

تشخیص خطاهای متقارن سه فاز در طی تجاوز بار مبتنی بر مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط برای پشتیبانی عملکرد صحیح زون ۳ رله‌های دیستانس

توحید غنی‌زاده بلندی^۱، دانشجوی دکتری؛ محمودرضا حقی‌فام^۲، استاد؛ مجتبی خدرزاده^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - t.ghanizadehbolandi@modares.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - haghifam@modares.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - khederzadeh@sbu.ac.ir

چکیده: عملکرد نامناسب زون ۳ رله‌های دیستانس در شبکه انتقال طی شرایط بحرانی سیستم قدرت همچون تجاوز بار به‌عنوان یکی از عوامل مهم در تریگر شدن وقوع رخداد‌های آبخاری گزارش شده‌اند. پدیده‌های متقارن همچون وقوع نوسان توان، تغییر توان عبوری از خطوط ناشی از خروج خطوط دیگر و ناپایداری ولتاژ می‌تواند امنیت سیستم حفاظتی را تهدید کرده و منجر به عملکرد بی‌مورد زون ۳ رله دیستانس شود. چالش مهم دیگر، تشخیص سریع و مطمئن وقوع خطاهای سه‌فاز در حین وقوع تجاوز بار است. در این مقاله یک شاخص نظارتی مبتنی بر زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط ارائه می‌گردد که از اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون به‌دست‌آمده از دو طرف خطوط تحت پوشش زون ۳ رله دیستانس استخراج می‌گردد. شاخص پیشنهاد شده قادر به تشخیص سریع خطاهای سه‌فاز از تجاوز بار در بازه زمانی کمتر از یک سیکل می‌باشد. عدم تأثیرپذیری از مقاومت خطای بالا، مکان وقوع خطا، زمان وقوع خطا و جبران‌سازی سری خط از جمله ویژگی‌های کلیدی روش پیشنهادی است. عملکرد صحیح روش پیشنهادی روی سیستم استاندارد New England 39 bus ارزیابی و مورد تأیید قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تجاوز بار استاتیکی، زون ۳ رله دیستانس، اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون، مؤلفه‌های تحمیلی خطای سوپرایمپوز.

Three-Phase Symmetrical Fault Detection during Load encroachment based on Superimposed Component Complex Power to Support Correct Operation of Zone 3 Distance Relays

T. Ghanizadeh Boalndi¹, PhD Student; M. R. Haghifam², Professor; M. Khederzadeh³, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: t.ghanizadehbolandi@modares.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: haghifam@modares.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: khederzadeh@sbu.ac.ir

Abstract: Inappropriate operation of zone 3 distance relays in transmission network during power system stressed condition such as load encroachment situation have reported as an important factor contributing in triggering the cascading outages. Symmetrical events such as power swing, power flow transfer resulted from line outage and voltage instability can threaten the security of protection system and cause the maloperation of zone 3 distance relay. Another challenge is the fast and dependable distinguishing the three phase faults during the load encroachment condition. In this paper, a supervisory index is presented based on phase angle of superimposed component complex power which is extracted from synchrophasor measurements obtained from both ends of lines covered by zone 3 distance relay. The proposed index has the proficiency in fast detection of three phase faults from load encroachment in less than one cycle. Unaffected by high fault resistance, fault location, fault inception angle and series compensation capacitor are the outstanding features of the proposed index. The validity of the proposed scheme is confirmed on 39-bus New England test system.

Keywords: Static load encroachment, zone 3 distance relay, synchrophasor measurement, fault superimposed component.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۳ و ۱۳۹۶/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۱

نام نویسنده مسئول: محمودرضا حقی فام

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - جلال آل احمد - پل نصر - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

امروزه با گسترش تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، شبکه‌های انتقال به جهت انتقال ماکزیمم توان و دست یافتن به حداکثر سود ناشی از انتقال توان در بازار برق، نزدیک به محدودیت‌های بهره‌برداری خود قرار دارند. در چنین شرایطی مهندسين حفاظت جهت تنظیم و هماهنگی مطمئن سیستم‌های حفاظتی طی شرایط بحرانی سیستم قدرت با یک چالش جدی روبرو هستند. زون ۳ رله دیستانس به‌عنوان حفاظت پشتیبان شبکه انتقال، به‌دلیل ویژگی اضافه برد آن بیشتر از زون ۱ و ۲ واحد دیستانس، در معرض عملکرد بی‌مورد ناشی از ورود امیدانس بار به ناحیه حفاظتی آن قرار می‌گیرد. شرایطی همچون وقوع نوسان توان ناشی از عملیات کلیدزنی، بارگذاری سنگین ناشی از توزیع مجدد توان در اثر خروج خطوط دیگر و ناپایداری ولتاژ می‌تواند منجر به ورود امیدانس دیده‌شده توسط زون ۳ به ناحیه حفاظتی رله شده و سبب عملکرد نامطلوب آن گردد. بررسی دلیل وقوع خاموشی‌های گسترده در سراسر جهان نشان می‌دهد که در ۷۵ درصد موارد، عملکرد بی‌مورد زون ۳ منجر به گسترش خروج‌های آشکاری و در نتیجه وقوع خاموشی‌های سراسری شده است. خاموشی جولای ۲۰۱۲ هند و خاموشی ۱۴ آگوست ۲۰۰۳ آمریکا ناشی از عملکرد بی‌مورد زون ۳ در اثر تجاوز بار بوده است [۱، ۲]. چالش دیگری که سیستم حفاظتی زون ۳ رله دیستانس با آن مواجه است عدم تشخیص خطاهای سه‌فاز رخ داده در حین شرایط تجاوز بار استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. روش متداول بلوک عملکرد زون ۳ طی شرایط نوسان توان توسط رله PSB، به‌دلیل عدم امکان تشخیص مطمئن و سریع خطاهای سه‌فاز رخ داده حین نوسان توان می‌تواند منجر به کاهش قابلیت اعتماد سیستم حفاظتی گردد [۳]. تغییر شکل مشخصه زون ۳ و یا محدود کردن قسمتی از آن نیز به‌عنوان راهکاری برای جلوگیری از عملکرد بی‌مورد رله در شرایط تجاوز بار استاتیکی پیشنهاد شده است [۴].

با این وجود طرح مذکور قابلیت اعتماد رله برای تشخیص خطاهای سه‌فاز با مقاومت بالا را کاهش می‌دهد و از طرفی امکان عملکرد بی‌مورد رله همچنان برای شرایط بارگذاری سنگین با ضریب توان پایین وجود خواهد داشت؛ بنابراین به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری سیستم قدرت در برابر خروج‌های پی‌درپی، نیاز فزاینده‌ای به یک راهکار نظارتی به‌منظور بهبود عملکرد زون ۳ رله‌های دیستانس وجود دارد.

به‌طور کلی نوسان توان، ناپایداری بلندمدت ولتاژ و تجاوز بار استاتیکی را می‌توان از فاکتورهای مهم تأثیرگذار در افزایش آسیب‌پذیری زون ۳ رله‌های دیستانس به‌شمار برد. به‌طور عمده روش‌های بهبود عملکرد زون ۳ رله دیستانس به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول روش‌های مبتنی بر اطلاعات محلی بوده [۵-۸] و دسته دوم مبتنی بر اطلاعات ناحیه گسترده می‌باشد [۹-۱۸]. در روش اول از اطلاعات اندازه‌گیری شده در محل رله برای بهبود عملکرد رله استفاده می‌شود [۵-۸] و در روش دوم از اطلاعات اندازه‌گیری شده

فازور سنکرون به‌دست‌آمده از باس‌های شبکه برای بهبود عملکرد صحیح رله بهره گرفته می‌شود. بهبود عملکرد حفاظت پشتیبان خط انتقال مبتنی بر اندازه‌گیری‌های ناحیه گسترده نیز خود در دو دسته ارائه شده‌اند. دسته اول با ارائه مفهوم حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده شبکه انتقال، یک طرح حفاظتی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون ناحیه گسترده را به‌عنوان روشی برای جایگزینی زون ۳ رله‌های دیستانس مطرح می‌کنند [۹-۱۲] و روش‌های دسته دوم طرح‌هایی را برای نظارت بر عملکرد صحیح زون ۳ رله‌های دیستانس آسیب‌پذیر ارائه می‌دهند [۱۶-۱۸].

با ظهور تکنولوژی اندازه‌گیری فازور سنکرون و پیشرفت‌های شکل‌گرفته در زمینه مخابرات دیجیتال و سیستم‌های مخابراتی با سرعت ارسال بالا، امکان پایش وضعیت زمان واقعی سیستم قدرت با استفاده از اندازه‌گیری‌های ناحیه گسترده فراهم شده است. در سال‌های اخیر طرح‌های حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده (WABP) بر اساس واحدهای اندازه‌گیری فازور سنکرون جایابی شده در باس‌های شبکه به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین حوزه‌های پژوهشی مورد توجه محققین قرار گرفته است [۹-۱۵]. طرح‌های حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده به‌دلیل حذف مشکل هماهنگی حفاظتی و سرعت بالا در تشخیص خطا نسبت به طرح‌های پشتیبان محلی قابلیت‌های ویژه‌ای را برای مانیتورینگ زمان واقعی سیستم قدرت ایجاد کرده‌اند. در اکثر این روش‌ها ابتدا نزدیک‌ترین ناحیه به محل خطا از روی رتبه‌بندی مقادیر ولتاژهای توالی باس‌ها مشخص شده و سپس خط معیوب موجود در این ناحیه شناسایی شده و ایزوله می‌گردد. در [۹]، ابتدا ناحیه خطا از طریق مقایسه اندازه ولتاژهای توالی مثبت باس‌های شبکه مشخص می‌شود و سپس اختلاف زاویه فاز جریان توالی مثبت دو طرف خطوط موجود در ناحیه خطا جهت تشخیص خط معیوب استفاده می‌شود. در این مرجع اثر تجاوز بار استاتیکی و دینامیکی همچون نوسان توان و افزایش توان عبوری از خط، بر روی عملکرد طرح پیشنهادی بررسی نشده است. در مرجع [۱۰]، طرح حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده مبتنی بر مقادیر مؤلفه خطای فازور ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده از یک باس شبکه جهت تخمین فازور مؤلفه خطای ولتاژ در باس مقابل ارائه می‌شود. خط دارای خطا، از طریق محاسبه نسبت مؤلفه خطای ولتاژ محاسبه شده به مقدار اندازه‌گیری شده آن تشخیص داده می‌شود. وجود جبران‌کننده‌های سری در شبکه انتقال یک چالش دیگری را برای طرح‌های حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده ایجاد می‌کنند که مراجع [۱۱-۱۲] به ارائه طرح‌هایی با در نظر گرفتن حضور خازن سری در خط انتقال پرداخته‌اند. اخیراً مفهوم امیدانس مجتمع و دیفرانسیل به‌عنوان روش جدیدی برای حفاظت خط انتقال بر مبنای اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون دو طرف خط انتقال مطرح شده‌اند [۱۴-۱۲]. در [۱۲]، زاویه فاز امیدانس مجتمع توالی مثبت به‌عنوان یک روش حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده برای تشخیص مستقیم خط معیوب در شبکه انتقال جبران‌شده سری معرفی شده است. در این

رله‌های بحرانی یک زون تطبیقی ضد تجاوز بار برای جلوگیری از عملکرد بی‌مورد رله پیشنهاد می‌شود. در [۲۲]، برای جلوگیری از مشارکت رله‌ها در وقوع خروج‌های پی‌درپی، یک سازوکاری برای ارزیابی زمان واقعی آسیب‌پذیری زون ۳ رله‌های دیستانس بر مبنای اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون ارائه می‌شود.

