



## تحلیل خروج مولد نیروگاه مشهد و بی‌برقی پست‌های غدیر و رضوی در حادثه شبکه فوق توزیع خراسان رضوی

**کلمات کلیدی:** افت ولتاژ، پایداری گذرا، سیستم تحریک، سیستم قدرت

منصور قربانزاده / شرکت برق منطقه‌ای خراسان /  
Mansour\_Ghorbanzadeh64@yahoo.com

محمد طلوع خیامی / شرکت برق منطقه‌ای خراسان

سیدمجید هاشمی / شرکت برق منطقه‌ای خراسان

رضا دولت آبادی / شرکت برق منطقه‌ای خراسان

اباذر دهقانپور / شرکت مدیریت تولید برق مشهد

### ۱- مقدمه

امروزه با گسترش روزافزون سیستم‌های قدرت و لزوم بهره‌برداری از آن‌ها در نقاط نزدیک به حدود پایداری‌شان به‌خاطر مسائل اقتصادی، حفظ امنیت سیستم‌های قدرت به مساله‌ای بسیار مهم تبدیل شده است. پایداری سیستم قدرت طبق تعریف عبارت است از توانایی سیستم قدرت در باقی ماندن در حالت سنکرون در شرایط عملکرد عادی سیستم و به‌دست آوردن نقطه کار تعادل جدید پس از حادث شدن اغتشاش در آن [۱ و ۲]. در مطالعات امنیت دینامیکی سیستم، مطالعات پایداری سیستم به‌خصوص پایداری گذرا از اهمیت خاصی برخوردار است. به‌طور کلی پایداری گذرا یعنی قابلیت سیستم قدرت در حفظ حالت سنکرونیزم بین ژنراتورهای شبکه، آنگاه که تحت تاثیر یک اختلال گذرای شدید از قبیل بروز یک خطا بر روی تجهیزات خط انتقال، فقدان تولید و یا از دست دادن یک بار بزرگ قرار گیرد. پاسخ سیستم به چنین اختلالاتی، تغییرات بزرگ زوایای روتور ژنراتور، پخش بار قدرت، ولتاژهای شین و دیگر متغیرهای سیستم را درگیر می‌کند. اگر نتیجه تفکیک زاویه‌ای بین ماشین‌ها در سیستم در داخل ناحیه خاصی قرار گیرد، سیستم سنکرونیزم خود را حفظ می‌کند. در صورتی که اگر از دست دادن سنکرونیزم به‌دلیل ناپایداری گذرا به‌وجود آید به‌طور معمول در عرض دو تا سه ثانیه اختلال اولیه مشهود خواهد بود. در ناپایداری گذرا نوسانات الکترومکانیکی مشاهده می‌شود. نوسانات الکترومکانیکی در بسیاری از سیستم‌های قدرت در تمام دنیا وجود دارند. این نوسانات ممکن است برای یک ژنراتور یا

### چکیده

تحلیل حوادث سیستم قدرت درس آموخته‌های ارزشمندی را جهت شناسایی نقاط ضعف شبکه و انجام اقدامات اصلاحی فراهم می‌کند. در این مقاله به بررسی خروج واحد «اشکودا یک» نیروگاه مشهد و بی‌برقی پست‌های شعاعی غدیر و رضوی در حادثه شبکه فوق توزیع خراسان رضوی در شهریورماه ۱۳۹۵ پرداخته می‌شود. در حادثه‌ی بالا واحد نامبرده با عملکرد حفاظت‌های اتصال کوتاه و کاهش ولتاژ باس‌بارهای مصرف داخلی از مدار خارج شده و پست‌های غدیر و رضوی نیز بی‌برق شدند. به دلیل عدم وجود ثبات‌های با نرخ نمونه‌برداری بالا و هم‌زمان با ثبات خطای پست مشهد، بررسی حادثه و توالی اتفاقات مشکل شده و از این‌رو منحنی پارامترهای رله‌ی حفاظتی خط و ژنراتور به‌طور جداگانه بررسی شدند. تحلیل‌ها نشان داد پس از عدم پاکسازی خط و گسترش حادثه اولیه، وجود نقص در واحد نیروگاهی، ساختار و معماری نادرست شبکه منجر به گسترش خاموشی به دو پست فوق شده است. تحلیل دقیق حوادث از طریق ایجاد کارگروه‌های فعال با حضور متخصصان بخش تولید و انتقال، برنامه‌ریزی دقیق و تحلیل هزینه - فایده جهت رفع نقاط ضعف و ایجاد هماهنگی و یکپارچگی در انجام اقدامات اصلاحی به‌خصوص با توجه به واگذاری نیروگاه‌ها به بخش خصوصی، لازمه تأمین «برق مطمئن و اقتصادی» است.

یک نیروگاه، محلی باشند (نوسانات محلی<sup>۱</sup>) یا ممکن است تعدادی ژنراتور را که به لحاظ جغرافیایی به طور گسترده از یکدیگر فاصله دارند، درگیر کند (نوسانات داخل ناحیه‌ای<sup>۲</sup>) [۱ و ۳].

از جمله روش‌های مورد استفاده جهت بهبود پایداری گذرا عبارتند از [۲]:  
- رفع سریع خطای شبکه با به‌کارگیری سیستم‌های حفاظتی و مدارشکن‌های سریع؛

- به‌کارگیری رله‌های وصل دوباره؛

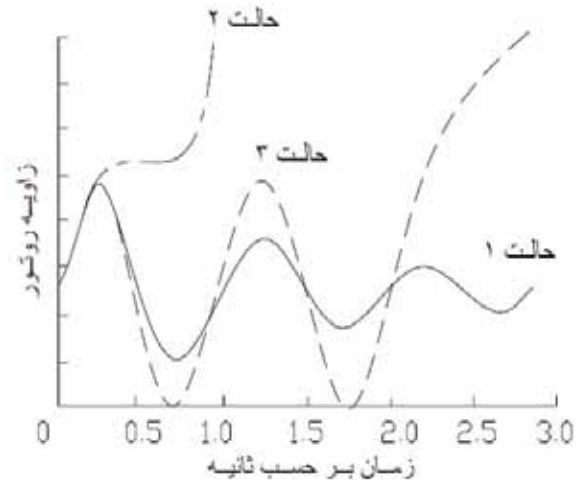
- به‌کارگیری کلیدها و دژنکتورهای تک قطبی که فقط فاز معیوب را قطع کنند؛

- استفاده از ماشین‌ها و ژنراتورهایی با اینرسی بالا و راکتانس کم؛  
- سیستم‌های تحریک با پاسخ سریع و ضریب بهره بالا از نوع تریستوری؛

- استفاده از شیرهای سریع (Fast Valving) در نیروگاه‌ها؛

- به‌کارگیری ترمزهای مقاومتی در نیروگاه‌ها) و ...

