



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2025) 3(4):37-54

## Mal-Operation of Distance Relay in Parallel Cable Lines of Sub-Transmission Network Due to the Effect of Reverse Fault Current in the Direction of Load Flow

Farhad Aghajanian Sabagh<sup>1</sup>, B.Sc, Farzad Hajimohammadi<sup>1</sup>, M.Sc

<sup>1</sup> Events Studies and Analysis Unit, Technical Office Affairs, Akhtar Bargh Esfahan Company, Isfahan, Iran

### Abstract:

Mal-operation of distance relays in electric power systems can be caused by a variety of factors, including errors in the relay's hardware or software, incorrect settings, and so on. In this paper, the issue malfunction of distance relay in parallel cable lines of sub-transmission network due to a systemic phenomenon titled "reverse fault current effect in the direction of load flow on the healthy phase" is studied and explored from various aspects. The innovation presented in this article is the detection of described above phenomenon that may cause the distance relay maloperation on a healthy phase of the adjacent line, leading to disconnection of the mentioned line. This is despite the fact that the fault has occurred on only one of the two parallel cable lines, and only that faulted line should be isolated from the network. In this study, we initially provide a comprehensive explanation of this phenomenon and illustrate its impact on the healthy phases of nearby parallel lines. Subsequently, to confirm the occurrence of this phenomenon, a real electrical power network is examined and modeled through DIGSILENT software simulations. Furthermore, we explore and analyze the factors that amplify or mitigate this phenomenon. Concluding the paper, we propose several strategies to mitigate the effects of this phenomenon, thereby preventing the mal-operation of the distance relay.

**Keywords:** Mal-operation of distance protection relay, Parallel cable lines, Sub-transmission network, Cable shield grounding.

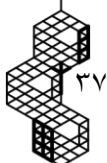
**Received:** 14 February 2024

**Revised:** 04 March 2024

**Accepted:** 10 April 2024

**Corresponding Author:** Farhad Aghajanian Sabagh, Tech.Office@akhtarco.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1080635





# فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

## عملکرد کاذب رله دیستانس در خطوط کابلی موازی شبکه فوق توزیع به علت اثر جریان معکوس خطا در راستای جریان بار

فرهاد آقاجانیان صباغ<sup>۱</sup>، کارشناسی، فرزاد حاجی محمدی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد

۱- واحد مطالعات و تحلیل حوادث، امور دفتر فنی، شرکت اختر برق، اصفهان، ایران

**چکیده:** عملکرد کاذب رله دیستانس در سیستم‌های قدرت الکتریکی ممکن است ناشی از مجموعه‌ای از عوامل مانند، اشکال در سخت افزار یا نرم افزار رله، تنظیمات اشتباه و ... ایجاد گردد. در این مقاله موضوع عملکرد کاذب رله دیستانس در خطوط کابلی موازی شبکه فوق توزیع به دلیل پدیده‌ای سیستمی تحت عنوان "اثر جریان معکوس خطا در راستای جریان بار بر روی فاز سالم" از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. نوآوری این مقاله تشخیص این پدیده می‌باشد که می‌تواند منجر به عملکرد کاذب رله دیستانس در یکی از فازهای سالم مربوط به خط سالم مجاور و در نتیجه قطع خط مذکور گردد. این در حالی است که خطا تنها بر روی یکی از دو خط کابلی موازی ایجاد شده و بایستی فقط همان خط معیوب از شبکه جدا شود. در این مقاله ابتدا این پدیده به طور کامل توضیح داده شده و اثر آن بر روی فازهای سالم خطوط موازی مجاور نشان داده می‌شود. سپس به منظور بررسی صحت پدیده مذکور، یک شبکه قدرت الکتریکی واقعی به کمک نرم‌افزار DigSILENT مورد تجزیه و تحلیل و شبیه سازی قرار گرفته است. همچنین عواملی که باعث تشدید و یا تضعیف این پدیده می‌شوند مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در پایان راه حل‌هایی برای کاهش اثرات این پدیده جهت جلوگیری از عملکرد کاذب رله دیستانس ارائه خواهد شد.

**واژه های کلیدی:** عملکرد کاذب رله حفاظت دیستانس، خطوط کابلی موازی، شبکه فوق توزیع، زمین کردن شیلد کابل

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲

نویسنده‌ی مسئول: فرهاد آقاجانیان صباغ، Tech.Office@akhtarco.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1080635



رله دیستانس یک تجهیز حفاظتی است که بر اساس امیدانس اندازه گیری شده عمل می‌کند. امیدانس خط تابعی از ولتاژ و جریان خط است. وقتی امیدانس اندازه گیری شده کمتر از مقدار تنظیم شده در رله باشد، رله دیستانس فرمان قطع مدار را ارسال می‌کند. این روش برای حفاظت از خطوط انتقال و فوق توزیع با سرعت بالا و دقت خوب مناسب است [۱]. رله‌های دیستانس ممکن است در برخی شرایط، مانند نوسانات توان<sup>۱</sup>، ورود بار به ناحیه حفاظت رله<sup>۲</sup>، ناپایداری ولتاژ<sup>۳</sup>، مقاومت خط<sup>۴</sup> و ... به نحو نادرست عمل کنند. این شرایط می‌توانند بر اندازه‌گیری امیدانس توسط رله تأثیر بگذارند و منجر به قطع ناخواسته یا عدم قطع شوند.

نوسانات توان، نوسانات در جریان و زاویه ولتاژ یک خط به دلیل وقوع خطا در سیستم قدرت است. نوسانات توان می‌تواند بر روی اندازه‌گیری امیدانس دیده شده توسط رله دیستانس تأثیر بگذارد و باعث عملکرد اشتباه رله و قطع خطوط سالم مجاور گردد. این مورد می‌تواند منجر به قطعی‌های متوالی<sup>۵</sup> و گسترش خاموشی<sup>۶</sup> در سیستم قدرت شود [۵-۲].

ورود بار به ناحیه حفاظت رله وضعیتی است که در آن امیدانس مشاهده شده توسط رله دیستانس به دلیل جریان بار بالا، کاهش می‌یابد و می‌تواند منجر به ورود امیدانس بار به ناحیه حفاظت رله دیستانس گردد [۹-۶]. ناپایداری ولتاژ شرایطی است که در آن سیستم قدرت به دلیل پشتیبانی ناکافی توان راکتیو یا تقاضای بیش از حد توان اکتیو نمی‌تواند یک پروفیل ولتاژ پایدار را حفظ کند، که این شرایط می‌تواند بر اندازه‌گیری امیدانس رله‌های دیستانس تأثیر بگذارد [۱۲-۱۰]. مقاومت خط نیز یک متغیر حیاتی در رله دیستانس است که اگر در محاسبات نظر گرفته نشود، ممکن است باعث عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس برای خط‌های داخلی به دلیل پدیده کاهش برد<sup>۷</sup> یا برای خط‌های خارجی ناشی از پدیده افزایش برد<sup>۸</sup> شود. بنابراین، تنظیمات رله دیستانس باید به گونه‌ای باشد که بتواند مقاومت خط را جبران کرده و محل خط را به‌طور دقیق تشخیص دهد [۱۵-۱۳].