در این مقاله برای جلوگیری از عملکرد بی‌مورد زون ۳ رله‌های دیستانس در شرایط بحرانی سیستم قدرت، یک شاخصی مبتنی بر زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط پیشنهاد می‌شود که قادر به تشخیص خطاهای سه‌فاز از شرایط تجاوز بار می‌باشد. برخلاف طرح‌های حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده WABP که نیاز به جمع‌آوری اطلاعات فازور سنکرون تمامی باس‌ها برای تشخیص ناحیه خطا و خط معیوب دارند، طرح نظارتی پیشنهادی به منظور تشخیص شرایط خطا از تجاوز بار، تنها به اندازه‌گیری اطلاعات فازور سنکرون باس‌های تحت پوشش زون ۳ برای محاسبه شاخص نظارتی نیاز دارد. لذا سرعت عمل طرح پیشنهادی نسبت به طرح‌های WABP موجود بالاست. عملکرد صحیح این شاخص برای تشخیص خطاهای سه‌فاز از تجاوز بار به صورت تحلیلی و نیز از طریق شبیه‌سازی بر روی سیستم IEEE-39 BUS مورد ارزیابی و اثبات قرار می‌گیرد.

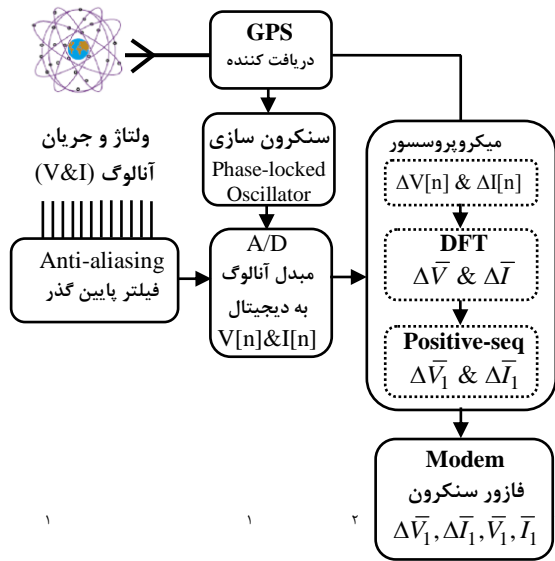
۲- فرمول‌بندی و آنالیز شاخص نظارتی مبتنی بر مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط

زون ۳ رله دیستانس جهت فراهم آوردن حفاظت پشتیبان خطوط متصل به خط اصلی در صورت عدم عملکرد حفاظت اصلی به کار می‌رود که حدود ۱۲۰ درصد بلندترین خط بعدی را پوشش می‌دهد. اگر به هر دلیل زون ۱ و زون ۲ رله دیستانس به عنوان حفاظت اصلی نتواند خطای موجود در ناحیه خود را رفع کند، مسئولیت تشخیص خطا توسط زون ۳ رله دیستانس پشتیبان آن خط می‌باشد. وجود مؤلفه‌های توالی صفر و منفی جریان طی خطاهای نامتقارن امکان تشخیص آسان این‌گونه خطاها از پدیده‌های متقارن همچون نوسان توان و تجاوز بار استاتیکی را فراهم می‌آورد. با این وجود از آنجاکه خطای سه‌فاز و اتفاقاتی همچون نوسان توان و تجاوز بار پدیده‌های متقارنی هستند، تنها جریان توالی مثبت طی این اتفاقات وجود دارد به طوری که امکان تمیز دادن این دو پدیده از هم بسیار سخت می‌باشد؛ بنابراین طی این اتفاقات، به دلیل افزایش یک‌باره اندازه جریان و کاهش ولتاژ، اندازه امپدانس دیده‌شده توسط رله دیستانس کاهش یافته و امکان ورود امپدانس دیده‌شده به داخل مشخصه زون ۳ رله دیستانس و در نتیجه احتمال عملکرد بی‌مورد آن طی شرایط تحت استرس سیستم قدرت افزایش می‌یابد. از طرفی از آنجایی که زون ۳ رله دیستانس ناحیه بزرگی را می‌پوشاند لذا تصمیم نادرست رله دیستانس می‌تواند پایداری سیستم قدرت را به خطر انداخته و آغازگر خروج‌های پی‌درپی شود. در این قسمت برای نظارت بر عملکرد صحیح رله دیستانس یک شاخص نظارتی مبتنی بر زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط معرفی

روش برخلاف طرح‌های ارائه‌شده در [۹-۱۱]، خط معیوب می‌تواند به طور مستقیم بدون نیاز به یافتن ناحیه خطا شناسایی گردد که پیچیدگی طرح پیشنهادی را کاهش می‌دهد. در [۱۵]، یک طرح حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده مبتنی بر تعداد محدودی از PMUهای جایابی شده در باس‌های شبکه ارائه شده است که قابل کاربرد در خطوط چندترمیناله بوده و قادر به تشخیص شرایط خطا از سایر شرایط و اتفاقات همچون تجاوز بار و نوسان توان می‌باشد.

علاوه بر طرح‌های حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده WABP که به عنوان جایگزینی برای زون ۳ رله‌های دیستانس برای حفاظت پشتیبان شبکه انتقال مطرح شده‌اند، برخی دیگر از طرح‌های حفاظتی پشتیبان مطرح شده از قابلیت اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون ناحیه گسترده برای نظارت بر عملکرد صحیح زون ۳ رله‌های دیستانس بهره برده‌اند [۱۶-۱۸]. در [۱۶]، امپدانس ظاهری مبتنی بر اطلاعات فازور سنکرون استخراج شده از PMUهای جایابی شده در باس‌های استراتژیک به عنوان یک راهکاری برای پشتیبانی عملکرد صحیح زون ۳ رله‌های دیستانس تحت شرایط بحرانی سیستم قدرت بکار می‌رود. عملکرد این روش عمدتاً به محل PMUهای جایابی شده در شبکه بستگی دارد. در [۱۷]، زاویه فاز امپدانس توالی مثبت و تابع مانیتورینگ گذار به عنوان دو معیاری برای نظارت بر عملکرد صحیح زون ۳ رله دیستانس مبتنی بر اندازه‌گیری‌های ناحیه گسترده ارائه شده است. در [۱۸]، یک روش طبقه‌بندی خطا مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان به عنوان یک روش کنترل نظارتی بر عملکرد زون ۳ مطرح شده است. این طرح قادر به تفکیک خطاهای سه فاز از شرایط تجاوز بار می‌باشد و می‌تواند شرایط ناپایداری ولتاژ را از شرایط نوسان توان نیز تفکیک نماید. با این وجود روش پیشنهادی نیازمند به حجم زیادی از شبیه‌سازی‌ها برای ایجاد سناریوهای مختلفی از شرایط وقوع خطا برای آموزش روش ماشین بردار پشتیبان می‌باشد.

برای جلوگیری از مشارکت رله‌های دیستانس آسیب‌پذیر در گسترش خروج‌های پی‌درپی، ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم حفاظتی شبکه انتقال بر مبنای تشخیص رله‌های بحرانی، به عنوان یکی دیگر از روش‌های مطرح شده برای جلوگیری از عملکرد بی‌مورد زون ۳ رله‌های دیستانس است. حاشیه عملکرد رله به عنوان یک شاخصی برای ارزیابی وضعیت رله در هر نقطه کار در مقالات ارائه شده است. در [۱۹]، حاشیه زون ۳ رله دیستانس به عنوان تابعی از ولتاژ باس استخراج شده است که از آنالیز حساسیت آن به تغییر توان عبوری از خط، برای کنترل مارجین استفاده می‌شود. در [۲۰]، یک شاخص آسیب‌پذیری برای ارزیابی زمان واقعی زون ۳ رله‌های دیستانس مستعد به تجاوز بار در هر نقطه کار ارائه می‌گردد و رله‌های بحرانی شناسایی شده تحت نظارت قرار می‌گیرند تا از عملکرد بی‌مورد آن‌ها در شرایط تجاوز بار جلوگیری شود. روش پیشنهادی در [۲۱]، یک راهکاری برای ارزیابی امنیت حالت دائم شبکه از طریق شناسایی رله‌های دیستانس آسیب‌پذیر در مقابل تجاوز بار ارائه می‌دهد به طوری که بعد از تشخیص



شکل ۱: ساختار داخلی تجهیز اندازه‌گیری مؤلفه سوپرایمپوز فازورسنکرون

۲-۲- تعریف و آنالیز عملکرد شاخص نظارتی

در این قسمت به منظور نظارت بر عملکرد صحیح زون ۳ رله دیستانس در شرایط تجاوز بار، یک شاخص جدیدی مبتنی بر مؤلفه فازوری سوپرایمپوز توالی مثبت ولتاژ و جریان معرفی می‌شود. عملکرد این شاخص برای خطاهای مقارن داخل و خارج خط و برای شرایط تجاوز بار مورد تحلیل و اثبات قرار می‌گیرد. مؤلفه فازوری سوپرایمپوز ولتاژ و جریان به دست آمده از باس‌های تحت پوشش زون ۳ رله دیستانس برای استخراج مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط تزریق شده به خط ناشی از وقوع اختلال (اتصال کوتاه یا تجاوز بار) استفاده می‌شود. شکل ۲ مدار معادل مؤلفه سوپرایمپوز خط انتقال را در اثر وقوع یک خطای داخل خط MN را نشان می‌دهد. با فرض این که $\Delta \bar{U}_n$ و $\Delta \bar{U}_m$ به ترتیب مؤلفه‌های فازوری سوپرایمپوز ولتاژ در باس‌های M و N، $\Delta \bar{I}_m$ و $\Delta \bar{I}_n$ به ترتیب مؤلفه‌های فازوری سوپرایمپوز جریان تزریق شده از باس‌های M و N به داخل خط باشد، شاخص نظارتی پیشنهادی به صورت زیر استخراج می‌گردد:

$$MI_{mm} = \arg(\Delta \bar{S}_m) + \arg(\Delta \bar{S}_n) = \angle \Delta \bar{S}_m + \angle \Delta \bar{S}_n \quad (2)$$

به طوری که:

$$\Delta \bar{S}_m = \Delta \bar{U}_m \Delta \bar{I}_m^* \quad (3)$$

$$\Delta \bar{S}_n = \Delta \bar{U}_n \Delta \bar{I}_n^* \quad (4)$$

به دست آمده در باس‌های M و N می‌باشند. MI_{mm} شاخص نظارتی متناظر با هر خط تحت پوشش زون ۳ می‌باشد که از مجموع زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط به دست آمده از دو باس ابتدا و انتهای آن خط از طریق اندازه‌گیری‌های فازورسنکرون ولتاژ و جریان حاصل می‌شود.