شکل (۱) عکس‌العمل زاویه روتور را برای یک حالت پایدار و دو حالت ناپایدار نشان می‌دهد. در حالت پایدار (حالت ۱) زاویه روتور ابتدا افزایش یافته، به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس کاهش یافته و با دامنه در حال کاهش به صورت نوسانی در می‌آید تا اینکه به حالت ماندگار می‌رسد. در حالت ۲، زاویه روتور به‌طور پیوسته و یکنواخت افزایش می‌یابد تا اینکه حالت سنکرون از دست برود. در حالت ۳، سیستم ابتدا در نخستین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنه نوسان‌ها به تدریج ناپایدار می‌شود. این شکل ناپایداری به‌طور کلی زمانی اتفاق می‌افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه «سیگنال کوچک» ناپایدار است و لزوماً به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی‌افتد [۴].



شکل ۱: پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا

ولتاژ - و از این رو جریان تحریک - و تنظیم آن منطبق با توانایی‌های لحظه‌ای کوتاه مدت ژنراتور، در مقابل اغتشاش‌های گذرا عکس‌العمل نشان دهد. از دیدگاه سیستم قدرت، باید سیستم تحریک به کنترل موثر ولتاژ و تقویت پایداری شبکه کمک نماید. این سیستم باید قادر باشد به‌منظور تقویت پایداری گذرا به سرعت به اغتشاش پاسخ دهد و به‌منظور تقویت پایداری سیگنال کوچک، به تحریک ژنراتور سیگنال مناسب را اعمال نماید.

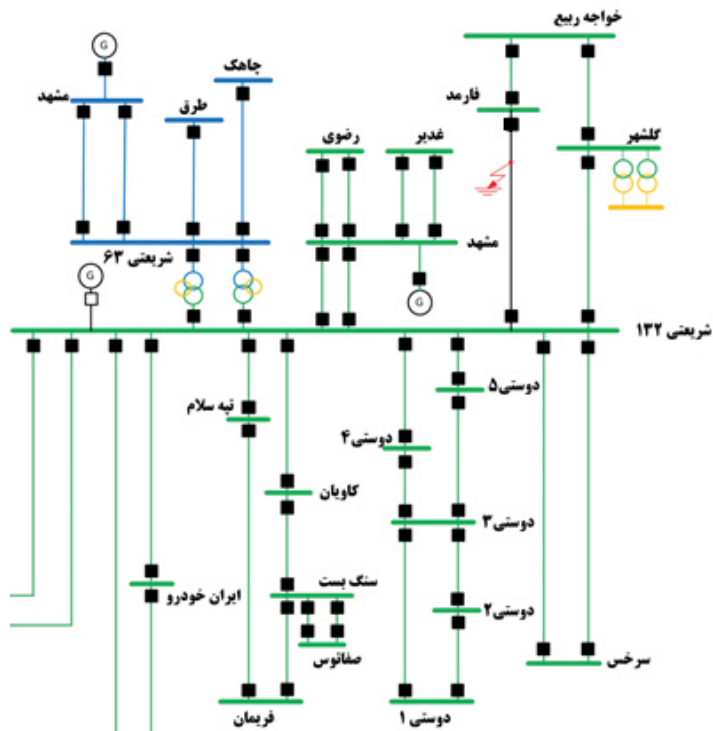
در ادامه مقاله به بررسی تاثیر متقابل میان حادثه‌ای که در شبکه فوق توزیع استان خراسان رضوی در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۰۴ رخ داد و واحد «اشکودا یک» نیروگاه مشهد که در این اغتشاش از مدار خارج شد پرداخته شده است. در این حادثه همچنین دو پست غدیر و رضوی که به‌صورت شعاعی توسط پست ۱۳۲ kV مشهد تغذیه می‌شدند بی‌برق شدند. دو سناریو جهت توالی اتفاقات وجود داشت: نخست اینکه خطوط متصل به پست ۱۳۲ kV مشهد، به دلیل افت شدید ولتاژ، با حفاظت از مدار خارج شده‌اند و پس از آن واحد «اشکودا» به دلیل رد بار گسترده از مدار خارج شده است. دوم اینکه ابتدا واحد «اشکودا» از مدار خارج شده و سپس با عدم تعادل تولید و مصرف و افت ولتاژ باس بارها، خطوط بیان‌شده باز شده‌اند. ابتدا شرح کوتاهی از حادثه بیان شده و سپس سعی می‌شود با بررسی شکل موج‌ها و مطالعه منحنی‌های پارامترهای واحد و پست، مشخص شود آیا مولد مزبور آن چنان که باید به اتصالی مزبور پاسخ داده و به حفظ پایداری شبکه کمک نموده و یا دامنه اغتشاش به حدی بوده که فراتر از توانایی سیستم تحریک و گاورنر واحد بوده و از این رو تریپ آن اجتناب‌ناپذیر بوده است. شایان ذکر است به دلیل قدمت واحد «اشکودا»، ثبات‌هایی با نرخ نمونه‌برداری بالا در سیستم مانیتورینگ وجود ندارند و ثبات‌های نصب شده با نرخ نمونه‌برداری پایین و غیرهم‌زمان با ثبات خطای پست، تشخیص توالی اتفاقات را مشکل می‌سازند.