هنگام وقوع خطای تک فاز به زمین در یکی از خطوط موازی به خصوص در خطوط کابلی موازی [۱۶]، پدیده "اثر جریان معکوس خطا در راستای جریان بار بر روی فاز سالم" به طور دائم در حال وقوع می‌باشد و در مواردی می‌تواند منجر به عملکرد کاذب رله دیستانس [۱۷] خط سالم و ایجاد خاموشی در پست‌های پایین دست گردد. حال برای جلوگیری از اثر این پدیده در عملکرد کاذب رله‌های حفاظتی دیستانس، نیاز است این پدیده به طور کامل مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد و نحوه ایجاد آن در زمان وقوع خطای تک فاز به زمین مشخص گردد. در بخش دوم اثرات این پدیده در رله‌های دیستانس [۲۰-۱۸] توضیح داده می‌شود. همچنین برای فهم بهتر اثر این پدیده، نمونه واقعی این پدیده در یک شبکه فوق توزیع واقعی در بخش سوم آورده شده است. در بخش چهارم به بیان شرایط مختلفی که می‌توانند شدت اثر این پدیده را کم یا زیاد نمایند اشاره خواهد شد. نتایج یک حادثه واقعی در اثر وقوع این پدیده در بخش پنجم نشان داده شده است. شبیه‌سازی پدیده مذکور توسط نرم افزار دیگسایلنت در بخش ششم این مقاله گنجانده شده است. در بخش هفتم راهکارهایی به منظور کاهش اثر این پدیده بر روی رله دیستانس ارائه شده است و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش هشتم آورده شده است.

## ۲- بیان مسئله

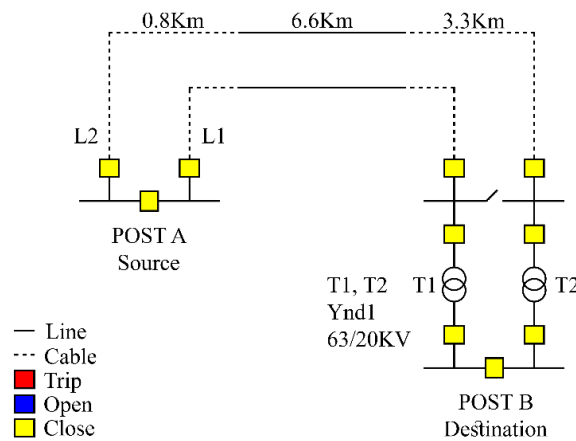
طبق این پدیده، در صورتی که خطای تکفاز به زمینی، بر روی یکی از فازهای خطوط موازی رخ دهد، این جریان وارد زمین شده و سهم عمده این جریان می‌تواند از نوترال ترانسفورماتورهای پست‌های پایین دست، که به این خطوط موازی متصل هستند؛ عبور کرده و از نوترال ترانسفورماتورها به سمت خطوط مذکور و سپس به منبع حرکت کند. هر چه خطا بر روی خط به پست مقصد نزدیک‌تر باشد سهم جریان بیشتری از نوترال سمت HV ترانسفورماتورهای پست مقصد عبور خواهد کرد. چون جریان اتصال کوتاه تکفاز به زمین به صورت پس فازی می‌باشد و این جریان در هنگام برگشت از زمین به سمت منبع، با زاویه ۱۸۰ درجه مخالف جریان خطا، به طور تقریباً مساوی از تک تک فازهای هر دو مدار بر می‌گردد. زاویه این جریان معکوس خطا با تقریب بالایی در راستای زاویه بار و ولتاژ یکی از دو فاز سالم دیگر که نسبت به زاویه ولتاژ فاز خطا جلوتر می‌باشد، قرار می‌گیرد. یعنی اگر خطا بر روی فاز A باشد این پدیده روی فاز C رخ می‌دهد و در نتیجه جریان معکوس خطای برگشتی با جریان بار فاز سالم جمع شده و این افزایش جریان در فاز سالم مذکور منجر به کاهش شدید امیدانس می‌شود و چون زاویه جریان برآیند در راستای زاویه بار می‌باشد، در نتیجه امیدانس دیده شده توسط رله



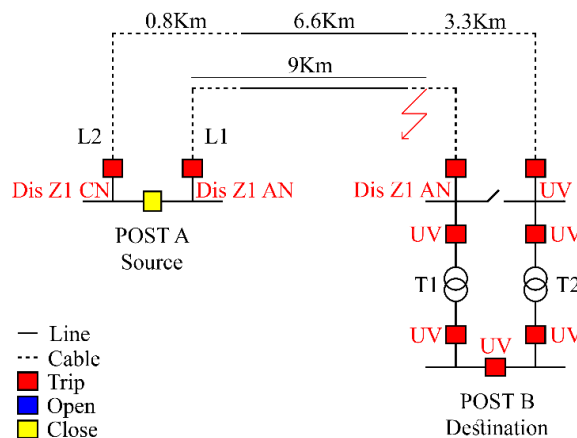
دیستانس می‌تواند وارد زون رله دیستانس از سمت محور مقاومتی مشخصه دیستانس شود. لازم به ذکر است در این پدیده، مقدار جریان و زاویه بار نیز می‌تواند این اثر را تشدید یا تضعیف نماید.

### ۳- یک مورد مطالعاتی واقعی

در این قسمت یک مورد مطالعاتی واقعی، برای روشن‌تر شدن موضوع و شرح کامل این پدیده ارائه شده است. در شکل (۱) شمای تک خطی<sup>۱</sup> شبکه نمایش داده شده است. مطابق شکل (۱)، دو خط موازی ۶۳ کیلوولت با نام‌های L1 و L2 از پست مبدا نیروگاهی A به پست مقصد B متصل شده‌اند، لازم به ذکر است با توجه به محدودیت حریم خطوط، در قسمت‌هایی در مسیر خطوط L1 و L2 از کابل استفاده شده است. در شکل (۱) خطوط خط چین نماد کابل و خطوط ممتد، نماد خط هوایی هستند (L1 و L2 خطوط کابلی - هوایی هستند). همچنین ترانسفورماتورهای T1 و T2 در پست مقصد B با گروه برداری Ynd1 و سطح ولتاژ ۶۳/۲۰ کیلوولت می‌باشند. مطابق شکل (۲)، هنگام بروز خطای تک فاز به زمین برای مثال (فاز A) بر روی قسمت کابلی خط L1 در نزدیکی پست B (در فاصله ۳.۸ کیلومتر از پست B) منجر به عملکرد صحیح رله دیستانس خط L1 در هر دو سمت پست‌های A و B می‌شود. خط L1 با عملکرد رله Dis-Z1-AN در هر دو پست A و B قطع می‌شود، ولی همزمان خط L2 از سمت پست A با عملکرد کاذب رله دیستانس (Dis-Z1-CN) از مدار خارج می‌گردد و منجر به خاموشی در پست B می‌شود. همان‌طور که مشخص است خطا بر روی خط L1 بوده و فقط بایستی خط مذکور از مدار خارج شود ولی با عملکرد کاذب رله دیستانس مربوط به خط L2 در پست A، خط مذکور نیز به اشتباه قطع شده و منجر به خاموشی در پست مقصد B می‌گردد.