می‌گردد که از اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون باس‌های تحت پوشش زون ۳ رله دیستانس استخراج می‌گردد. در ادامه ضمن معرفی مؤلفه‌های سوپرایمپوز ولتاژ و جریان، عملکرد شاخص پیشنهادی و نحوه استخراج آن برای خطاهای داخل و خارج خط و شرایط تجاوز بار مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۱- مؤلفه‌های سوپرایمپوز و استخراج کمیت فازوری آن

وقتی سیستم قدرت در معرض وقوع یک اختلالی قرار می‌گیرد، متغیرهای شبکه همچون ولتاژ و جریان ناشی از وقوع آن اختلال دچار تغییر می‌شوند. مؤلفه سوپرایمپوز یا مؤلفه افزوده شده، نامی است که به تغییرات ایجاد شده ناشی از وقوع آن اختلال در ولتاژ و جریان نسبت به شرایط عادی سیستم قدرت اطلاق می‌شود. اگر اختلال رخ داده یک خطای اتصال کوتاه باشد به مؤلفه سوپرایمپوز مؤلفه تحمیلی خطا نیز گفته می‌شود که حاصل تفریق آن متغیر در شرایط قبل و بعد از خطا است. بر اساس قضیه جمع آثار، تغییر ولتاژ و جریان ناشی از وقوع خطا در هر نقطه از خط انتقال را می‌توان با صفر کردن تمام منابع ولتاژ قبل از خطا و جایگزینی تمامی بارها و اجزای شبکه با امپدانس معادل آن‌ها، محاسبه کرد [۲۳]. به شبکه الکتریکی به دست آمده، شبکه مؤلفه خطا یا شبکه افزوده شده می‌گویند. به عبارت دیگر مطابق تئوری جمع آثار، یک شبکه دچار اختلال را می‌توان به دو شبکه جدا از هم، یکی شبکه قبل از وقوع اختلال و دیگری شبکه مؤلفه سوپرایمپوز تقسیم کرد. در فضای دیجیتالی، مؤلفه سوپرایمپوز یک سیگنال نمونه برداری شده حاصل تفریق نمونه فعلی از نمونه متناظر با آن در سیکل قبلی به دست می‌آید. در این مقاله برای استخراج مؤلفه سوپرایمپوز سیگنال نمونه برداری شده از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۴، ۲۵]:

$$\Delta x(k) = x(k) - x(k - nN) - [x(k - nN) - x(k - mN)] \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $x(k)$ نمونه فعلی (نمونه k ام) سیگنال، N تعداد نمونه‌ها در هر سیکل، $x(k - nN)$ نمونه متناظر با نمونه k ام در n سیکل قبل، $x(k - mN)$ نمونه متناظر با نمونه k ام در m سیکل قبل می‌باشند. m و n نیز اعداد صحیح هستند که m بزرگ‌تر از n می‌باشد. در این مقاله مقدار n برابر ۲ و مقدار m برابر ۴ انتخاب شده است. اثر تغییرات دینامیکی بار و نوسان توان روی مؤلفه‌های سوپرایمپوز با استفاده از جمله داخل براکت در رابطه (۱) کاهش می‌یابد. رابطه (۱) مقدار مؤلفه سوپرایمپوز را تنها برای n سیکل بعد از خطا به طور دقیق استخراج می‌کند و مؤلفه استخراجی برای سیکل‌های بعدی دارای دقت کافی نخواهد بود. برای استخراج مؤلفه فازوری (فرکانس اصلی) توالی مثبت مؤلفه سوپرایمپوز سیگنال به دست آمده در (۱)، از الگوریتم فوری تمام سیکل موجود در تجهیزات اندازه‌گیری فازورسنکرون و یا رله‌های دیجیتال مجهز به GPS استفاده می‌شود. ساختار داخلی تجهیز اندازه‌گیری فازورسنکرون برای استخراج مؤلفه فازوری سوپرایمپوز ولتاژ و جریان مطابق شکل (۱) خواهد بود.

۲-۲-۱- مدل سازی عملکرد در خطاهای داخلی

به منظور بررسی عملکرد شاخص نظارتی پیشنهادی در خطاهای داخلی خط، از مدار معادل دیاگرام تک خطی خط انتقال با مدل π نشان داده شده در شکل (۲) استفاده شده است. شکل (۲-ب) شبکه مؤلفه سوپرایمپوز متناظر با شبکه خطادار نشان داده شده در شکل (۲-الف) را نشان می دهد. Z_m و Z_n به ترتیب امپدانس منبع معادل دیده شده از باس های M و N می باشند. با فرض وقوع یک خطای داخلی در نقطه F از خط MN، مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط مطابق روند ذیل به دست خواهد آمد. با توجه به شکل (۲-ب)، مؤلفه فازوری سوپرایمپوز ولتاژ در باس های M و N به صورت زیر به دست می آید:

$$\Delta \bar{U}_m = -Z_m \Delta \bar{I}_m \quad (5)$$

$$\Delta \bar{U}_n = -Z_n \Delta \bar{I}_n \quad (6)$$

مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط تزریق شده به خط MN از باس های

M و N به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta \bar{S}_m = \Delta \bar{U}_m \Delta \bar{I}_m^* = -Z_m |\Delta \bar{I}_m|^2 \quad (7)$$

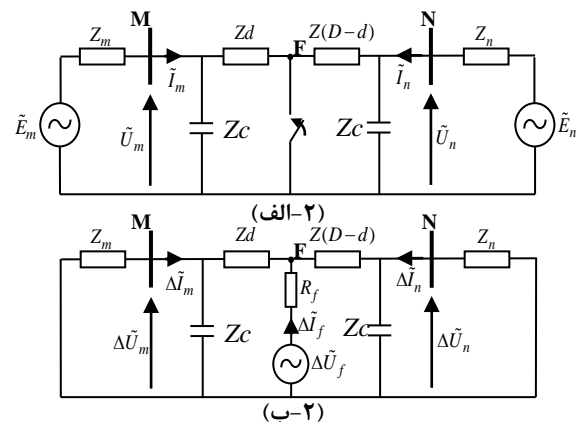
$$\Delta \bar{S}_n = \Delta \bar{U}_n \Delta \bar{I}_n^* = -Z_n |\Delta \bar{I}_n|^2 \quad (8)$$

با توجه به روابط (۷) و (۸)، شاخص نظارتی ارائه شده در رابطه (۲) در خطاهای داخلی به صورت زیر حاصل می گردد:

$$MI_{mn} = \arg(\Delta \bar{S}_m) + \arg(\Delta \bar{S}_n) = \quad (9)$$

$$\angle -Z_m |\Delta \bar{I}_m|^2 + \angle -Z_n |\Delta \bar{I}_n|^2 = \angle -Z_m + \angle -Z_n \approx -180^\circ$$

در شبکه انتقال معمولاً امپدانس معادل تونن دیده شده از هر باس ماهیت سلفی دارد به طوری که امپدانس منبع Z_s را می توان تقریباً با راکتانس منبع X_s برابر دانست؛ بنابراین زاویه فاز امپدانس معادل منبع دیده شده از باس M و N (Z_m و Z_n) را می توان تقریباً برابر با 90° درجه فرض کرد. همان طوری که از رابطه (۹) دیده می شود در هنگام وقوع خطاهای داخلی، مقدار شاخص نظارتی مجموع زاویه فاز امپدانس معادل منبع توالی مثبت دیده شده از دو باس ابتدا و انتهای خط حفاظت شده را منعکس می کند که تقریباً زاویه فازی برابر با 180° درجه خواهد داشت.



شکل ۲: دیاگرام تک خطی توالی مثبت شبکه انتقال در حین وقوع خطای داخلی. (۲-الف): شبکه معادل دارای خطا (۲-ب): شبکه مؤلفه سوپرایمپوز

توجه به این نکته ضروری است که شاخص نظارتی پیشنهادی تحت تأثیر خروجی منبع ولتاژ سوپرایمپوز مدل شده در نقطه خطا قرار نمی گیرد و مستقل از محل وقوع خطا است. به عبارت دیگر، عدم وابستگی شاخص نظارتی به مقدار مقاومت خطا یکی از مهم ترین ویژگی ذاتی این شاخص می باشد که مشکل اضافه برد رله های دیستانس در تشخیص سریع خطاهای با مقاومت را مرتفع می سازد.

۲-۲-۲- مدل سازی عملکرد در خطاهای خارجی

شکل ۳ مدار معادل دیاگرام تک خطی خط انتقال را به همراه شبکه سوپرایمپوز متناظر با وقوع یک خطای متقارن در خارج خط MN و در پشت باس N نشان می دهد. مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در باس M و زاویه فاز آن با توجه به شکل (۳-ب) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta \bar{S}_m = \Delta \bar{U}_m \Delta \bar{I}_m^* = -Z_m |\Delta \bar{I}_m|^2 \quad (10)$$

$$\angle \Delta \bar{S}_m = \angle -Z_m |\Delta \bar{I}_m|^2 = \angle -Z_m \approx -90^\circ \quad (11)$$

همان طور که از رابطه (۱۱) مشاهده می شود، در هنگام وقوع خطای خارجی در نقطه F در پشت باس N، زاویه فاز مربوط به مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در باس M که جهت خطا را در روبروی خود می بیند تقریباً برابر 90° درجه خواهد شد. زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در باس N مطابق روابط زیر استخراج می شود:

$$\Delta \bar{U}_n = ZD \cdot (\Delta \bar{I}_n - I_c) + Z_m \cdot (\Delta \bar{I}_n - 2I_c) \quad (12)$$

با توجه به رابطه (۱۲)، جریان شارژینگ خازنی خط در مقابل مؤلفه سوپرایمپوز جریان خطا عدد کوچکی بوده و می توان از آن صرف نظر کرد بنابراین رابطه (۱۲) به صورت زیر اصلاح می گردد:

$$\Delta \bar{U}_n = (ZD + Z_m) \Delta \bar{I}_n \quad (13)$$

مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط تزریقی از سمت باس N به داخل خط MN با توجه به رابطه (۱۳) به صورت زیر به دست می آید:

$$\Delta \bar{S}_n = \Delta \bar{U}_n \Delta \bar{I}_n^* = (Z_m + ZD) |\Delta \bar{I}_m|^2 \quad (14)$$

$$\approx j(X_m + X_D) |\Delta \bar{I}_m|^2$$

$$\angle \Delta \bar{S}_n = \angle j(X_m + X_D) |\Delta \bar{I}_m|^2 = +90^\circ \quad (15)$$

با توجه به روابط مستخرج در (۱۱) و (۱۵)، مقدار شاخص نظارتی پیشنهادی در خطاهای خارجی که مجموع زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط را ابتدا و انتهای خط منعکس می کند به صورت زیر خواهد بود:

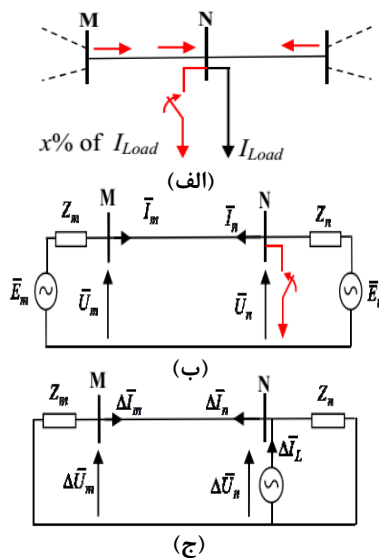
$$MI_{mn} = \arg(\Delta \bar{S}_m) + \arg(\Delta \bar{S}_n) = \quad (16)$$

$$\angle -Z_m |\Delta \bar{I}_m|^2 + \angle (Z_m + ZD) |\Delta \bar{I}_m|^2 \approx 0^\circ$$

همان طور که از رابطه (۱۶) اثبات می شود در حین وقوع خطای خارجی زاویه فازی که شاخص نظارتی خط منعکس می کند عددی نزدیک صفر درجه است. با مقایسه بین روابط (۹) و (۱۶)، عملکرد مؤثر شاخص نظارتی در تشخیص بین خطاهای داخلی خط از خطاهای خارج خط به خوبی اثبات می گردد. همان طور که از روابط (۱۱) و (۱۵) دیده

تحلیل‌شده در شکل (۳-ب) تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی از آنجایی که مقدار شاخص مانیتورینگ مستقل از مدل و مقدار خروجی منبع سوپرایمپوز است می‌توان نتیجه گرفت که همان مدار معادل تحلیل‌شده برای خطاهای خارجی در شکل (۳-ب)، برای تحلیل شرایط تجاوز بار نیز صدق می‌کند با این تفاوت که مقدار جریان تزریقی توسط منبع معادل سوپرایمپوز در نقطه خطا، به جای جریان تحمیلی اتصال کوتاه، برابر با جریان تحمیلی ناشی از تجاوز بار خواهد بود؛ بنابراین انتظار می‌رود که مقدار شاخص نظارتی در شرایط تجاوز بار مشابه با مقدار به‌دست‌آمده آن در شرایط خطای خارجی باشد.