## ۲- شرح حادثه

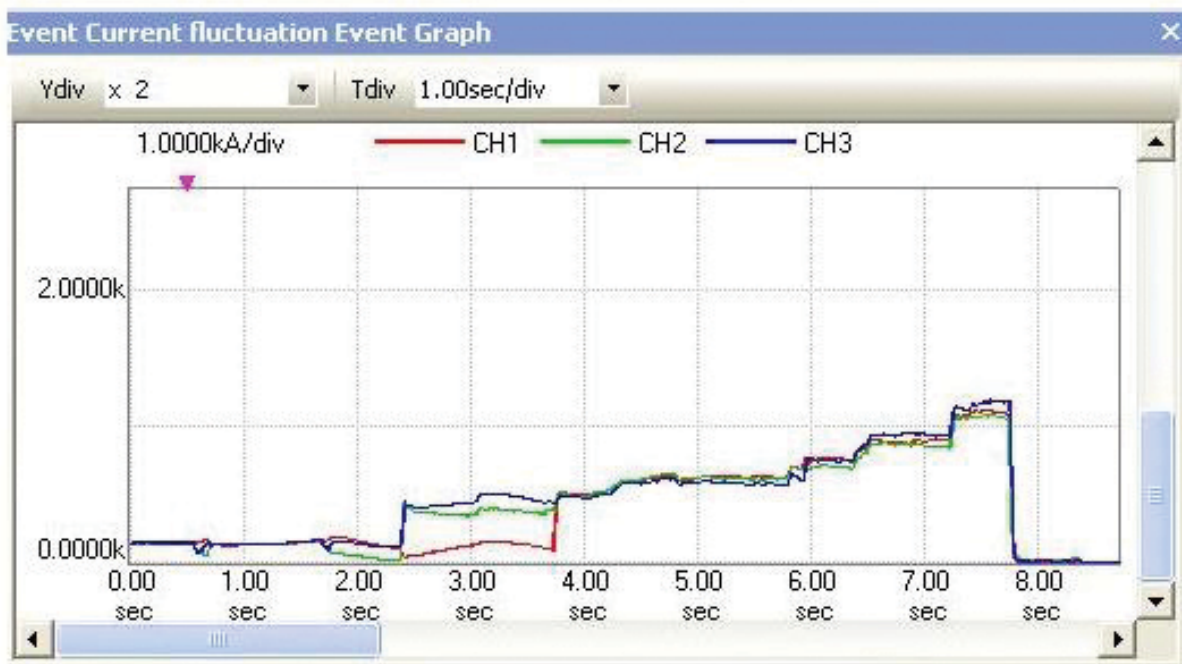
در ساعت ۱۴:۰۶ مورخ ۱۴۰۶/۰۶/۰۴ خط پست ۱۳۲ kV شریعتی - فارمد با طول ۱۸ کیلومتر با عملکرد حفاظت دیستانس زون یک فاز C-N از طرفین قطع گردید. فاصله محل خطا از پست شریعتی ۱۱/۳ کیلومتر ثبت شده است. خط از طرفین توسط ریکلوزر وصل و دوباره به دلیل باقی بودن خطا، از سمت پست فارمد قطع شد. از این رو خط از سمت پست شریعتی برق‌دار باقی مانده و مطابق اطلاعات ثبت شده در دستگاه‌های کیفیت توان پست شریعتی و فالت ریکورد رله‌های حفاظتی، اتصالی به مدت ۰/۷۵ ثانیه به صورت فاز C-N، مدت ۱/۳ ثانیه به صورت دو فاز B-C و به مدت ۴/۵ ثانیه به صورت سه فاز ادامه داشته (در مجموع ۶/۵۵ ثانیه) است. مطابق گزارش حادثه، پیمانکار شهرداری در محدوده خط شریعتی - فارمد در فاصله ۱۱ کیلومتری پست شریعتی مشغول به کار بوده و با خاکریزی زیر خط، فاصله فاز به زمین را به میزان دو متر کاهش داده است و سپس یک کامیون در حالتی که محفظه بار آن بالا بوده است از زیر خط عبور نموده و ابتدا در حریم خط قرار گرفته و پس از برخورد با فاز C منجر به قطع آن شده است. در ادامه، برخورد فاز قطع شده با فازهای دیگر باعث آسیب‌دیدگی سیم در فازهای A و B و سه‌فاز شدن اتصالی شده است. شکل (۲) دیاگرام تک‌خطی شبکه در ناحیه حادثه و شکل (۳) اطلاعات جریان ثبت شده در دستگاه کیفیت توان خط ایران خودرو در پست شریعتی را نشان می‌دهد [۵].

طبق اظهار نظر نیروگاه، در این حادثه واحد «اشکودا یک» با حفاظت

همان‌طور که بیان شد به‌کارگیری یک سیستم تحریک مناسب با قابلیت پاسخ‌دهی سریع به تقویت پایداری گذرا شبکه کمک زیادی می‌کند. وظیفه اصلی سیستم تحریک، تامین جریان مستقیم برای سیم‌پیچ میدان ژنراتور سنکرون می‌باشد. اگر چه در حالت کار ماندگار (Steady State) ژنراتور، مقدار این جریان تحریک ثابت است، اما به دلیل ماهیت دینامیکی سیستم قدرت که در آن بارها به‌طور پیوسته تغییر می‌کنند و سیستم و اجزاء آن پیوسته در حال پاسخ به این تغییرات هستند، سیستم تحریک باید قادر باشد با کنترل



شکل ۲: دیاگرام تکخطی شبکه در ناحیه حادثه



شکل ۳: اطلاعات جریان ثبت شده در دستگاه کیفیت توان خط ایران خودرو در پست شریعتی

دیگر به دلیل عدم عملکرد حفاظت‌های خط مشهد - شریعتی و تداوم اتصالی و کاهش ولتاژ در پست ۱۳۲ kV مشهد، حفاظت Under Voltage خطوط مشهد - شریعتی، مشهد - رضوی و مشهد - غدیر عمل کرده و خطوط بالا را باز نموده است. بدین ترتیب پست‌های