شکل (۱): SLD شبکه مورد مطالعه قبل از بروز خطا

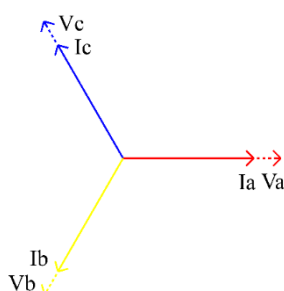


شکل (۲): SLD شبکه مورد مطالعه در زمان بروز خطا

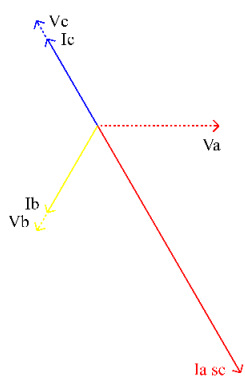


در این حادثه علت عملکرد رله دیستانس خط L2 در پست A، به دلیل پدیده اثر جریان معکوس خط در راستای زاویه بار فاز سالم C بوده است که به شرح ذیل به طور کامل توضیح داده می‌شود. فرض کنید جریان بار خطوط L1 و L2 در پست مبدا A به صورت شکل (۳) باشد. در این مثال فرض شده که جریان بار کاملاً اهمی می‌باشد. حال با بروز خطا بر روی فاز A خط L1، جریان فاز A به شدت زیاد می‌شود و با توجه به ماهیت سلفی - اهمی بودن خطا (امپدانس توالی مثبت خط دارای سلف و مقاومت می‌باشد) زاویه جریان خطا پس فاز می‌شود که این مورد در شکل (۴) آورده شده است.

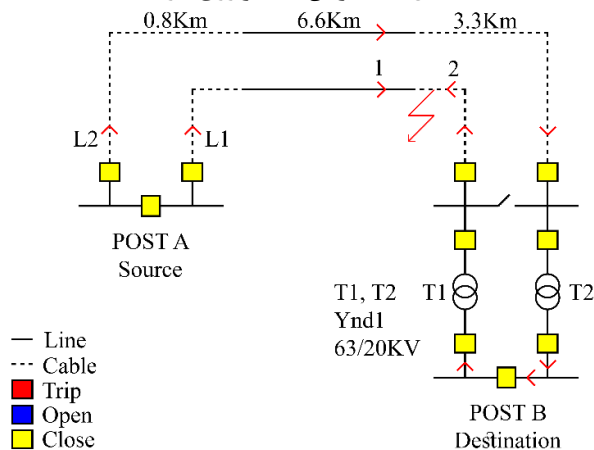
لازم به ذکر است طبق شکل (۵) در زمان وقوع اتصال کوتاه، جریان خطا از دو مسیر وارد محل خطا می‌شود، یک مسیر جریان به طور مستقیم از سمت پست A و از طریق خط معیوب L1 وارد محل خطا می‌شود (مسیر ۱) و مسیر جریان دیگر به طور غیر مستقیم از سمت پست A و از طریق خط سالم مجاور L2 و دو ترانسفورماتور T1 و T2 در پست B به محل خطا تزریق می‌شود (مسیر ۲). با توجه به اینکه مسیر (۲) دارای امپدانس بسیار بالایی نسبت به مسیر (۱) می‌باشد، در لحظه‌ای که هنوز خط معیوب L1 توسط رله‌های حفاظتی از سمت پست A قطع نشده است؛ اکثر جریان خطا از سمت مسیر (۱) به محل خطا تزریق می‌شود. به همین دلیل در ادامه مطالعات، برای فهم بهتر و ساده سازی مسئله؛ از جریان خطای مسیر (۲) صرف نظر شده است.



شکل (۳): جریان و ولتاژ بار خطوط L1 و L2



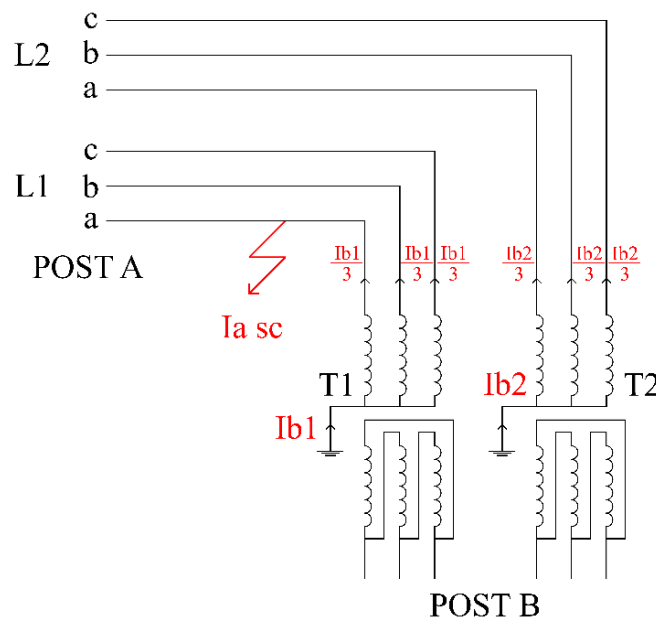
شکل (۴): جریان خطا بر روی فاز A



شکل (۵): مسیرهای جریان خطا

مطابق شکل (۶)، جریان خطای فاز A از سمت پست A بر روی خط L1 (مسیر (۱)) را ( $I_{a sc}$ ) می‌نامیم و این جریان به دلیل ماهیت خطای تک فاز به زمین، وارد زمین شده و بخشی از آن از نوترال ترانسفورماتورهای T1 و T2 در پست B عبور کرده و به سمت منبع (پست A) حرکت می‌کند. همان طور که مشخص است بخشی از جریان خطای زمین فاز A ( $I_{a sc}$ ) به نوترال ترانسفورماتور T1 در پست B وارد می‌شود که در این مثال آن را  $I_{b1}$  می‌نامیم و بخشی از این جریان نیز به نوترال ترانسفورماتور T2 در پست B وارد می‌شود که در این مثال آن را  $I_{b2}$  می‌نامیم. هر چه محل خطا به پست B نزدیک‌تر باشد، جریان بیشتری از نوترال ترانسفورماتورهای پست B برمی‌گردد و به سمت منبع (پست A) حرکت می‌کند.

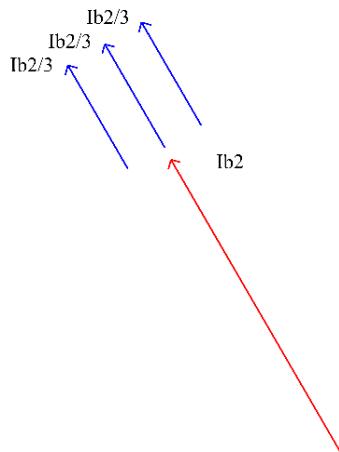
زاویه جریان خطای عبوری از نوترال ترانسفورماتورهای مذکور (زاویه جریان‌های  $I_{b1}$  و  $I_{b2}$ )، هنگام برگشت به منبع، از دید منبع نسبت به زاویه جریان  $I_{a sc}$  دارای  $180^\circ$  درجه اختلاف می‌باشد. در واقع زاویه جریان‌های  $I_{b1}$  و  $I_{b2}$  برابر  $-I_{a sc}$  می‌باشد که شکل (۷) نشان داده شده است. سپس به طور مثال، حدود یک سوم جریان‌های  $I_{b2}$  با همان زاویه، وارد تک تک فازها می‌شود ( $I_{b2}/3$ ) و به سمت پست A برمی‌گردند که شکل (۸) بیانگر این مطلب می‌باشد.