در شرایط نوسان توان نیز نتایج مشابهی قابل استخراج است. از آنجایی که نوسان توان منجر به ایجاد تغییرات مداوم در فلوی عبوری از خط می‌شود، مؤلفه سوپرایمپوز جریان تا زمان تداوم نوسان توان در جهت یکسان در ابتدا و انتهای خط وجود خواهند داشت [۲۶، ۲۷]؛ بنابراین جهت مؤلفه سوپرایمپوز جریان در دو طرف خط با جهت آن در شرایط وقوع خطای خارج خط یکسان خواهد بود و نتایج حاصل از تحلیل مدار شکل (۳-ب) برای وقوع نوسان توان نیز معتبر خواهد بود.

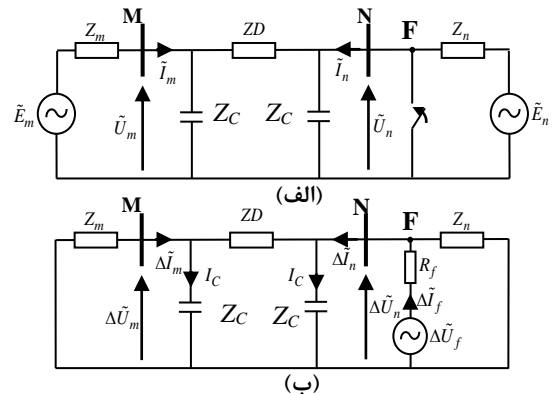


شکل ۴: مدل‌سازی تجاوز بار در شبکه انتقال. (۴-الف): قسمتی از شبکه دچار افزایش بار (۴-ب): مدار معادل شبکه از دید خط MN (۴-ج): مدار معادل سوپرایمپوز تجاوز بار

۳- طرح نظارتی پیشنهادی بر عملکرد صحیح زون ۳ رله‌های دیستانس

همان‌طور که در بخش ۲-۲ اثبات گردید، شاخص نظارتی پیشنهادی در رابطه (۲) به‌طور مؤثری قادر به تشخیص بین خطاهای داخل خط از خطاهای خارجی و تجاوز بار می‌باشد. به‌طوری که در حین وقوع خطاهای داخلی شاخص MI_{mm} منعکس‌کننده مجموع زوایای فاز امپدانس توالی مثبت منابع دیده‌شده از دو باس ابتدا و انتهای خط می‌باشد که تقریباً مقداری برابر با 180° درحالی که زاویه

می‌شود، زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در باس M که خطا در جهت روبرو اتفاق افتاده، نزدیک به 90° درجه و مقدار آن در باس N که خطا در جهت معکوس می‌باشد، مطابق با رابطه (۱۵) نزدیک به $90^\circ +$ درجه می‌شود که نشانگر قابلیت روش پیشنهادی در تشخیص جهت خطا می‌باشد.



شکل ۳: دیاگرام تک‌خطی توالی مثبت شبکه انتقال در حین وقوع خطای خارجی. (۳-الف): شبکه معادل خطادار (۳-ب): شبکه مؤلفه سوپرایمپوز

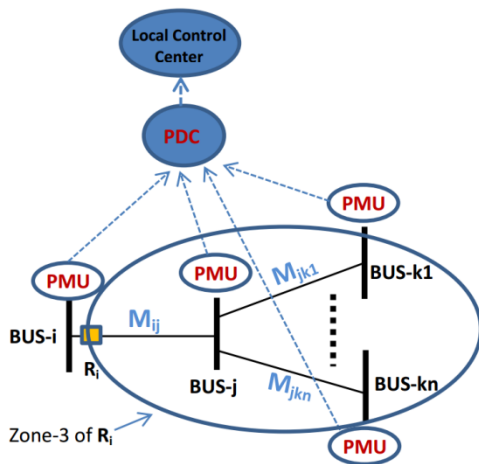
۳-۲-۲-۳- مدل‌سازی عملکرد در شرایط تجاوز بار

شرایط تجاوز بار در اثر انتقال فلوی عبوری خطوط خارج‌شده به خطوط مجاور با بارگذاری سنگین، در شرایط بحرانی سیستم قدرت رخ می‌دهد که می‌تواند منجر به افزایش و تغییر ناگهانی جریان عبوری از خط شده و در بدترین حالت باعث ورود امپدانس بار به زون ۳ رله دیستانس و عملکرد بی‌مورد آن شود. عملکرد بی‌مورد زون ۳ در چنین شرایطی منجر به وخیم‌شدن حادثه شده و احتمال وقوع رخدادهای آبشاری و در نتیجه خاموشی‌های گسترده را افزایش می‌دهد. مطابق با قانون جمع‌آثار، در یک شبکه با منابع مختلف، هر منبع و اثر آن را می‌توان به‌طور مستقل آنالیز کرد. مطابق با این اصل، هر شبکه در معرض وقوع اختلال را می‌توان به دو شبکه، یکی قبل از وقوع اختلال و دیگری شبکه سوپرایمپوز ناشی از اختلال تقسیم کرد؛ بنابراین تغییرات ناگهانی ایجادشده در فلوی عبوری از خط می‌تواند منجر به ایجاد مؤلفه سوپرایمپوز شده به‌طوری که این تغییرات، جریان عبوری از خط را همچون وقوع یک خطای خارج خط تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌منظور مدل‌سازی شرایط تجاوز بار ناشی از انتقال فلوی خطوط دیگر، فرض می‌شود که مطابق با شکل (۴-الف)، بار در باس N افزایش یابد که منجر به تغییر و افزایش فلوی عبوری از خطوط متصل به آن باس می‌شود. شکل (۴-ب) مدار معادل شبکه نشان داده‌شده در شکل (۴-الف) را از دید دو باس ابتدا و انتهای خط MN نشان می‌دهد. تغییرات ایجادشده ناشی از این حادثه، منجر به ایجاد شبکه معادل سوپرایمپوز در شکل (۴-ج) می‌شود که با اعمال قانون جمع آثار مقدار جریان منبع سوپرایمپوز مدل‌شده در باس N، برابر مقدار جریان بار تغییر یافته خواهد بود. تجاوز بار، جریان عبوری از ابتدا و انتهای خط را از دید رله‌های ابتدا و انتهای آن مشابه با حالت خطای خارجی

برای تمام خطوط تحت پوشش زون ۳ هر رله دیستانس مطابق رابطه زیر محاسبه شود:

$$MI_i = \{MI_{ij}, MI_{jk}, \dots, MI_{jn}\}, n=1, \dots, N \quad (19)$$

به طوری که MI_i مجموعه شاخص‌های نظارتی مربوط به خطوط تحت پوشش زون ۳ رله دیستانس i ام واقع در باس i می‌باشد. MI_{ij} شاخص نظارتی مربوط به خط بین باس i و j بوده و MI_{jk} شاخص نظارتی مربوط به خطوط مجاور تحت پوشش زون ۳ رله i می‌باشند. N نیز تعداد خطوط مجاور بعد از خط ij را که تحت پوشش زون ۳ رله i هستند را نشان می‌دهد. سازوکار ارسال اطلاعات از باس‌های تحت پوشش زون ۳ رله دیستانس به مرکز کنترل در شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۶)، اطلاعات فازورسنکرون ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده از باس‌های تحت پوشش زون ۳ رله R_i برای تخصیص یک برجسب زمانی مشترک به منظور سنکرونیسم زمانی به واحد جمع‌کننده داده‌های فازوری PDC، ارسال می‌شوند. سپس اطلاعات فازورسنکرون با یک رفرنس زمانی مشترک، برای محاسبه شاخص نظارتی برای خطوط تحت پوشش زون ۳ رله R_i از طریق کانال ارتباطی مخابراتی همچون فیبر نوری به مرکز کنترل محلی (LCC) ارسال می‌شود. در مواردی که امپدانس وارد زون ۳ رله دیستانس شده ولی هیچ‌یک از شاخص‌های نظارتی خطوط تحت پوشش در محدوده آستانه تعریف شده قرار نداشته باشند در این صورت از عملکرد رله جلوگیری می‌شود.



شکل ۶: سازوکار ارسال اطلاعات به مرکز کنترل جهت محاسبه شاخص نظارتی

برخلاف طرح‌های حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده (WABP) که یک طرح حفاظتی یکپارچه بر اساس اطلاعات فازورسنکرون به دست آمده از تمامی باس‌های شبکه انتقال ارائه می‌کند، طرح پیشنهادی برای نظارت بر عملکرد رله‌هایی که توسط اپراتور آسیب‌پذیر شناخته شده‌اند به کار می‌رود که تنها نیاز به ارسال اطلاعات باس‌های تحت پوشش زون ۳ رله دیستانس برای اعمال نظارت بر عملکرد صحیح آن است؛ بنابراین طرح پیشنهادی سرعت عملکرد بیشتری نسبت به طرح‌های WABP موجود برای تشخیص شرایط خطا از سایر

فاز شاخص نظارتی در حین وقوع خطاهای خارجی و یا تجاوز بار مقداری نزدیک به صفر درجه دارد؛ بنابراین با توجه به این ویژگی، می‌توان از قابلیت شاخص پیشنهادی برای نظارت بر عملکرد زون ۳ رله‌های دیستانس آسیب‌پذیری که در معرض عملکرد بی‌مورد قرار دارند بهره برد و ضمن تشخیص خطاهای متقارن سه فاز رخ داده در حین تجاوز بار از عملکرد بی‌مورد زون ۳ در شرایط بحرانی سیستم قدرت جلوگیری نمود. با لحاظ خطاهای تجهیزات اندازه‌گیری و به منظور تنظیم میزان حساسیت شاخص نظارتی، جهت بهبود قابلیت اطمینان و افزایش حاشیه امنیت طرح نظارتی، معیار تشخیص خطاهای داخلی از خطاهای خارجی و تجاوز بار به صورت زیر ارائه می‌شود:

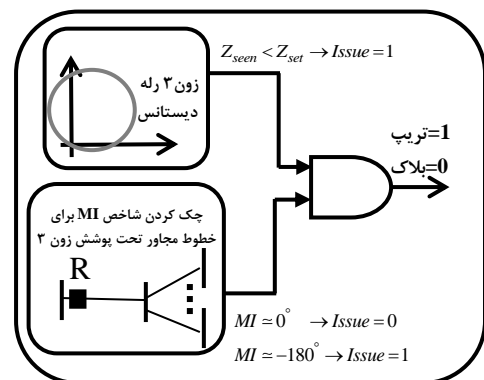
در خطاهای داخلی:

$$-180^\circ - \theta < MI_{mm} < -180^\circ + \theta \quad (17)$$

در خطاهای خارجی یا شرایط تجاوز بار:

$$0^\circ - \theta < MI_{mm} < 0^\circ + \theta \quad (18)$$

θ زاویه حاشیه امنیت می‌باشد که به دلیل امکان وجود خطاهای اندازه‌گیری ناشی از اشباع ترانس جریان، حالت گذرای ترانس ولتاژ و خطای تخمین فازور در نظر گرفته می‌شود و بسته به شرایط و ساختار سیستم قدرت مورد مطالعه می‌تواند در یک مقدار مناسب در محدوده $30^\circ < \theta < 60^\circ$ انتخاب گردد. در این مقاله مقدار θ برابر با 60° در نظر گرفته شده است. اگر زاویه فاز شاخص MI_{mm} برای پنج نمونه متوالی در محدوده تعریف شده در رابطه (۱۷) قرار گیرد وقوع خطای سه فاز در محدوده زون ۳ رله تحت نظارت تشخیص داده می‌شود و در این صورت اجازه عملکرد مطمئن زون ۳ صادر می‌شود. برای نظارت بر عملکرد زون ۳ رله دیستانس، شاخص نظارتی می‌بایست برای هر خط تحت پوشش زون ۳ با استفاده از اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون به دست آمده از PMU ها و یا رله‌های دیجیتال مجهز به GPS موجود در دو طرف خط، محاسبه شود. شکل (۵) نحوه نظارت شاخص MI بر عملکرد صحیح زون ۳ را نشان می‌دهد.