کاهش ولتاژ و اتصال کوتاه باس‌بارهای مصرف داخلی تریپ نموده و حفاظت قطع تحریک نیز فعال شده است. ضمن اینکه به دلیل عملکرد حفاظت کاهش ولتاژ باس‌بارهای مصرف داخلی و قطع آن‌ها (پمپ‌ها، فن‌ها و ...) توربین و بویلر نیز تریپ کرده‌اند. از سوی

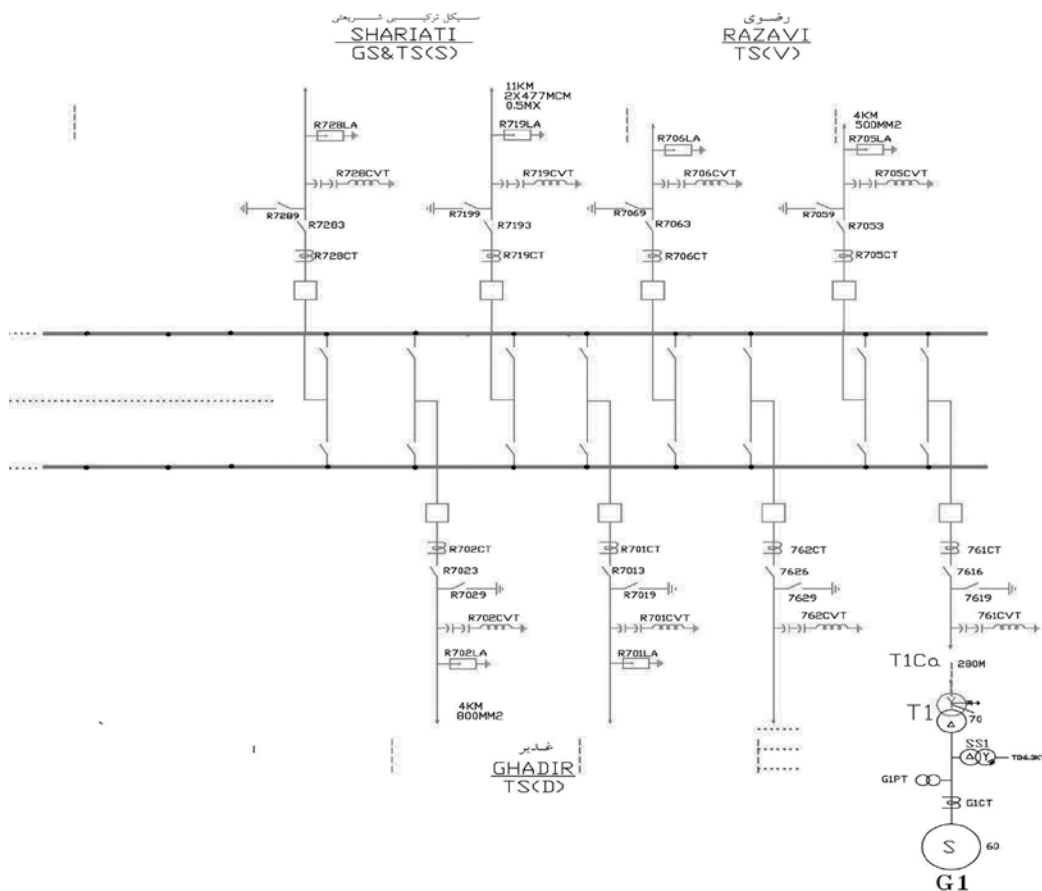
واحد «اشکودا» و اطلاعات ثبت شده رله خط مشهد - شریعتی، عملکرد واحد «اشکودا یک» و سیستم‌های حفاظتی و کنترلی آن حین حادثه بررسی گردد.

### ۳- تحلیل نحوه عملکرد حفاظت‌های شبکه فوق توزیع و ژنراتور واحد «اشکودا»

۱-۳ بررسی نحوه عملکرد حفاظت‌های شبکه فوق توزیع  
 مطابق شرح حادثه، پس از وقوع حادثه اولیه با عملکرد عملگر وصل دوباره خط شریعتی-فارمد، حادثه گسترش یافته است. پس از بررسی‌ها مشخص شد MCB مسیر ثانویه CVT مربوط به حفاظت‌های خط، هم‌زمان با وصل دوباره در پست شریعتی قطع شده است. با توجه به وجود ترانس مچینگ در مسیر ولتاژی، شاید جریان هجومی این ترانس در زمان وصل دوباره خط، باعث قطع شدن MCB مزبور شده است. با قطع شدن MCB و از دست رفتن نمونه ولتاژی، رله دیستانس خط بلاک شده است. از سوی دیگر، حفاظت DOC/EF خط نیز در زمان وصل دوباره به دلیل پیکربندی رله، غیرفعال می‌شود [۵].  
 بدین ترتیب با تداوم اتصالی، خطا به پست شریعتی منتقل شده و ترانسفورماتورهای اصلی هر ۹ واحد این نیروگاه با عملکرد حفاظت ختای زمین از مدار خارج و کلیدهای سمت پست آن‌ها باز شده‌اند.

شعاعی رضوی و غدیر نیز بی‌برق شده و مشترکان مربوطه دچار خاموشی گشته‌اند.