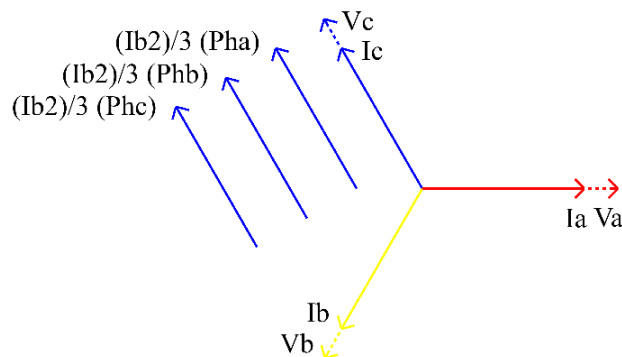
شکل (۶): عبور جریان خطا از نوترال ترانسفورماتورهای پست مقصد



شکل (۷): زاویه جریان معکوس خطا در حالت برگشت از ترانسفورماتورهای پست مقصد به سمت منبع



شکل (۸): جریان خطای معکوس برگشتی از تک تک فازهای ترانسفورماتور T2



شکل (۹): وضعیت جریان خطای برگشتی برای هر فاز در مقایسه با بار همان فاز

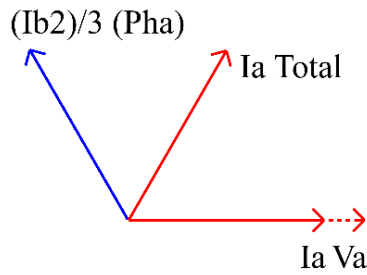
همان طور که در شکل (۹) مشخص می‌باشد، جریان خطای عبوری از نوترال ترانسفورماتور T2، در تک تک فازها تقریباً در راستا و جهت جریان بار فاز C ( $I_c$ ) خط L2 می‌باشد. ولی با جریان بار فاز A ( $I_a$ ) در حدود  $+120^\circ$  درجه و با جریان بار فاز B ( $I_b$ ) در حدود  $-120^\circ$  درجه اختلاف فاز دارد.

طبق شکل (۱۰) برآیند جریان بار فاز A و جریان معکوس خطا در فاز A را  $I_a$  Total می‌نامیم. به طور مشابه طبق شکل (۱۱) برآیند جریان بار فاز B و جریان معکوس خطا در فاز B را  $I_b$  Total می‌نامیم و در نهایت، مطابق شکل (۱۲) برآیند جریان بار فاز C و جریان معکوس خطا در فاز C را  $I_c$  Total می‌نامیم. همان طور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، جریان ( $I_{b2/3}$ ) که در تک تک فازهای ترانسفورماتور T2 به سمت منبع (پست A) در حرکت است به جریان بار هر فاز اضافه می‌شود، ولی چون در راستا و جهت جریان بار فاز C می‌باشد، برآیند جریان در فاز C به مراتب از برآیند جریان فازهای A و B بیشتر خواهد بود و علاوه بر آن، جهت جریان برآیند فاز C نیز در راستای ولتاژ فاز C می‌باشد و در این حالت امکان دارد امپدانس فاز C نسبت به زمین، از ناحیه امپدانس بار؛ وارد ناحیه زون رله دیستانس شده و منجر به عملکرد کاذب رله دیستانس شود که این مطلب در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در واقع در مورد مطالعاتی مذکور، همزمان با بروز خطا بر روی فاز A خط L1، خط L2 نیز به دلیل پدیده اثر جریان معکوس خطا با عملکرد کاذب رله دیستانس در فاز C قطع شده است.

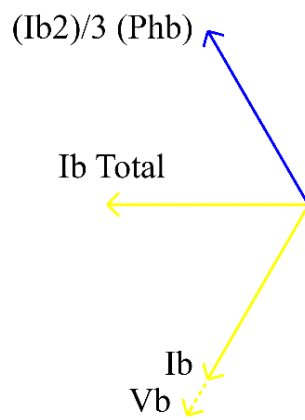
لازم به ذکر است که این پدیده قابل شناسایی توسط فانکشن PSB<sup>۱۰</sup> در رله دیستانس نمی‌باشد، زیرا این فانکشن بر اساس سرعت حرکت امپدانس به داخل زون PSB کار می‌کند. فانکشن مذکور هنگامی قادر به شناسایی نوسانات بار می‌باشد که سرعت حرکت امپدانس کمتر از سرعت حرکت امپدانس خطا باشد. لذا چون پدیده مذکور در زمان وقوع خطا روی می‌دهد و در واقع جریان معکوس خطا منجر به کاهش ناگهانی امپدانس در فاز سالم می‌شود، در نتیجه دارای سرعت حرکت امپدانس بالایی نسبت به حالت نوسان بار



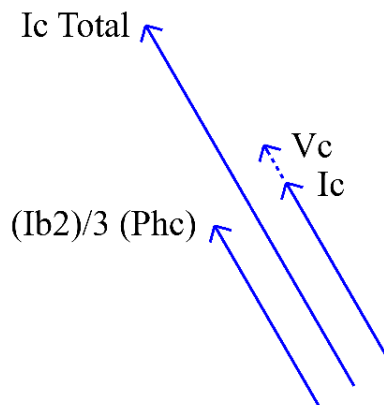
می‌باشد و قابل شناسایی توسط فانکشن PSB نمی‌باشد. همچنین این نکته قابل توجه می‌باشد که این فانکشن همیشه فعال نمی‌باشد و اکثراً در خطوط انتقال نیروگاهی فعال است.



شکل (۱۰): برآیند جریان معکوس خطا در فاز A و جریان بار در فاز A



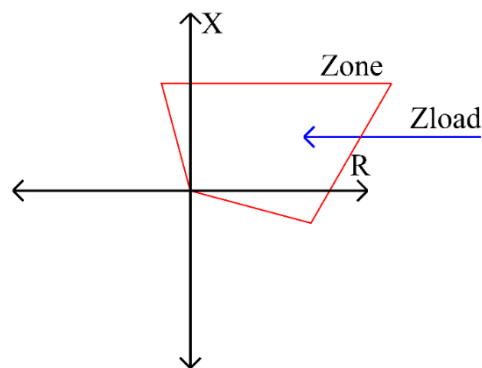
شکل (۱۱): برآیند جریان معکوس خطا در فاز B و جریان بار در فاز B



شکل (۱۲): برآیند جریان معکوس خطای در فاز C و جریان بار در فاز C







شکل (۱۳): ورود امیدانس دیده شده به ناحیه زون رله دیستانس از ناحیه بار

#### ۴- عوامل موثر در تشدید پدیده اثر جریان معکوس خطا

شدت پدیده اثر جریان معکوس خطا تابعی از شرایط مختلف سیستم، مکان خطا، نوع خطا، مقاومت محل خطا و ... می باشد که در ادامه این بخش از مقاله از بین عوامل ممکن، موثرترین فاکتورهایی که باعث تشدید این پدیده می شوند؛ به شرح ذیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

- ۱- ضعف در سیستم زمین شیلد کابل
- ۲- نزدیک بودن خطا به پست مقصد

##### ۴-۱- ضعف در سیستم زمین شیلد کابل

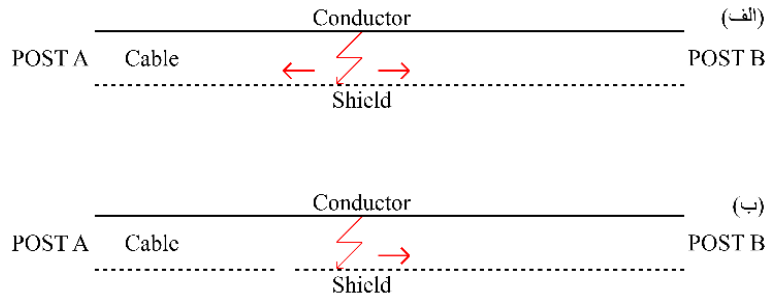
همان طور که می دانید شیلد خطوط کابلی با توجه به شرایط مختلف از جمله طول کابل و تعداد مفصل ها و ... به روش های مختلفی می تواند زمین گردد [۲۰]. شیلد کابل ها در محل مفصل ها به هم اتصال داده شده و ممکن است زمین شوند. حال اگر با توجه به شرایط مختلف، پیوستگی شیلد کابل از بین برود می تواند باعث بروز مشکلاتی شوند که یکی از آنها عدم برگشت جریان خطا از طریق شیلد کابل می باشد.