شکل ۵: سازوکار نظارتی بر عملکرد صحیح زون ۳ رله دیستانس

زون ۳ رله‌های دیستانسی که در شبکه توسط اپراتور جزو رله‌های آسیب‌پذیر شناخته شده‌اند می‌توانند به جای بلوک عملکرد آن‌ها، توسط شاخص نظارتی MI تحت نظارت قرار گیرند. شاخص مذکور می‌بایست

باشد و به منظور حفظ امنیت عملکرد رله دیستانس، از عملکرد رله در خطاهای خارج از زون جلوگیری نماید. اثر فاکتورهای همچون مقاومت خطا، محل خطا و لحظه وقوع خطا بر عملکرد شاخص پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول (۱) نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد. زمان وقوع تمامی خطاها در لحظه ۱ ثانیه بوده و مقدار MI متناسب با نمونه متوالی پنجم است که در داخل محدوده تعریف شده در رابطه (۱۷) یا (۱۸) قرار می‌گیرد. نتایج نشان داده شده عملکرد صحیح شاخص MI را در تشخیص مطمئن خطاهای متقارن داخلی از خارجی را در بازه زمانی کمتر از یک سیکل نشان می‌دهد.

جدول ۱: بررسی تأثیر محل خطا، لحظه وقوع خطا و مقاومت خطا بر شاخص نظارتی پیشنهادی MI

اثر محل وقوع خطای سه فاز ABC					
محل خطا	لحظه تشخیص خطا (ثانیه)	MI_{26-27}		MI_{27-17}	
		$\angle \Delta S^\circ$ 26-27	$\angle \Delta S^\circ$ 27-26	$\angle \Delta S^\circ$ 27-17	$\angle \Delta S^\circ$ 17-27
وسط خط ۲۷-۲۶	۱/۰۰۹	-۱۸۱		-۸	
		-۸۶	-۹۵	+۹۶	-۱۰۴
وسط خط ۱۷-۲۷	۱/۰۰۹	+۳		-۱۸۲	
		-۸۵	+۸۸	-۸۵	-۹۷
اثر لحظه وقوع خطای سه فاز ABC در وسط خط (۲۷-۲۶)					
لحظه وقوع خطا (ثانیه)	لحظه تشخیص خطا (ثانیه)	MI_{26-27}		MI_{27-17}	
		$\angle \Delta S^\circ$ 26-27	$\angle \Delta S^\circ$ 27-26	$\angle \Delta S^\circ$ 27-17	$\angle \Delta S^\circ$ 17-27
۱/۰۰۲	۱/۰۱۱	-۱۸۱		-۱۳	
		-۸۵	-۹۶	+۹۲	-۱۰۵
۱/۰۰۸	۱/۰۱۷	-۱۸۵		-۴	
		-۸۷	-۹۸	+۹۷	-۱۰۱
۱/۰۱۵	۱/۰۲۴	-۱۸۹		-۱۲	
		-۹۲	-۹۷	+۹۵	-۱۰۷
۱/۰۰۲	۱/۰۰۳	-۱۸۵		-۶	
		-۸۴	-۱۰۱	+۹۶	-۱۰۲
اثر مقاومت خطا (ABC) در وسط خط (۲۶-۲۷)					
مقاومت خطا (اهم)	لحظه تشخیص خطا (ثانیه)	MI_{26-27}		MI_{27-17}	
		$\angle \Delta S^\circ$ 26-27	$\angle \Delta S^\circ$ 27-26	$\angle \Delta S^\circ$ 27-17	$\angle \Delta S^\circ$ 17-27
۰	۱/۰۰۹	-۱۷۹		-۵	
		-۸۵	-۹۴	+۹۳	-۹۸
۱۰۰	۱/۰۰۹	-۱۸۵		-۷	
		-۸۰	-۱۰۵	+۹۵	-۱۰۲

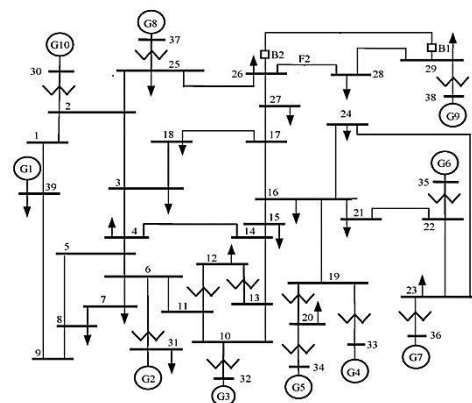
۴-۲- بررسی عملکرد شاخص نظارتی در شرایط تجاوز بار استاتیکی

پدیده تجاوز بار به ورود بی‌مورد امپدانس بار به ناحیه زون ۳ رله دیستانس در شرایط بارگذاری سنگین اطلاق می‌شود که ناشی از

اتفاقات متقارن شبکه خواهد داشت. با توجه مراجعی که تأخیر مخابراتی مربوط به طرح‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده را مدل می‌کنند [۲۸-۲۹]، تأخیر عملکرد طرح نظارتی پیشنهادی تنها ناشی از تأخیر مربوط به فرآیند استخراج فازور، تأخیر مخابراتی مربوط به ارسال داده‌ها به PDC و مرکز کنترل، تأخیر اجرای الگوریتم و در نهایت تأخیر مربوط به ارسال فرمان قطع و عملکرد بریکر خواهد بود که مجموع زمان مربوط به این فرآیند کمتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه می‌باشد که در مقایسه با تأخیر عملکرد زون ۳ که در بازه ۰/۸ الی ۱ ثانیه است، قابل قبول می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی و آنالیز صحت عملکرد

به منظور ارزیابی و تأیید قابلیت شاخص نظارتی پیشنهادی، عملکرد آن به ازای شرایط مختلف سیستم قدرت روی سیستم استاندارد IEEE-39 BUS مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۷]. سیستم تست در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود و سیگنال‌های ولتاژ و جریان به‌دست‌آمده از باس‌های موردنیاز در اتفاقات مختلف سیستم برای تخمین فازور و محاسبه شاخص نظارتی به نرم‌افزار MATLAB ارسال می‌شود. از مدل خط با پارامترهای توزیع شده استفاده شده است و منابع با ژنراتور سنکرون با AVR و گاورنر مدل شده‌اند. سیگنال‌های اندازه‌گیری شده ابتدا از یک فیلتر پایین‌گذر antialiasing عبور داده می‌شوند و سپس از الگوریتم فوریه تمام سیکل DFT با نرخ نمونه‌برداری ۲۰ نمونه بر سیکل تخمین فازور زده می‌شوند. زون ۳ رله دیستانس در هر خط طوری تنظیم شده‌اند که کل خط اصلی و نیز طول بلندترین خط بعدی را نیز پوشش دهد. در ادامه عملکرد شاخص نظارتی پیشنهادی در شرایط مختلفی همچون خطاهای سه‌فاز داخل و خارج خط، شرایط تجاوز بار استاتیکی، شرایط نوسان توان و نیز شرایط خطای سه‌فاز در طی تجاوز بار مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۷: دیاگرام تک‌خطی سیستم IEEE ۳۹ باسه New England

۴-۱- بررسی عملکرد شاخص نظارتی در خطاهای متقارن سه‌فاز داخلی و خارجی

شاخص نظارتی می‌بایست برای حفظ قابلیت اعتماد طرح حفاظتی قادر به تشخیص خطاهای سه‌فاز داخل زون از خطاهای سه‌فاز خارج زون

شکل (۸-الف) ورود امپدانس بار به زون ۳ رله R26-27 را در چنین شرایطی نشان می‌دهد که عملکرد آن منجر به خروج بی‌مورد خطوط ۲۶-۲۷ و ۱۷-۲۷ می‌شود. خروجی شاخص نظارتی MI در خطوط تحت پوشش زون ۳ رله R26-27 در شکل (۸-ب) و (۸-ج) نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر عدم وقوع یک خطای داخل زون ۳ می‌باشد که در این شرایط می‌بایست از عملکرد زون ۳ جلوگیری نمود؛ بنابراین شاخص پیشنهادی به‌طور مؤثری عملکرد زون ۳ را در چنین شرایطی پشتیبانی و نظارت می‌کند.

۴-۳- بررسی عملکرد شاخص نظارتی در شرایط وقوع خطای سه‌فاز در حین تجاوز بار استاتیکی

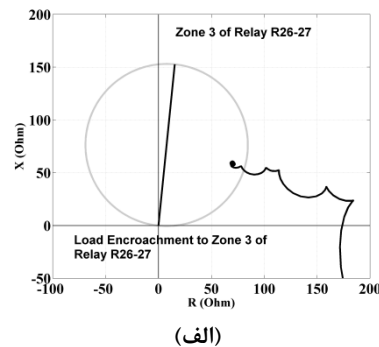
طرح‌های متداول محدودکننده مشخصه زون ۳ برای جلوگیری از تجاوز بار، قابلیت اعتماد رله را در تشخیص خطاهای سه فاز با مقاومت را که امپدانس دیده‌شده آن‌ها در ناحیه بلوک شده قرار می‌گیرد، کاهش می‌دهد. از طرفی در شرایط تحت استرس سیستم قدرت با وضعیت بارگذاری سنگین در ضریب توان پایین، احتمال عملکرد بی‌مورد رله همچنان پابرجاست. از طرفی به‌دلیل طبیعت متقارن پدیده تجاوز بار و عدم وجود جریان توالی صفر و منفی، تشخیص خطاهای سه‌فاز رخ‌داده در طی شرایط تجاوز بار فرآیندی پیچیده می‌باشد؛ به‌طوری که در این شرایط رله می‌بایست با تشخیص وقوع خطا دارای عملکرد به‌موقع باشد [۱۶، ۱۷، ۲۱]. برای ارزیابی عملکرد شاخص MI در چنین شرایطی، یک خطای سه‌فاز با مقاومت ۱۰۰ اهم در طی تجاوز بار در باس ۲۷، در خط ۱۷-۲۷ شبیه‌سازی می‌شود. نتایج متناظر در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل (۹-الف) تغییرات مکان هندسی امپدانس دیده‌شده توسط رله R26-27 را در حین وقوع خطای سه‌فاز در شرایط تجاوز بار را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۹-ج) ابتدا به دلیل تجاوز بار، شاخص MI خط ۱۷-۲۷ زاویه فاز نزدیک به صفر درجه را نشان می‌دهد به‌طوری که در حین وقوع خطای سه‌فاز در این خط در لحظه ۱۰۰۸ ثانیه، زاویه فاز مربوطه بلافاصله از صفر درجه به ۱۸۰- درجه تغییر پیدا می‌کند که نشان‌گر عملکرد صحیح شاخص نظارتی در تشخیص مطمئن و سریع خطاهای سه فاز در حین تجاوز بار می‌باشد. شاخص نظارتی مربوط به خط ۲۶-۲۷ نیز به‌درستی در شرایط تجاوز بار زاویه فاز نزدیک به صفر را نشان می‌دهد که نشان‌گر عدم وجود خطا در این خط می‌باشد.