انتظار بر این است که واحد «اشکودا یک» به این اغتشاش پاسخ داده و با پاسخ‌دهی سریع سیستم تحریک، ولتاژ شبکه را تا حد امکان در محدوده قابل قبول حفظ می‌نمود و هم‌زمان با تغذیه اتصالی از طریق خط مشهد - شریعتی، زمینه عمل نمودن حفاظت‌های خط بالا را فراهم آورده و با باز شدن کلید، خطا ایزوله می‌شد. بدین ترتیب، امکان تداوم تغذیه پست‌های غدیر و رضوی نیز فراهم گشته و دامنه خاموشی کاهش می‌یافت. البته باید توجه داشت تمام این موارد در صورتی است که ضربه مگاواوری وارد شده به واحد از توانایی آن فراتر نبوده به گونه‌ای که واحد بتواند با پاسخ مناسب سیستم تحریک، پایداری بخشی از شبکه را تامین نماید. با توجه به اینکه در پست شریعتی که نزدیک‌تر به محل خطا بوده و بالطبع شرایط حادثه‌تری نسبت به پست مشهد داشته، کاهش ولتاژ محسوس ایجاد نشده و رله‌های ولتاژی پیک‌آپ نکرده‌اند و همچنین در سیستم‌های کنترلی و حفاظتی واحدها نشانه‌ای از ناپایداری در اثر ضربه شبکه و نوسان گزارش نشده، می‌توان نتیجه گرفت ضربه شبکه و میزان کاهش ولتاژ به دلیل خطا در پست مشهد آنچنان حاد نبوده است.  
 در ادامه سعی می‌شود با بررسی منحنی‌های مگاوات، مگاوار و ولتاژ

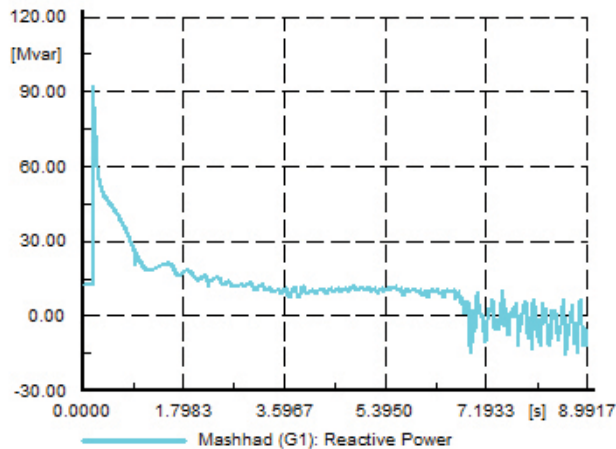


شکل ۴: دیاگرام تک‌خطی پست ۱۳۲kV مشهد

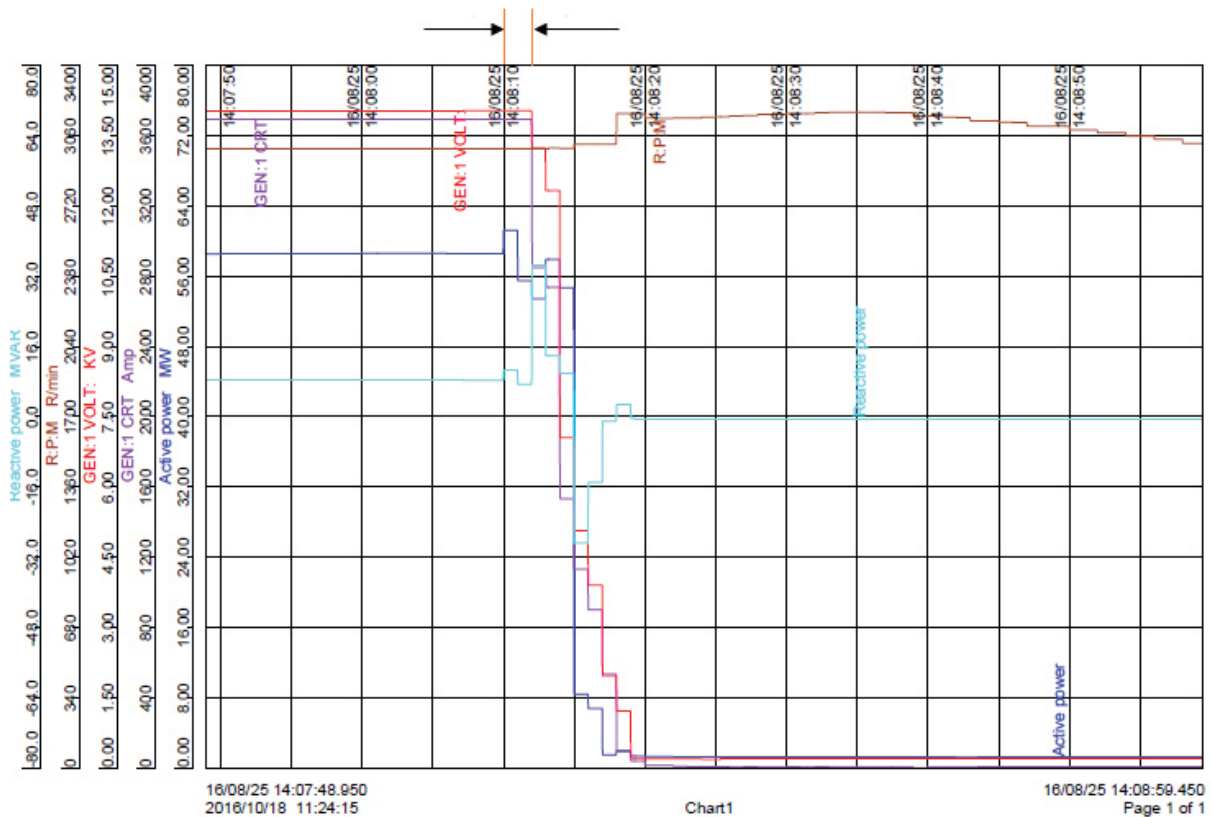


اشکودا) بر روی این پست قرار دارد. شکل (۴) دیاگرام تک‌خطی این پست را نشان می‌دهد [۶].  
 مطابق نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، میزان جریان خطای هر خط مشهد - شریعتی در این حادثه و به ازای مقاومت خطای صفر، در خطای تک‌فاز به زمین برابر و در خطای سه‌فاز برای هر فاز برابر A می‌باشد. بنابراین با توجه به منحنی عملکرد رله، اصولاً امکان تشخیص خطا توسط هیچ کدام از زون‌های رله دیستانس میسر نبوده است. همچنین در مورد رله DOC/EF، با توجه به منحنی قطع رله،