در حالت نرمال (شیلد کابل پیوسته و سالم) هنگامی که خطای فاز به زمین بر روی کابل رخ می دهد، بین هادی کابل با شیلد کابل اتصالی ایجاد می گردد و اکثر سهم جریان اتصال کوتاه از طریق شیلد کابل به منبع باز می گردد. مقداری از این جریان به طور مستقیم از طریق شیلد به منبع بازگشته و مابقی این جریان از طریق شیلد به پست مقصد بازگشته و از طریق نوترال ترانسفورماتورها و هادی کابل هر سه فاز به پست منبع برمی گردد. طبق شکل (۱۴-الف) هنگام وقوع خطا، جریان خطا از طریق شیلد کابل به سمت پست A و B حرکت می کند. در این حالت اکثر جریان خطا از طریق شیلد به پست منبع A بر می گردد و سهم کمتری از آن از طریق شیلد به پست مقصد B منتقل شده و از طریق نوترال ترانسفورماتورهای پست مقصد و از طریق هادی های سه فاز به پست منبع بر می گردد. حال اگر پیوستگی شیلد کابل از بین برود، هنگام وقوع خطا، اکثر جریان خطا از طریق شیلد به پست مقصد حرکت کرده و از طریق نوترال ترانسفورماتورهای پست مقصد و هادی های سه فاز به پست منبع برمی گردد که شکل (۱۴-ب) بیانگر این مورد می باشد. در این شرایط اندازه جریان معکوس خطا بیشتر خواهد شد و به موجب آن اثر این پدیده نیز تشدید خواهد شد.

##### ۴-۲- نزدیک بودن خطا به پست مقصد

بدیهی است هر چه خطا به پست مقصد نزدیک تر باشد سهم بیشتری از جریان اتصال کوتاه از نوترال ترانسفورماتورها در پست مقصد عبور کرده و در نتیجه اندازه جریان معکوس خطا بیشتر می گردد و منجر به تشدید اثر پدیده مذکور می شود. در واقع هر چه جریان معکوس خطا بیشتر باشد، امیدانس دیده شده توسط رله دیستانس کوچکتر شده و منجر به ورود این امیدانس به داخل ناحیه حفاظت رله دیستانس می شود.





شکل (۱۴): مسیر حرکت جریان خطا در کابل، شکل الف- با شیلد پیوسته. شکل ب- با شیلد ناپیوسته

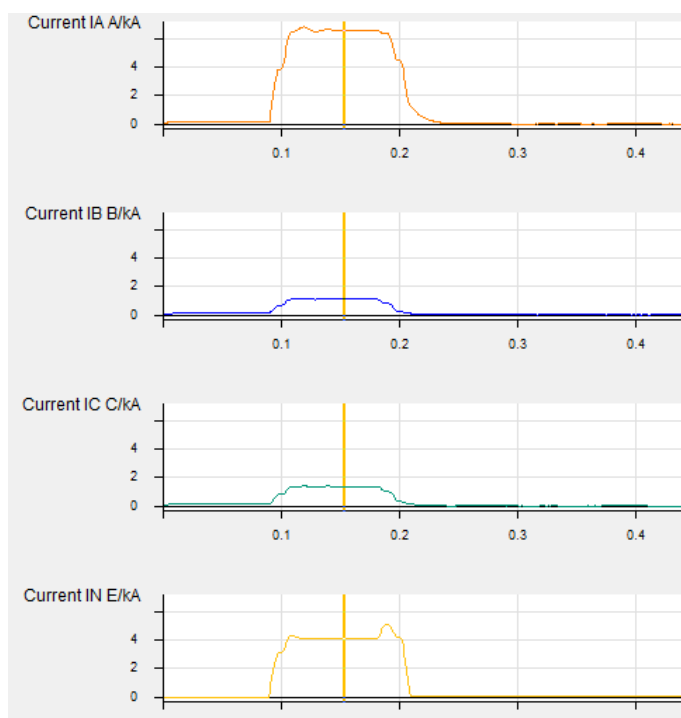
## ۵- نتایج مورد مطالعاتی مطرح شده

در یکی از حوادث ایجاد شده در شبکه، هنگام بروز یک خطای فاز به زمین بر روی فاز A مربوط به یکی از خطوط یک خط دو مداره کابلی فوق توزیع با سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت، منجر به قطع شدن خط مذکور توسط رله‌های حفاظتی و همزمان به علت اثر پدیده "جریان معکوس خطا" منجر به عملکرد کاذب رله دیستانس خط سالم مجاور و ایجاد خواموشی در پست‌های پایین دست شده است. لازم به ذکر است در واقع، مورد مطالعاتی ذکر شده در بخش (۳) مقاله، تئوری این مثال واقعی می‌باشد و تمام اطلاعات ذکر شده در آن قسمت از جمله SLD شبکه، اطلاعات خطوط، ترانسفورماتورها و محل خطا مشابه حادثه واقعی می‌باشد.

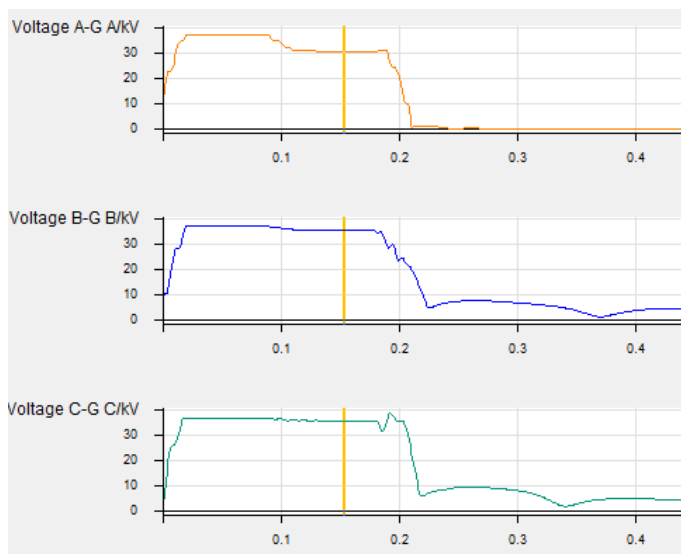
در ادامه اطلاعات برداشت شده از رله‌های حفاظتی مربوط به حادثه مذکور آورده شده که به خوبی این پدیده را نمایش می‌دهد. جریان بار قبل از حادثه بر روی خط معیوب (L1) در شکل (۱۵) نشان داده شده است. مطابق شکل، جریان بار در هر فاز تقریباً ۲۰۰ آمپر و با اختلاف زاویه حدود ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر بوده است. با وقوع خطای تک فاز به زمین در فاز A، جریان خطایی در حدود ۶.۶ کیلوآمپر ایجاد می‌گردد که این مورد در شکل (۱۶) نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۱۷)، ولتاژ خطای تک فاز به زمین فاز A بر روی خط معیوب در حدود ۳۰.۸ کیلوولت می‌باشد. به طور خلاصه، مقادیر جریان و ولتاژ خط معیوب در لحظه خطا در شکل (۱۸) و مقادیر فازوری آن در شکل (۱۹) نمایش داده شده است. همان طور که در شکل (۱۹) دیده می‌شود، جریان خطا بر روی فاز A به صورت پس فازی بوده و در حدود ۱۸۰ درجه با ولتاژ فاز C اختلاف فاز دارد و در هنگام برگشت از نوترال ترانسفورماتورهای پست مقصد؛ تقریباً با ولتاژ و جریان فاز C در هر دو خط L1 و L2 هم راستا می‌شود.