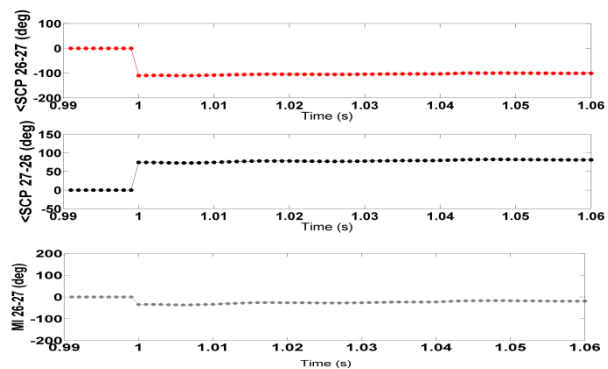
۴-۴- بررسی عملکرد شاخص نظارتی در شرایط وقوع نوسان توان ناپایدار

یکی از عوامل مهم دیگر در عملکرد بی‌مورد زون ۳ رله دیستانس وقوع نوسان‌های توان ناشی از خروج خطوط و عملیات کلیدزنی می‌باشد. در چنین شرایطی برای جلوگیری از عملکرد بی‌مورد رله، آن را بلوک می‌کنند. به‌منظور بررسی عملکرد شاخص MI طی نوسان‌های توان، یک خطای سه‌فاز در خط ۲۹-۲۶ نزدیک به باس ۲۹ در لحظه ۰/۷

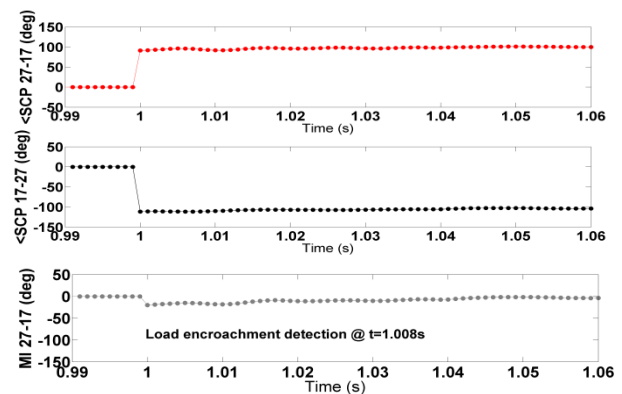
انتقال توان خطوط خارج‌شده به خطوط بارگذاری سنگین رخ می‌دهد. زون ۳ رله دیستانس در چنین شرایطی برای حفظ امنیت عملکرد سیستم، نباید عمل کند. با در نظر گرفتن شرایط بارگذاری اضطراری تعریف‌شده توسط NERC، به‌منظور ایجاد شرایط تجاوز بار، بار موجود در باس ۲۷ به تدریج افزایش می‌یابد به‌طوری که منجر به افزایش فلو عبوری از خطوط مجاور ۲۶-۲۷ و ۱۷-۲۷ شده و منجر به ورود امپدانس بار به زون ۳ رله دیستانس R26-27 می‌گردد. این پدیده، همانند وقوع یک خطای خارجی واقع در باس ۲۷ می‌باشد که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



(الف)



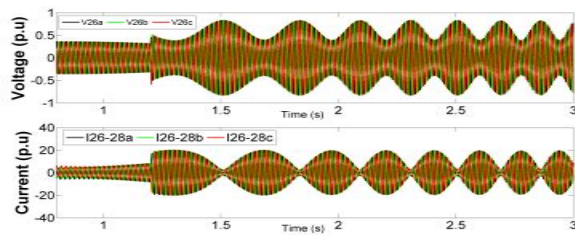
(ب)



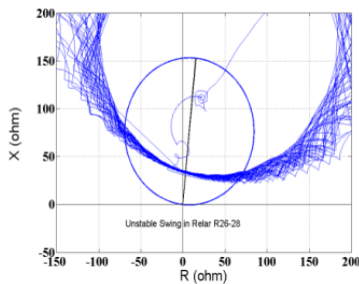
(ج)

شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی طی تجاوز بار استاتیکی، (الف): مکان هندسی امپدانس دیده‌شده توسط رله R26-27. (ب): زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۲۶-۲۷ به همراه شاخص نظارتی مربوطه (ج): زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۱۷-۲۷ به همراه شاخص نظارتی مربوطه.

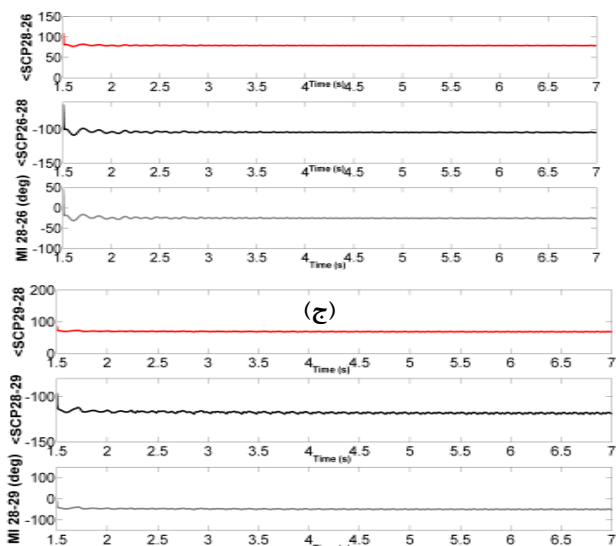
هریک از خطوط مذکور می باشد؛ بنابراین شاخص نظارتی قادر است تا از عملکرد بی مورد زون ۳ در طی شرایط نوسان توان جلوگیری نماید.



(الف)



(ب)

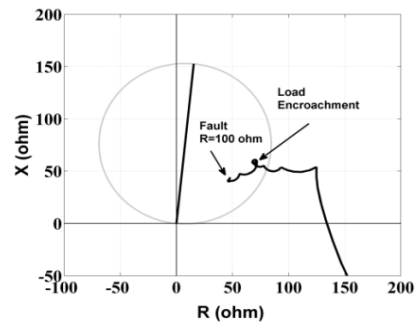


(ج)

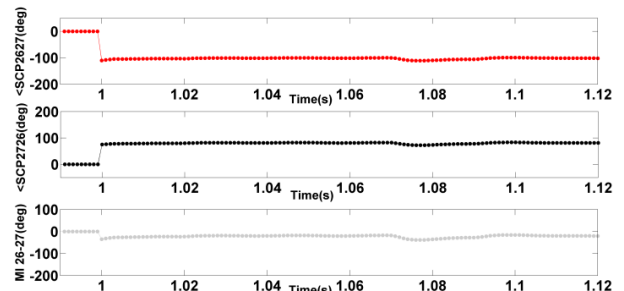
شکل ۱۰: نتایج شبیه سازی طی نوسان توان ناپایدار، (الف): ولتاژ و جریان در محل رله R26-28، (ب): مکان هندسی امیدانس دیده شده توسط رله R26-28، (ج): شاخص نظارتی و زاویه فاز مؤلفه سوپر ایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۲۶-۲۸، (د): شاخص نظارتی و زاویه فاز مؤلفه سوپر ایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۲۸-۲۹.

۴-۵- بررسی عملکرد شاخص نظارتی در خطوط جبران شده سری

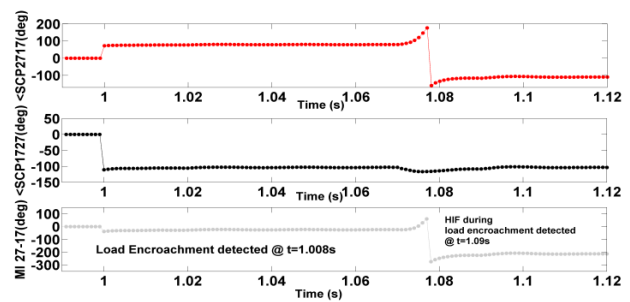
خطوط انتقال بلند، به منظور افزایش قابلیت انتقال توان و بهبود پروفیل ولتاژ از خازن های جبران کننده سری استفاده می کنند. حفاظت خطوط جبران شده سری نیز توسط رله دیستانس همراه با مشکلاتی است که این مشکلات شامل تغییر برد رله دیستانس و اختلال در تعیین جهت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹: نتایج شبیه سازی برای خطای سه فاز با مقاومت ۱۰۰ اهم در خط ۱۷-۲۷ طی تجاوز بار استاتیکی، (الف): مکان هندسی امیدانس دیده شده توسط رله R26-27، (ب): زاویه فاز مؤلفه سوپر ایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۲۶-۲۷ به همراه شاخص نظارتی مربوطه، (ج): زاویه فاز مؤلفه سوپر ایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۱۷-۲۷ به همراه شاخص نظارتی مربوطه

ثانیه ایجاد می شود و پس از ۰/۵ ثانیه با باز شدن کلیدهای دو طرف خط اثر خطا حذف می شود. این عملیات منجر به وقوع یک نوسان توان ناپایدار شده و سیگنال های ولتاژ و جریان در محل رله R26-28 در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است. امیدانس دیده شده توسط رله R26-28 در حین نوسان توان ناپایدار مطابق شکل (۱۰-ب) به صورت متناوب از داخل زون ۳ رله عبور می کند. با توجه به این که نوسان توان منجر به ایجاد تغییرات متناوب جریان/توان عبوری از خطوط ۲۶-۲۸ و ۲۸-۲۹ می شود، مؤلفه سوپر ایمپوز جریان به طور مداوم در جهت یکسان در دو طرف ابتدا و انتهای خط وجود خواهد داشت؛ بنابراین مشابه با وقوع یک خطای خارجی نزدیک به باس ۲۹ در خط ۲۶-۲۹، مقدار زاویه فاز شاخص نظارتی MI در خطوط ۲۶-۲۸ و ۲۸-۲۹ مطابق با شکل (۱۰-ج) و (۱۰-د) خواهد بود که نشان گر عدم وجود خطای داخلی در

می‌دهد. همچنین شکل (۱۱) نتایج مربوط به وقوع خطای سه فاز در ۲۵ درصد ابتدای خط ۲۶-۲۸ را نشان می‌دهد.

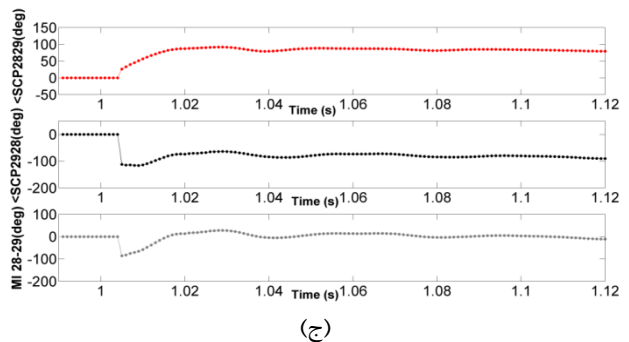
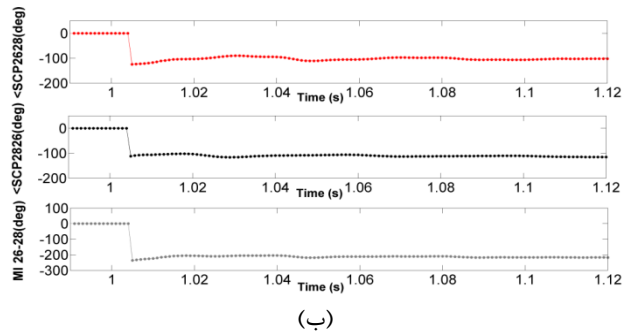
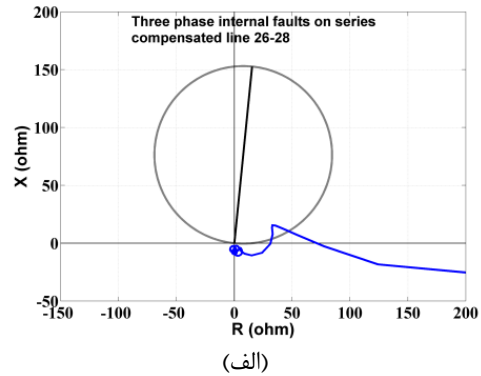
همان طوری که در شکل (۱۱-الف) دیده می‌شود به دلیل پدیده معکوس شدن ولتاژ امیدانس دیده شده توسط رله در خارج از زون و در جهت معکوس خواهد بود. با این وجود نتایج مربوط به عملکرد شاخص نظارتی در شکل‌های (۱۱-ب) و (۱۱-ج) حاکی از تشخیص درست خطای سه فاز در خط جبران شده سری ۲۶-۲۸ می‌باشد.

