP) استفاده شد. شبیه‌سازی مجموعه عملیات بهره‌برداری انجام شده در روز حادثه و وضعیت ولتاژی باس‌های مصرف‌داخلی (۶kV و ۴۰۰V) در بار ۱۴۰ مگاوات در شرایطی که سیستم AVR ژنراتور در وضعیت Out of Service قرار گرفته بود (مشابه شرایط واقعی رخداد حادثه)، انجام شد.

در مجموع با توجه به بررسی مجموعه فعالیت‌های انجام شده امور بهره‌برداری و تعمیرات نیروگاه در روز حادثه و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، عملکرد صحیح سیستم حفاظتی ژنراتور، نقص و عملکرد اشتباه رله ولتاژی باس مصرف‌داخلی (و نقص در فرایند Change پمپ‌های روغن کنترل توربین که منجر به بی‌برقی شدن پمپ‌ها و تریپ واحد شده است) اثبات و مقرر گردید رله مذکور در اولین تعمیرات برنامه‌ریزی شده پیش‌رو، تعویض گردد. استفاده از تجربیات ارائه شده در این مقاله برای کاهش زمان عیب‌یابی در حوادث مشابه و اطمینان از وضعیت سیستم‌های حفاظتی برای راه‌اندازی مجدد واحد در نیروگاه طوس (و نیروگاه‌های دارای سیستم حفاظتی مشابه) مفید خواهد بود.