Measuring Signal	R.M.S.	Phase
Current IAA	0.1981 kA	-1.5°
Current IB B	0.1744 kA	-121.4°
Current IC C	0.2040 kA	120.4°
Current IN E	0.00314 kA	-175.9°
Voltage A-G A	37.178 kV	0.0°
Voltage B-G B	37.171 kV	-120.1°
Voltage C-G C	37.087 kV	119.9°

شکل (۱۵): جریان بار قبل از حادثه بر روی خط معیوب



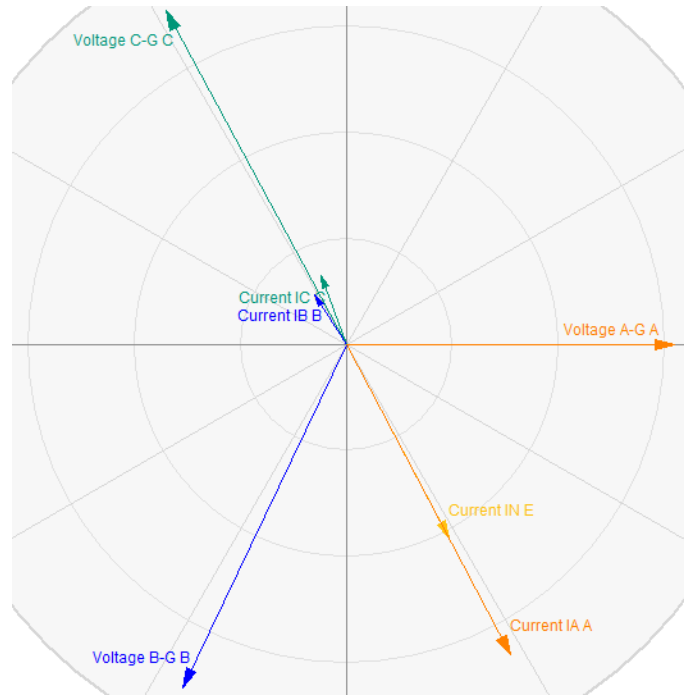
شکل (۱۶): جریان خطا در خط معیوب



شکل (۱۷): ولتاژ خطا در خط معیوب

Measuring Signal	R.M.S.	Phase
Current IAA	6.6115 kA	-62.1°
Current IB B	1.1356 kA	122.7°
Current IC C	1.3890 kA	110.3°
Current IN E	4.1284 kA	-62.0°
Voltage A-G A	30.875 kV	0.0°
Voltage B-G B	35.835 kV	-115.7°
Voltage C-G C	35.886 kV	118.4°

شکل (۱۸): مقادیر جریان و ولتاژ خط معیوب

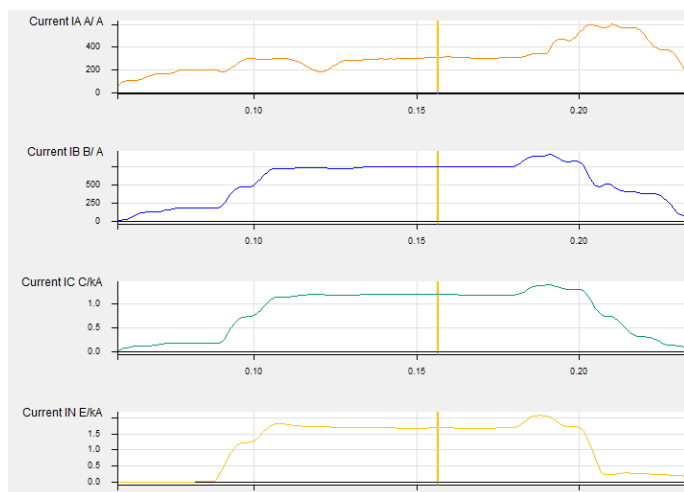


شکل (۱۹): نمودار فازوری ولتاژ و جریان خط معیوب

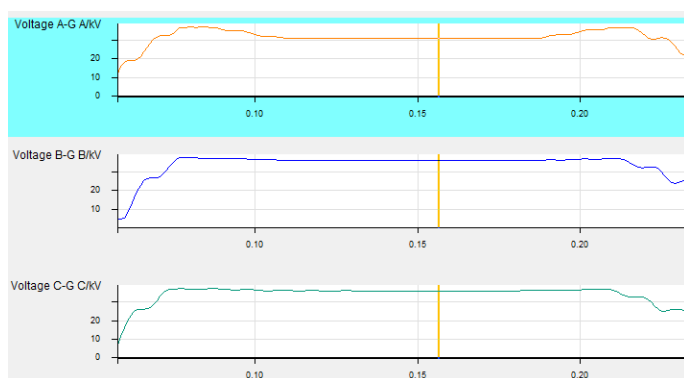
در ادامه نتایج برداشت شده از رله‌های حفاظتی مربوط به خط سالم، به ازای شرایط قبل و بعد از حادثه ارائه شده است. جریان بار قبل از حادثه بر روی خط سالم طبق شکل (۲۰)، حدود ۲۰۰ آمپر می‌باشد. همان طور که در شکل (۲۱) نمایش داده شده است در هنگام بروز خطا بر روی فاز A در خط معیوب، به دلیل پدیده اثر جریان معکوس خطا، جریان فاز C در خط سالم نسبت به فازهای دیگر به مراتب بیشتر شده است (در حدود ۱.۱۹ کیلوآمپر). با توجه به شکل (۲۲)، ولتاژ فاز A خط سالم نیز به دلیل خطا بر روی فاز A خط معیوب، کاهش داشته است. مقادیر جریان و ولتاژ خط سالم در لحظه خطا در شکل (۲۳) و مقادیر فازوری آن در شکل (۲۴) نمایش داده شده است. پدیده اثر جریان معکوس خطا به طور کاملاً واضح در این شکل مشهود می‌باشد. با توجه به اینکه خطا بر روی فاز A خط معیوب بوده است و اگر جریان خطای پس فازی مربوط به فاز A را معکوس نماییم، در راستای جریان بار فاز C قرار می‌گیرد.

Measuring Signal	R.M.S.	Phase
Current IA A	200.19 A	0.3°
Current IB B	0.1898 kA	-122.4°
Current IC C	0.1828 kA	120.6°
Current IN E	0.00168 kA	6.6°
Voltage A-G A	37.234 kV	0.0°
Voltage B-G B	37.303 kV	-120.2°
Voltage C-G C	37.167 kV	119.9°

شکل (۲۰): جریان بار خط سالم قبل از حادثه



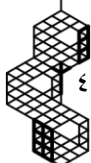
شکل (۲۱): جریان‌ها در خط سالم در لحظه وقوع خطا