همان طوری که در رابطه (۹) اثبات شد مقدار زاویه فاز شاخص نظارتی MI در خطاهای داخل خط به محل وقوع خطا و پارامترهای خط حفاظت شونده بستگی ندارد بلکه منعکس کننده زاویه فاز امیدانس‌های معادل توالی مثبت دیده شده از دو باس ابتدا و انتهای خط است؛ بنابراین انتظار می‌رود که جبران کننده سری خط در خطاهای داخلی اثری بر عملکرد و مقدار زاویه فاز شاخص نظارتی نداشته باشد. از طرفی در هنگام وقوع خطای خارجی زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در باسی که خطا پشت سر آن قرار دارد مطابق با رابطه (۱۴) به زاویه فاز مجموع امیدانس خط حفاظت شونده و امیدانس معادل دیده شده از سمت باس دیگر بستگی دارد که حتی با حضور خازن سری مقدار این زاویه فاز عددی مثبت و بین ۶۰ الی ۹۰ درجه می‌باشد. لذا مقدار شاخص نظارتی در این حالت نیز در محدوده تعریف شده (۱۸) برای خطاهای خارجی خواهد بود؛ بنابراین همان طوری که مشاهده می‌شود شاخص نظارتی پیشنهادی تحت تأثیر حضور جبران کننده سری خط قرار نمی‌گیرد و قادر به تشخیص مطمئن خطاهای سه فاز داخلی و خارجی در حضور جبران کننده‌های سری است. با توجه به نتایج به دست آمده در حضور خازن سری می‌توان انتظار داشت که شاخص نظارتی پیشنهادی در حضور ادوات FACT و تجهیزات محدود کننده جریان خطا FCL، که تغییری در امیدانس سری خط حفاظت شونده ایجاد می‌کنند، می‌تواند عملکرد قابل قبولی داشته باشد. با این وجود به دلیل محدودیت صفحه بررسی عملکرد شاخص نظارتی در حضور این تجهیزات می‌تواند موضوع کار تحقیقاتی در مقالات آینده باشد.

جدول ۲: بررسی تأثیر جبران سازی سری بر شاخص نظارتی

پیشنهادی MI

اثر وقوع خطا در داخل و خارج خط جبران شده ۲۶-۲۸					
محل خطا	لحظه تشخیص خطا (ثانیه)	MI ₂₆₋₂₈		MI ₂₈₋₂₉	
		∠ΔS° 26-28	∠ΔS° 28-26	∠ΔS° 28-29	∠ΔS° 29-28
وسط خط ۲۸-۲۶	۱/۰۱۲	-۱۹۲		-۹	
		-۹۵	-۹۷	+۸۵	-۹۴
وسط خط ۲۹-۲۸	۱/۰۱۲	-۱۳		-۱۸۹	
		-۹۳	+۸۰	-۹۴	-۹۵



شکل ۱۱: نتایج حاصل وقوع خطای سه فاز در خط جبران شده سری ۲۶-۲۸ (الف): مکان هندسی امیدانس دیده شده توسط رله R2628 (ب): زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۲۶-۲۸ به همراه شاخص نظارتی مربوطه (ج): زاویه فاز مؤلفه سوپرایمپوز توان مختلط در دو طرف خط ۲۸-۲۹ به همراه شاخص نظارتی مربوطه

خطا توسط رله دیستانس می‌باشد. در وقوع خطا در خطوط جبران شده سری وجود امیدانس خازنی باعث کاهش امیدانس سلفی بین رله تا محل وقوع خطا می‌شود که این حالت منجر به افزایش برد رله دیستانس برای خطاهای خارجی بعد از شین انتهایی خط و کاهش برد آن برای خطاهای نزدیک به خازن موجود در ابتدای خط خواهد شد؛ بنابراین به منظور ارزیابی عملکرد شاخص نظارتی در حضور جبران کننده‌های سری، یک خازن سری در ابتدای خط ۲۶-۲۸ با درجه جبران سازی کلی ۷۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. نتایج مربوط به عملکرد شاخص MI به ازای وقوع خطای سه فاز در وسط خطوط ۲۸-۲۶ و ۲۶-۲۹ که تحت پوشش زون ۳ رله R26-28 هستند در جدول ۲ نشان داده شده است که عملکرد مطلوب شاخص MI را در تشخیص خطاهای داخلی از خارجی در خطوط جبران شده سری را نشان

۴-۶- مقایسه طرح پیشنهادی با سایر طرح‌ها

سه فاز از تجاوز بار منجر به بهبود در امنیت عملکرد زون ۳ رله می‌گردند.

• در [۱۷]، زاویه فاز امیدانس توالی مثبت دیده شده توسط رله و تابع مانیتورینگ گذاری به دست آمده از جریان سه فاز به عنوان دو معیاری برای نظارت بر عملکرد صحیح زون ۳ رله دیستانس جهت تشخیص شرایط خطای سه فاز از سایر پدیده‌های متقارن ارائه می‌شود. همچون مرجع [۱۶]، طرح ارائه شده در این مقاله نیز نیاز به دو معیار جداگانه برای تشخیص خطاهای سه فاز از تجاوز بار را دارد در حالی که روش پیشنهادی در این مقاله تنها با استفاده از شاخص نظارتی محاسبه شده از اطلاعات دو طرف خطوط تحت پوشش زون ۳ قادر به تشخیص شرایط خطای سه فاز از شرایط تجاوز بار است؛ بنابراین پیچیدگی محاسباتی روش ارائه شده در این مقاله کمتر از روش ارائه شده در [۱۷] می‌باشد. از طرف دیگر برای تشخیص شرایط خطای سه فاز از شرایط تجاوز بار، از زاویه فاز امیدانس دیده شده توسط رله که همان زاویه فاز توان عبوری از محل رله است استفاده می‌شود. چنانچه زاویه فاز امیدانس دیده شده کمتر از ۴۵ درجه باشد شرایط تجاوز بار محرز می‌شود و چنانچه زاویه فاز مربوطه عددی بزرگتر از ۴۵ درجه باشد خطای سه فاز شناسایی می‌گردد. ایراد عمده این روش عدم تضمین تشخیص خطاهای سه فاز با مقاومت خطای بالا می‌باشد به طوری که در این وضعیت به دلیل مقاومت خطا، زاویه فاز امیدانس دیده شده توسط رله ممکن است کمتر از مقدار آستانه ۴۵ درجه باشد و خطای سه فاز با حضور مقاومت تشخیص داده نشود. از طرفی در هنگام وقوع شرایط بارگذاری سنگین با ضریب توان پایین که در آن فلوی توان راکتیو خط قابل توجه می‌باشد، زاویه فاز امیدانس دیده شده عددی بزرگتر از ۴۵ درجه خواهد بود و لذا امکان تشخیص این نوع تجاوز بار از طرح مذکور سلب خواهد شد لذا طرح مرجع [۱۷] نمی‌تواند به طور کامل و در همه شرایط منجر به بهبود امنیت و قابلیت اعتماد زون ۳ رله دیستانس شود. در حالی که روش پیشنهادی در این مقاله مطابق با نتایج بخش ۴-۲ و ۴-۳ می‌تواند خطاهای سه فاز با مقاومت خطای بالا در حین تجاوز بار را تشخیص داده و نقص روش پیشنهادی در [۱۷] را برطرف نماید.

• در [۱۸]، یک روش طبقه‌بندی اتفاقات مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان به عنوان یک روش نظارتی بر عملکرد صحیح زون ۳ مطرح شده است که قادر است تا شرایط خطاهای سه فاز را از سایر اتفاقات همچون شرایط ناپایداری ولتاژ و شرایط نوسان توان تفکیک نماید. عمده هدف مورد مطالعه در مرجع [۱۸]، تشخیص خطاهای متقارن سه فاز از شرایط تجاوز بار دینامیک همچون نوسان توان و ناپایداری ولتاژ است به طوری که پدیده تجاوز بار استاتیک بررسی نشده است. در حالی که نوآوری روش پیشنهاد شده در این مقاله ارائه یک شاخص نظارتی مبتنی بر مؤلفه‌های سوپرایمپوز برای تشخیص خطاهای سه فاز از شرایط تجاوز بار استاتیک

روش پیشنهادی در این مقاله همچون طرح‌های پیشنهادی در مقالات [۱۶-۱۸] از قابلیت اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون به دست آمده از باس‌های شبکه برای نظارت بر عملکرد صحیح زون ۳ رله دیستانس در شرایط بحرانی استفاده می‌کند. هدف این مقاله، تشخیص شرایط تجاوز بار استاتیکی از شرایط خطاهای متقارن سه فاز جهت جلوگیری از عملکرد بی‌مورد رله است که امنیت عملکرد زون ۳ رله دیستانس را بهبود می‌بخشد. همچنین روش پیشنهادی با تشخیص خطاهای سه‌فازی که در حین شرایط تجاوز بار رخ می‌دهد، منجر به بهبود قابلیت اعتماد زون ۳ رله دیستانس می‌گردد. روش پیشنهادی نسبت به روش‌های ارائه شده در مراجع [۱۶-۱۸] دارای برتری‌هایی به شرح ذیل می‌باشد:

• در [۱۶]، ابتدا یک استراتژی برای ناحیه‌بندی سیستم قدرت بر اساس جابجایی بهینه PMUها ارائه می‌گردد و بر اساس مکان PMUها، شبکه به چند ناحیه رؤیت‌پذیر تقسیم می‌شود. طرح ارائه شده، برای تشخیص خطای سه فاز از نوسان توان و تجاوز بار در هر ناحیه، نیاز به مقایسه اندازه امیدانس ظاهری دیده شده توسط رله‌های موجود در باس‌های مجهز به PMU محصورکننده آن ناحیه دارد در حالی که روش پیشنهادی در این مقاله تنها نیاز به محاسبه شاخص نظارتی در خطوط تحت پوشش زون ۳ رله داشته و مستقل از اندازه امیدانس دیده شده توسط سایر رله‌ها است. لذا قابلیت اعتماد روش پیشنهادی به دلیل عدم وابستگی آن به امیدانس دیده شده توسط سایر رله‌ها بالاتر از روش مرجع [۱۶] است. از طرفی روش ارائه شده در [۱۶]، افزون بر این، نیاز به یک شاخص مبتنی بر مجموع جریان‌های اندازه‌گیری شده از PMUهای محصورکننده هر ناحیه برای تشخیص شرایط وقوع خطا را دارد تا بتواند ناحیه معیوب را در سیستم شناسایی کند؛ انتخاب یک مقدار آستانه مطمئن برای شاخص جریان نیز یکی از چالش‌هایی است که می‌تواند امنیت طرح پیشنهادی را با مشکل مواجه کند. در حالی که روش پیشنهادی در این مقاله تنها بر اساس شاخص نظارتی محاسبه شده از مؤلفه‌های سوپرایمپوز، قادر به تشخیص مستقیم خطاهای سه فاز از تجاوز بار بوده و نیازی به شاخص کمکی دیگری ندارد. لذا طرح پیشنهادی در این مقاله پیچیدگی کمتری نسبت به طرح ارائه شده در [۱۶] دارد. از طرفی از آنجاکه برای نظارت بر عملکرد هر رله بحرانی تنها نیاز به جمع‌آوری اندازه‌گیری‌ها از باس‌های تحت پوشش زون ۳ آن رله است و نیازی به اندازه‌گیری از سایر باس‌ها نمی‌باشد لذا به دلیل حجم پایین اندازه‌گیری‌ها و تسهیل ارسال آن‌ها به مرکز کنترل، سرعت عملکرد روش پیشنهادی بالاتر از سرعت عملکرد طرح ارائه شده در [۱۶] خواهد بود که نیازمند ارسال اطلاعات از تمامی باس‌ها به مرکز کنترل است. همچنین لازم به ذکر است که هر دو طرح پیشنهادی در این مقاله و مرجع [۱۶]، به دلیل قابلیت تشخیص خطاهای

- عدم تأثیرپذیری شاخص نظارتی پیشنهادی از مقاومت خطای بالا.
 - عدم تأثیرپذیری شاخص نظارتی پیشنهادی از شرایط بارگذاری قبل از وقوع خطا و مستقل از جهت عبور توان (به دلیل استفاده از شبکه معادل سوپرایمپوز).
 - قابلیت به کارگیری شاخص نظارتی برای خطوط جبران شده.
- از قابلیت طرح حفاظتی می توان در طرح های حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده برای شبکه های انتقال در حضور انواع جبران کننده های سری انعطاف پذیر بهره برد. شاخص نظارتی پیشنهادی در کنار مزایایی که دارد، عملکرد صحیح آن وابسته به صحت عملکرد سیستم مخابراتی و وجود اطلاعات فازور سنکرون از باس های تحت پوشش زون ۳ است؛ بنابراین یکی از نکات ضعف طرح پیشنهادی آن است که در صورت وجود اشکال در PMU ها و یا سیستم مخابراتی مورداستفاده، امنیت طرح نظارتی پیشنهادی در معرض ریسک قرار می گیرد.