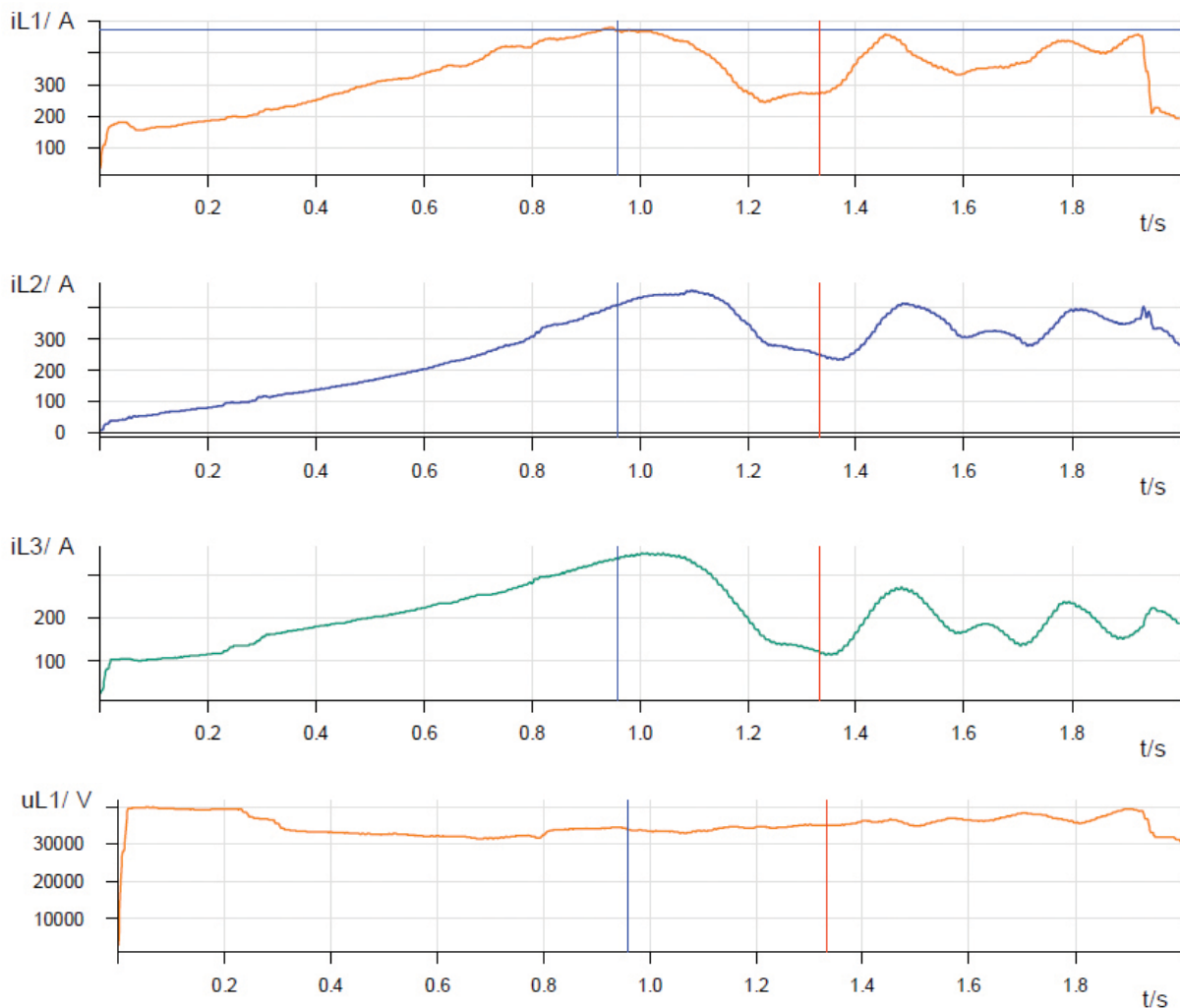
همچنین با توجه به ماتریس تریپ تعریف شده از سوی سازنده، کلیدهای GCB نیز در واحدهای گازی باز شده‌اند. همچنین ترانسفورماتورهای ۱۳۲/۶۳/۲۰ kV با عملکرد حفاظت O.C. سمت ۶۳ کیلوولت قطع گردیده‌اند. از سوی دیگر، با باقی ماندن اتصالی بر روی خط شریعتی - فارمد، دامنه حادثه گسترش یافته و از طریق خطوط شریعتی - مشهد (RS719 و RS728) این حادثه به پست ۱۳۲kV مشهد نیز سرایت کرده است. با توجه به اینکه پست فوق جدیداً احداث می‌باشد تنها یکی از مولدهای نیروگاه مشهد (واحد



شکل ۵: ضربه مگاواوری شبکه در پست ۱۳۲ کیلوولت مشهد در نرم‌افزار دیجسایلنت



شکل ۶: منحنی پارامترهای ژنراتور واحد «اشکودا» حین حادثه



شکل ۷: منحنی جریان‌های فاز و ولتاژ یک فاز در پست ۱۳۲ kV مشهود

شبه‌سازی شده نشان می‌دهد. ضربه مگاواری با پیک به میزان ۹۰ مگاوار در شکل دیده می‌شود. شایان ذکر است توان ظاهری نامی واحد یادشده، ۷۵ MVA است.

شکل (۶) نیز منحنی پارامترهای ژنراتور واحد اشکودا یک را که توسط ثبات نصب شده، ثبت گردیده است نشان می‌دهد [۷]. مطابق با منحنی‌های ثبت شده در ثبات واحد، با بروز خطا، ولتاژ پایانه ژنراتور در کمتر از دو ثانیه افت شدیدی کرده و رله ولتاژ پایین باس‌بار مصرف داخلی واحد نیز پیک‌آپ نموده است. از سوی دیگر، حفاظت قطع تحریک نیز در اثر نوسان توان ناشی از عملکرد ریکلوزر خط دچار خطا، فعال شده است. شکل (۷) جریان‌های فاز و ولتاژ فاز اول را در پست مشهود نشان می‌دهد.