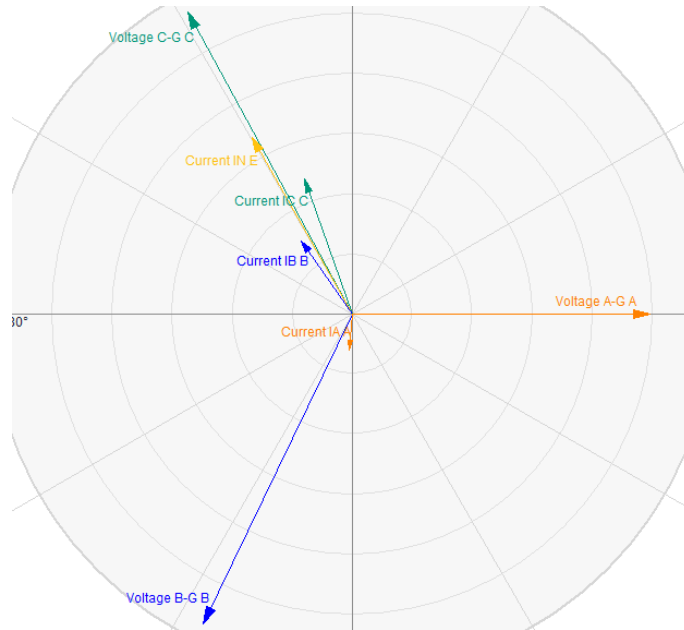


شکل (۲۲): ولتاژها در خط سالم در لحظه وقوع خطا

Measuring Signal	R.M.S.	Phase
Current IA A	304.52 A	-100.9°
Current IB B	0.7463 kA	120.5°
Current IC C	1.1992 kA	105.3°
Current IN E	1.6887 kA	115.3°
Voltage A-G A	31.102 kV	-4.4°
Voltage B-G B	35.944 kV	-120.2°
Voltage C-G C	36.036 kV	114.1°

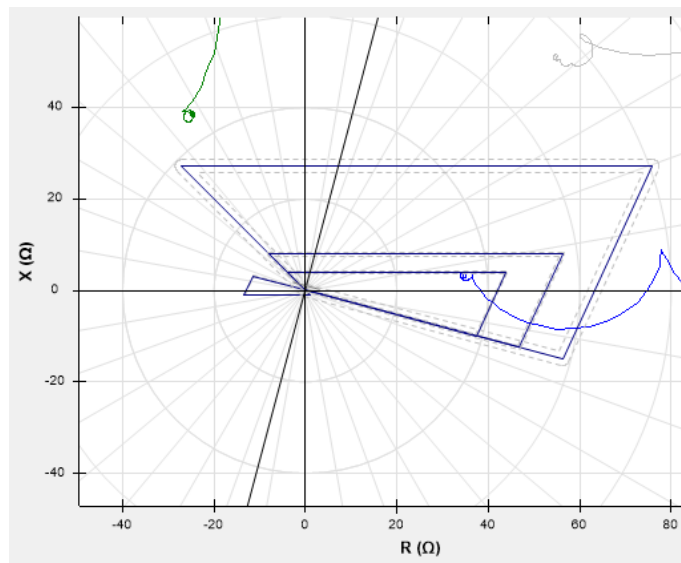
شکل (۲۳): مقادیر جریان و ولتاژ خط سالم در لحظه وقوع خطا





شکل (۲۴): نمودار فازوری جریان و ولتاژ خط سالم در لحظه وقوع خطا

همان طور که در شکل (۲۵) دیده می‌شود امپدانس فاز به زمین مربوط به فاز C در خط سالم به دلیل پدیده مذکور از ناحیه بار وارد زون رله دیستانس شده است و در این حالت به دلیل اینکه امپدانس مذکور وارد ناحیه زون (۱) شده است، منجر به قطع نادرست خط سالم (L2) همزمان با قطع خط معیوب (L1) شده است.



شکل (۲۵): مسیر حرکت امپدانس دیده شده مربوط به فاز C در خط سالم و ورود آن به داخل زون رله دیستانس

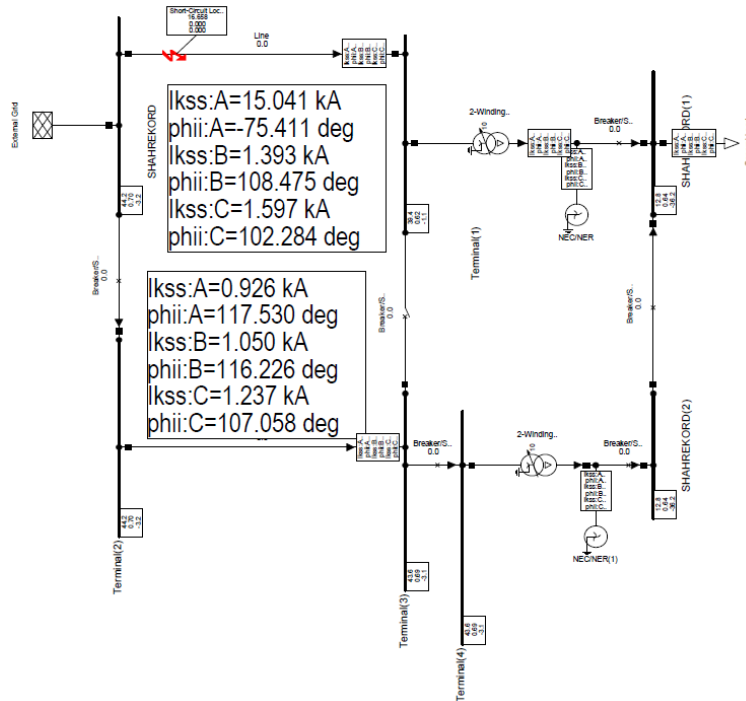
## ۶- نتایج شبیه‌سازی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک سیستم قدرت نوعی، با نرم افزار DIgSILENT PowerFactory نیز کاملاً پدیده اثر جریان معکوس خطا را نشان می‌دهد. مطابق شبیه سازی انجام شده، خطا بر روی فاز A یکی از خطوط موازی قرار داده شده است و مقادیر جریان و ولتاژ در لحظه خطا مربوط به هر دو خط در شکل (۲۶) نمایش داده شده است. مطابق شکل (۲۶) جریان اتصال کوتاه بر روی فاز A خط معیوب در حدود ۱۵ کیلو آمپر با زاویه پس فاز ۷۵ درجه (-۷۵ درجه) می‌باشد و نمودار فازوری آن در شکل (۲۷) دیده می‌شود.

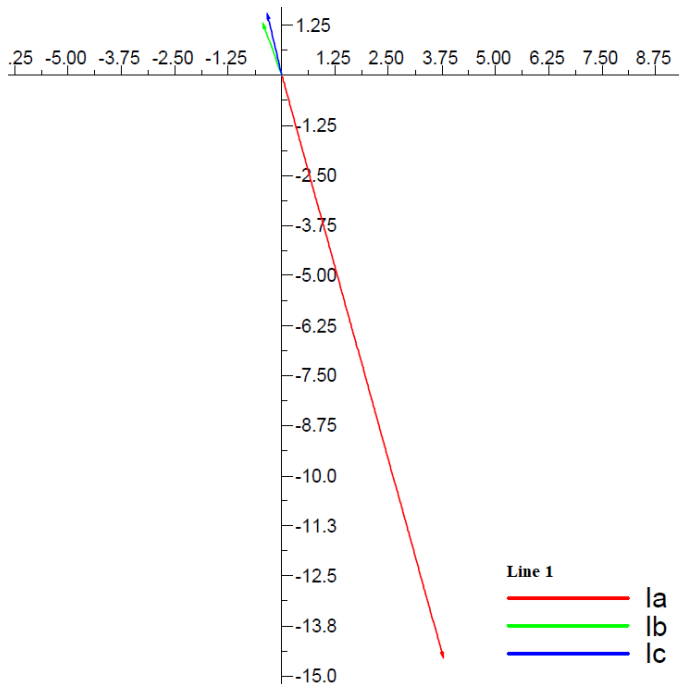




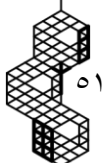
در صورت برگشت جریان مذکور، زاویه آن در حدود ۱۸۰ درجه تغییر خواهد کرد و در نتیجه در راستای زاویه ولتاژ و جریان بار فاز C خط سالم قرار خواهد گرفت. در این شرایط جریان اتصال کوتاه در فاز C خط سالم نسبت به دوفاز دیگر به مراتب بیشتر افزایش پیدا کرده و به حدود ۱.۲ کیلوآمپر با زاویه ۱۰۷ درجه رسیده است. نمودار فازوری جریان در خط سالم در شکل (۲۸) نمایش داده شده است.