مراجع

- [1] A. G. Phadke, and J. S. Thorp, "Expose hidden failures to prevent cascading outages" *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 9, no. 3, pp.20-23, 1996.
- [2] Powergrid, "Report of the enquiry committee on grid disturbance in northern region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern and North-Eastern Region on 31st July 2012," *Tech Rep. GRID_ENQ_REP_16_8_12*, New Delhi, India, 2012.
- [3] J. Khodaparast, & M. Khederzadeh, "Three-phase fault detection during power swing by transient monitor" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2558-2565, 2015.
- [4] A. P. Apostolov, D. Tholomier, S. H. Richards, "Distance protection and dynamic loading of transmission lines" *In IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 100-105, 2004.
- [5] وحید فتحی و هیرش سیدی، «بهبود عملکرد رله های دیستانس در حفاظت خطوط انتقال کوتاه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳، شماره ۲، صفحات ۲۱-۲۹، ۱۳۹۲.
- [6] عباس صابری نوقابی و نادر هاتفی ترشیزی، «تنظیم بهینه رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۲۲۱-۲۳۱، ۱۳۹۵.
- [7] C. H. Kim, J. Y. Heo, and R. K. Aggarwal, "An enhanced zone 3 algorithm of a distance relay using transient components and state diagram," *IEEE Trans. Power Deliv*, vol. 20, no. 1, pp. 39-46, 2005.
- [8] S. Das, R. Dubey, B. K. Panigrahi, and S. R. Samantaray, "Secured zone-3 protection during power swing and voltage instability: an online approach," *IET Gener. Transm. Distrib*, vol. 11, no. 2, pp. 437-446, 2017.
- [9] M. M. Eissa, M. E. Masoud, and M. A. Elanwar, "A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit" *IEEE Trans. Power Deliv*, vol. 25, no. 1, pp. 270-278, 2010.
- [10] Z. He, Z. Zhang, W. Chen, O.P. Malik, and X. Yin, "Wide-area backup protection algorithm based on fault component

می باشد. از طرفی روش ارائه شده در [۱۸]، نیازمند به حجم زیادی از شبیه سازی ها برای ایجاد سناریوهای مختلفی از شرایط وقوع خطا برای آموزش روش ماشین بردار پشتیبان می باشد که پیچیدگی طرح پیشنهادی را افزایش می دهد. از طرفی وابستگی عملکرد صحیح طرح مذکور به فرآیند یادگیری کامل ماشین بردار پشتیبان، امنیت و قابلیت اعتماد طرح ارائه شده را تحت تأثیر قرار می دهد. در حالی که روش ارائه شده در این مقاله تنها نیاز به اندازه گیری فازور سنکرون ولتاژ و جریان از باس های تحت پوشش زون ۳ را دارد تا بتواند با محاسبه شاخص نظارتی شرایط خطای سه فاز را از تجاوز بار تشخیص دهد. همچنین طرح ارائه شده در [۱۸]، جهت تفکیک بین خطا از سایر اتفاقات متقارن، علاوه بر فازور ولتاژ و جریان نیاز به اندازه گیری توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط را نیز دارد؛ بنابراین تعداد اندازه گیری های بیشتری برای پیاده سازی روش ارائه شده در [۱۸] نیاز است که این موضوع پیچیدگی و سرعت طرح ارائه شده را نیز تحت تأثیر قرار می دهد.

۵- نتیجه گیری

زون ۳ رله دیستانس در تشخیص سریع خطاهای متقارن سه فاز از سایر اختلالات سیستم قدرت همچون تجاوز بار استاتیکی و دینامیکی دچار مشکل است. به طوری که عملکرد بی مورد زون ۳ طی شرایط بحرانی سیستم قدرت می تواند منجر به وقوع خروج های آبخاری و در نتیجه فروپاشی گسترده سیستم قدرت شود. در این مقاله یک شاخص نظارتی مبتنی بر مؤلفه های سوپرایمپوز توان مختلط پیشنهاد می شود که از اندازه گیری های فازور سنکرون دو طرف خطوط تحت پوشش زون ۳ رله دیستانس به دست می آید که به عنوان معیاری برای تشخیص خطاهای متقارن سه فاز از تجاوز بار به کار گرفته می شود. نتایج شبیه سازی، کارایی و قابلیت شاخص پیشنهادی را در تشخیص سریع و مطمئن شرایط خطا از شرایط تجاوز بار نشان می دهند. به طور کلی روش پیشنهادی نسبت به روش های موجود دارای برتری و مزیت هایی به صورت زیر است:

- برخلاف طرح های حفاظتی پشتیبان ناحیه گسترده که نیاز به جمع آوری اطلاعات فازوری ولتاژ و جریان از تمامی باس های شبکه برای تشخیص ناحیه خطا و خط معیوب دارد، روش نظارتی پیشنهادی فقط نیاز به اطلاعات باس های تحت پوشش زون ۳ رله های دیستانسی که توسط اپراتور آسیب پذیر شناخته شده اند دارد؛ بنابراین تأخیر مخابراتی کمتری در این روش وجود خواهد داشت.
- تشخیص سریع خطاهای سه فاز رخ داده با مقاومت در حین تجاوز بار در بازه زمانی کمتر از یک سیکل و بهبود قابلیت اعتماد زون ۳ رله دیستانس.
- تشخیص پدیده تجاوز بار و جلوگیری از عملکرد بی مورد زون ۳ رله دیستانس و در نتیجه بهبود امنیت زون ۳ رله دیستانس.

- [20] T. G. Bolandi, M. R. Haghifam, and M. Khederzadeh, "Real Time Monitoring of Zone 3 Vulnerable Distance Relays to Prevent Maloperation under Load Encroachment Condition," *IET Genr. Transm. Distrib.* vol. 11, no. 8, pp. 1878-1888, 2017.
- [21] M. Jin, and T. S. Sidhu, "Adaptive load encroachment prevention scheme for distance protection." *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 10, pp. 1693-1700, 2008.
- [22] T. G. Bolandi and M. R. Haghifam, "PMU based real time vulnerability assessment of zone 3 distance relay to prevent cascading outages," CIGRE Session 2016, Paris, French, pp. 1-11, 2016.
- [23] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1999.
- [24] T. G. Bolandi, H. Seyedi, and S.M. Hashemi, "Protection of transmission lines using fault component integrated power" *IET Genr. Transm. Distrib.* vol. 8, no.12, pp. 2163-2172, 2014.
- [25] P. Jafarian, M. Sanaye-Pasand, "High-speed superimposed-based protection of series-compensated transmission lines," *IET Genr. Transm. Distrib.* vol. 5, no. 12, pp. 1290-1300, 2011.
- [26] A.P. Apostolov, D. Tholomier, S.H. Richards, "Superimposed components based sub-cycle protection of transmission lines," *IEEE PES Power Syst. Conf. Exposition*, pp. 592-597, 2004.
- [27] S.M. Hashemi, M.T. Hagh, H.Seyedi, "Transmission-line protection: a directional comparison scheme using the average of superimposed components", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 2, pp. 945-954, 2013.
- [28] J. Zare, F. Aminifar, & M. Sanaye-Pasand, "Communication-constrained regionalization of power systems for synchrophasor-based wide-area backup protection scheme" *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1530-1538, 2015.
- [29] IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems, IEEE Standard C37.118.2-2011, 2011.
- [30] NERC, *NERC Recommendations to August 14, 2003 Blackout-Prevent and Mitigate the Impacts of Future Cascading Blackouts*, 2003. <http://www.NERC.com>.
- [11] P. K. Nayak, A.K. Pradhan, and P. Bajpai, "Wide-area measurement-based backup protection for power network with series compensation" *IEEE Trans. Power Deliv.* vol. 29, no. 4, pp. 1970-1977, 2014.
- [12] M. K. Jena, S.R. Samantaray, and B.K. Panigrahi, "A New Wide-Area Backup Protection Scheme for Series-Compensated Transmission System" *IEEE Systems Journal*, (to be published), 2015.
- [13] J. Suonan, K. Liu, G. Song, "A novel UHV/EHV transmission-line pilot protection based on fault component integrated impedance" *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 1, pp. 127-134, 2011.
- [14] T. Ghanizadeh Bolandi, H. Seyedi, S. M. Hashemi, and P. Soleiman Nezhad, "Impedance-Differential Protection: A New Approach to Transmission-Line Pilot Protection" *IEEE Trans. Power Deliv.* vol. 30, no. 6, pp. 2510-2518, 2015.
- [15] J. Zare, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, "Synchrophasor-based wide-area backup protection scheme with data requirement analysis" *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 3, pp. 1410 - 1419, 2015.
- [16] P. Kundu, and A.K. Pradhan, "Synchrophasor-assisted zone 3 operation", *IEEE Trans. Power Deliv.* vol. 29, no. 2, pp. 660-667, 2014.
- [17] P. K. Nayak, A. K. Pradhan, and P. Bajpai, "Secured zone 3 protection during stressed condition" *IEEE Trans. Power Deliv.* vol. 30, no. 1, pp. 89-96, 2015.
- [18] K. Seethalekshmi, S. N. Singh, and S. C. Srivastava, "A classification approach using support vector machines to prevent distance relay maloperation under power swing and voltage instability". *IEEE Trans. Power Deliv.* vol. 27, no. 3, pp. 1124-1133, 2012.
- [19] S.H. Li, N. Yorino, and Y. Zoka, "Operation margin analysis of zone 3 impedance relay based on sensitivities to power injection". *IET Genr. Transm. Distrib.* vol. 1, no. 2, pp. 312-317, 2007.

زیر نویس ها

- ¹ Cascading outages
² Power system vulnerability
³ Power swing
⁴ Static load encroachment
⁵ Wide Area Measurement System (WAMS)
⁶ Wide Area Backup Protection (WABP)
⁷ Phasor Measurement Unit (PMU)
⁸ Relay Operation Margin
⁹ Superimposed Component Complex Power (SCP)
¹ Monitoring Index (MI) 0
¹ Superimposed component 1
¹ Fault component 2
¹ Superimposed network 3