آن‌چنان‌که در شکل (۷) مشاهده می‌شود در ابتدا جریان‌های سه‌فاز پیک قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند (با توجه به محاسبات در حدود ۱/۴-۱/۳ جریان نامی ژنراتور) که نشان از پاسخ ژنراتور به اتصالی است اما بلافاصله دامنه جریان‌ها افت نموده به گونه‌ای که به محدوده ۲۵۰-۱۵۰ آمپر رسیده‌اند و دوباره دچار افزایش و کاهش شده‌اند. همچنین منحنی ولتاژ فاز نخست نشان می‌دهد که مقدار ولتاژ به بازه ۳۰-۴۰ kV رسیده که در مقایسه با ولتاژ نامی فاز به زمین

برای جریان خطای سه‌فاز، رله پیک‌آپ نخواهد کرد و برای خطای زمین نیز به دلیل اینکه بعد از ۰/۷ ثانیه خطا از تک‌فاز به دو و سپس سه‌فاز تغییر یافته و زمان عملکرد رله با توجه به منحنی قطع و میزان جریان اتصالی، حدود ۲ ثانیه بوده، بنابراین این رله نیز عملکرد نداشته است. بنابراین امکان تشخیص خطا توسط رله‌های حفاظتی خط به دلیل ساختار شبکه، بالا بودن امپدانس مسیر و پایین بودن ظرفیت مولد «اشکودا» - و بالطبع پایین بودن جریان خطای جاری شده از سمت ژنراتور- میسر نبوده است. شایان ذکر است صحت رله‌های بالا و اعمال تنظیمات آن با توجه به مدارک، مورد تایید قرار گرفته است [۵].

### ۳-۲ بررسی عملکرد واحد «اشکودا»

مطابق با تئوری موضوع، سیستم تحریک ژنراتور واحد «اشکودا» می‌بایست با پاسخ مناسب به اغتشاش سیستم، ضربه مگاواری شبکه را پاسخ داده و ولتاژ پایانه را در محدوده قابل‌قبول - با توجه به قابلیت‌های کوتاه‌مدت ژنراتور- حفظ نماید و همچنین با تغذیه جریان اتصالی، امکان تشخیص خطا را توسط رله‌های حفاظتی فراهم کند. شکل (۵)، منحنی توان راکتیو ژنراتور را با فرض عدم وجود AVR که با استفاده از دک شبکه برق استان خراسان در نرم‌افزار دیجسایلنت

که برابر می‌باشد، افت بسیار زیادی (در حدود ۵۰٪) را نشان می‌دهد (منطبق با شکل (۶) و منحنی ولتاژ؛ این در حالی است که در ۲ ثانیه اول، فاز اول درگیر خطا نبوده است). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با شدیدتر شدن اغتشاش و تبدیل اتصالی به دو و سپس سه‌فاز، سیستم تحریک ژنراتور در مقابله با ضربه وارده از شبکه ناتوان و روتور دچار نوسان شده و با افزایش دور به حدود ۳۱۵۰ RPM (مطابق با شکل (۶) و منحنی سرعت) ژنراتور از شبکه جدا می‌گردد. در نهایت با عملکرد حفاظت‌های اتصال کوتاه و ولتاژ پایین، ژنراتور تریپ نموده و خطوط ۱۳۲ kV مشهد - شریعتی، مشهد - غدیر و مشهد - رضوی نیز با حفاظت U.V. قطع و پست‌های غدیر و رضوی بی‌برق شده‌اند. به‌طور کلی در برخی موارد گذشته، پدیده به اصطلاح قفل کردن سیستم تحریک در این واحد مشاهده شده که به‌نظر می‌رسد در این حادثه نیز تکرار شده است؛ بدین معنی که سیستم تحریک از پاسخ‌گویی متناسب با نیاز شبکه و اغتشاش، عاجز می‌ماند که بی‌شک قدمت و فرسودگی واحد نیز در این مساله نقش داشته و مسائل فراوانی را در بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری آن ایجاد می‌نماید. همچنین باید توجه داشت به دلیل نقص، کانال دستی سیستم تحریک در مدار بوده است که پاسخ‌گویی سریع را در عمل ناممکن می‌سازد. بنابراین به‌نظر می‌رسد عدم پاسخ‌دهی مناسب ژنراتور به اغتشاش، باعث افت شدید ولتاژ و خروج‌های بعدی شده است. اگرچه مستندات تست دوره‌ای رله‌های حفاظتی واحد «اشکودا»، حاکی از درستی عملکرد آن‌هاست اما منطق حفاظت اتصال کوتاه ژنراتور باید مورد بررسی قرار گیرد، چنانچه این حفاظت به صورت کنترل شده با ولتاژ باشد نیاز به هماهنگ‌سازی با حفاظت‌های شبکه دارد. همچنین با توجه به افزایش بسیار زیاد سرعت روتور، سیستم‌های کنترلی و حفاظتی واحد بایستی مورد بررسی قرار گیرند. عملکرد حفاظت کاهش ولتاژ باس‌بارهای مصرف داخلی واحد نیز - چه به دلیل تنظیمات نامناسب و چه به دلیل عدم پاسخ ژنراتور به حفظ پایداری ولتاژ - مورد قبول نمی‌باشد. مشابه این گونه عملکرد نامناسب رله‌های U.V. باس‌بارهای مصرف داخلی واحدهای نیروگاهی در حوادث شبکه به کرات مشاهده شده که از آن جمله می‌توان به خروج سه واحد نیروگاه فردوسی به دلیل عملکرد حفاظت فوق، در حادثه مهرماه ۱۳۹۱ پست توس اشاره کرد.

بنابراین نخست به دلیل ساختار شبکه و پایین بودن جریان خطا، امکان تشخیص خطا توسط رله‌های حفاظتی خطوط مشهد - شریعتی میسر نبوده و دوم اینکه واحد «اشکودا یک» به دلیل نقص در سیستم‌های کنترلی نتوانسته به اغتشاش شبکه پاسخ داده و در پایان از مدار تولید خارج شده است. در اینجا باید توجه داشت، قدمت واحد «اشکودا» مسائل گریزناپذیری را در بهره‌برداری و عملکرد این واحد به وجود می‌آورد که با عنایت به این موضوع، تغذیه دو پست شعاعی تنها از این واحد، مطلوب نبوده و بایستی نسبت به اصلاح ساختار شبکه در این خصوص اقدام نمود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

طی حادثه شهریورماه ۱۳۹۵ شبکه فوق‌توزیع خراسان رضوی پس از عملکرد عملگر وصل دوباره خط و گسترش حادثه اولیه، واحد «اشکودا یک» نیروگاه مشهد با حفاظت‌های اتصال کوتاه و کاهش ولتاژ باس‌بارهای مصرف داخلی از مدار خارج و حفاظت قطع تحریک واحد نیز فعال گشت. همچنین پست‌های شعاعی غدیر و رضوی بی‌برق شدند. جهت توالی اتفاقات دو حالت متصور بود: نخست؛ خروج پست‌های غدیر و رضوی به دلیل افت شدید ولتاژ ناشی از

خطا و سپس رد بار گسترده و تریپ واحد «اشکودا»، دوم؛ خروج واحد «اشکودا» به دلیل خطا و سپس بی‌برقی دو پست نام‌برده. به دلیل عدم وجود ثبات‌های دقیق و هم‌زمان، امکان تطابق زمان‌های خروج وجود نداشت. از این رو منحنی‌های ولتاژ و جریان باس‌بارها و پارامترهای ژنراتور به‌طور مجزا بررسی شد. تحلیل‌ها نشان داد نخست به دلیل ساختار شبکه و پایین بودن جریان اتصالی، اصولاً امکان تشخیص خطا توسط رله‌های حفاظتی خط حتی با تداوم تولید مولد «اشکودا» میسر نبوده است. دوم واحد «اشکودا» به دلیل ضعف سیستم تحریک، پاسخ مناسبی به اغتشاش شبکه نداده و با افت ولتاژ شدید پایانه ژنراتور، نوسانی شدن و افزایش سرعت روتور، ژنراتور از شبکه جدا و پس از حدود ۵ ثانیه از مدار خارج شده است. پس از آن خطوط مشهد-شریعتی، مشهد-غدیر و مشهد-رضوی نیز باز نموده‌اند. جهت پیشگیری از تکرار حوادث بیان‌شده، پیشنهاد می‌شود درستی عملکرد رله‌های حفاظتی چه به لحاظ برنامه‌های تست و نگهداری و چه به لحاظ عملکرد آن‌ها در شرایط خاص شبکه مورد توجه بیشتری قرار گیرد. همچنین نظر به نقش بسیار مهم سیستم تحریک در عملکرد ژنراتور و پایداری شبکه بایستی تا حد امکان نقص‌های مربوط به آن را در واحدهای نیروگاهی برطرف و بهینه‌سازی نمود. به لحاظ ساختار و معماری شبکه نیز، قرار دادن تنها یک واحد ضعیف بر روی پست ۱۳۲ kV مشهد مورد قبول نمی‌باشد و پیشنهاد می‌شود جهت بهبود قابلیت اطمینان شبکه، در انتقال سایر واحدهای نیروگاه مشهد به سطح ۱۳۲ kV تسریع شود. از سوی دیگر باید توجه داشت استفاده از عملگرهای ریکلوزری نیاز به مطالعات جامع‌تری در خصوص تاثیر نوسان‌ها بر روی سیستم‌های حفاظتی و کنترلی شبکه و همچنین تاثیرات مخرب برقراری دوباره خطا شامل ایجاد نوسانات بزرگ بر روی ژنراتورها، ایجاد ضعف‌های عایقی در آن‌ها و ضربه‌های شدید بر روی سیستم‌های کنترلی الکتریکی و همچنین مکانیکی واحدها دارد.

#### پی‌نوشت‌ها

- ۱ Local Oscillations
- ۲ Inter-aria Oscillations

#### مراجع

- ۱- آقا محمدی، م. ر؛ خورمیزی، ا. ب. و رضایی، م. (۱۳۸۸). «تأثیر عدم دقت پارامترهای ژنراتور سنکرون بر عملکرد پایداری گذرای ژنراتورها و سیستم قدرت». بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق PSC2009، تهران، ایران.
- ۲- دهقانی، ح. (۱۳۹۰). «بهبود پایداری در سیستم‌های قدرت جهت جلوگیری از Blackout با استفاده از PSS و ادوات FACTS». بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق PSC ۲۰۱۱، تهران، ایران.
- ۳- عبداللهی، ح. و جاذبی، س. (۱۳۸۴). «اثر SVC بر پایداری گذرای ژنراتورهای سنکرون در مدل دینامیک سیستم قدرت». هشتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق، کرمان، ایران.
- ۴- محمدی، س؛ فراهانچی برادران، م. و احمدی، ر. (۱۳۹۲). «پیش‌بینی پایداری گذرا توسط شکل موج ولتاژ و با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی الگوریتم FCM و LSSVM». بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق ایران، مشهد، ایران.
- ۵- «گزارش بررسی حادثه مورخ ۹۵/۰۶/۰۴ شبکه فوق‌توزیع خراسان رضوی». دفتر فنی انتقال، شرکت برق منطقه‌ای خراسان.
- ۶- پایگاه اطلاع‌رسانی اینترانت شرکت برق منطقه‌ای خراسان.
- ۷- مستندات و مدارک حادثه ۹۵/۰۶/۰۴ شرکت مدیریت تولید برق مشهد.

\*\*\*