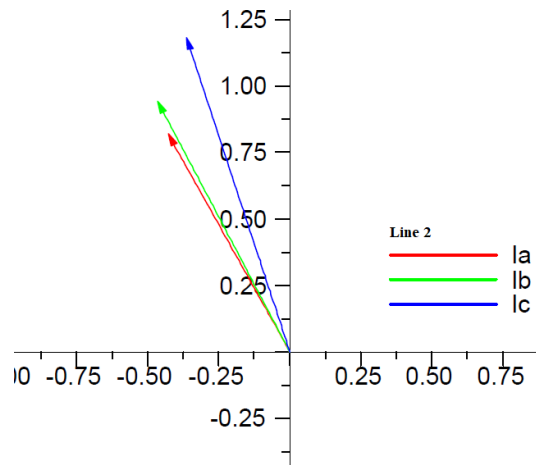


شکل (۲۶): شبیه سازی پدیده مذکور با نرم افزار DigSILENT PowerFactory



شکل (۲۷): نمودار فازوری جریان خط معیوب





شکل (۲۸): نمودار فازوری جریان خط سالم

## ۷- راهکارهای پیشنهادی

با توجه به اینکه پدیده اثر جریان معکوس خطا می‌تواند منجر به عملکرد کاذب رله دیستانس شود و به موجب آن باعث گسترش خاموشی گردد، لذا برای جلوگیری از اثرات آن می‌توان از راهکارهای ذیل استفاده نمود:

- ۱- اصلاح سیستم زمین شیلد کابل در صورت معیوب بودن
- ۲- کوچک‌تر کردن زون رله دیستانس از سمت R تا حد امکان
- ۳- استفاده از رله دیفرانسیل طولی خط برای خطوط کابلی

### ۱-۷- اصلاح سیستم زمین شیلد کابل در صورت معیوب بودن

در صورتی که پیوستگی شیلد کابل از بین رفته باشد، می‌تواند در هنگام بروز خطا منجر به عبور جریان خطای بیشتر از پست مقصد شود و این امر باعث افزایش اندازه جریان معکوس خطا خواهد شد. برای این منظور حتماً بایستی پیوستگی شیلد کابل به ویژه در نقاطی که مفصل کابل وجود دارد، بررسی و در صورت معیوب بودن اصلاح گردد تا اندازه جریان خطای معکوس تا حد امکان کمتر شود. لازم به ذکر است اصلاح زمین شیلد کابل مستلزم بی‌برق نمودن خط کابلی، تعویض کابل و اجرای مفصل جدید می‌باشد که متناسب با تعداد نقاط معیوب؛ امری ضروری، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد.

### ۲-۷- کوچک‌تر کردن زون رله دیستانس از سمت R تا حد امکان

در مواردی که مسیر خط از ترکیب خط هوایی و کابلی باشد، ممکن است در محاسبات تنظیمات رله دیستانس مقدار R زون رله نسبتاً زیاد انتخاب گردد. با توجه به اینکه در این پدیده امپدانس دیده شده، از سمت ناحیه بار وارد زون رله دیستانس می‌شود؛ بایستی زون حفاظتی رله دیستانس از سمت محور R به نحوی محدود گردد که در صورت وقوع این پدیده از ورود آن به زون جلوگیری گردد. راهکار مذکور بر مبنای اعمال تنظیمات جدید به رله دیستانس می‌باشد که نه تنها نیاز به خاموشی ندارد، بلکه بدون نیاز به هزینه در کمترین زمان ممکن قابل اجرا است.

### ۳-۷- استفاده از رله دیفرانسیل طولی خط برای خطوط کابلی

یکی از راهکارها برای جلوگیری از عملکرد کاذب رله دیستانس در اثر بروز پدیده جریان معکوس خطا، استفاده از رله دیفرانسیل طولی برای حفاظت خطوط کابلی می‌باشد، زیرا این حفاظت یک حفاظت واحد می‌باشد و این پدیده هیچگونه اثری بر روی آن نخواهد داشت. در حقیقت حفاظت دیفرانسیل بر مبنای تفاضل جریان ورودی و خروجی از خط می‌باشد، بنابراین کاهش امپدانس دیده شده ناشی از پدیده مذکور؛ تاثیری بر عملکرد آن نخواهد داشت. اجرای رله دیفرانسیل طولی که بر پایه زیرساخت فیبر نوری استوار است، مستلزم





سرمایه‌گذاری قابل توجهی از نظر مالی و زمانی می‌باشد و همچنین به دلیل نیاز به خاموشی‌های برنامه‌ریزی شده، با چالش‌های عملیاتی همراه است.

## ۸- نتیجه‌گیری

در شبکه برق قدرت، خطوط موازی به ویژه خطوط موازی کابلی می‌تواند برای تغذیه پست‌های برق استفاده گردد. حال اگر یکی از خطوط موازی دچار عیب گردد با عملکرد رله‌های حفاظتی، خط مذکور قطع شده و پست‌های پایین دست باید از طریق خط سالم در مدار باقی بمانند. این در حالی است که در اثر پدیده جریان معکوس خطا، امکان عملکرد کاذب رله دیستانس خط سالم همزمان با بروز خطا بر روی خط معیوب وجود خواهد داشت که در این حالت منجر به خاموشی در پست‌های پایین دست می‌شود. لذا درک مفهوم اثر پدیده جریان معکوس خطا و عوامل تشدید این پدیده و راهکارهای لازم جهت مهار این پدیده از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود. موارد بیان شده به طور کامل در این مقاله مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و همچنین جهت صحت ادعای وقوع این پدیده، نتایج یک مورد مطالعاتی واقعی و همچنین شبیه‌سازی این پدیده ارائه گردید.

## مراجع

- [1] S. Salehimehr, B. Taheri and M. Faghihlo, "Detection of power swing and blocking the distance relay using the variance calculation of the current sampled data," *Electr Eng*, vol. 104, no. 2, pp. 913–927, Jul. 2022, <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01350-1>.
- [2] B. Taheri, S. A. Hosseini, and S. Salehimehr, "An overview of power swing detection methods in distance relays and the factors involved," *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 17, no. 4, pp. 743–761, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12711>.
- [3] K. Seethalekshmi, S. K. Singh, and S. C. Srivastava, "A Classification Approach Using Support Vector Machines to Prevent Distance Relay Maloperation Under Power Swing and Voltage Instability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1124–1133, Jun. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2011.2174808>.
- [4] A. Thakallapelli, R. Mehra, and H. A. Mangalvedekar, "Differentiation of faults from power swings and detection of high impedance faults by distance relays," in *2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, Dec. 2013, pp. 374–377, doi: <https://doi.org/10.1109/catcon.2013.6737530>.
- [5] S. Arasu and R. Ananthanarayanan, "Mitigating Distance Relay Maloperations during Load Encroachment through an Adaptive Mho Distance Relaying Scheme Based on Sequence Components," *SSRG international journal of electrical and electronics engineering*, vol. 10, no. 9, pp. 40–60, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.14445/23488379/ijeee-v10i9p105>.
- [6] N. K. Rajalwal and D. Ghosh, "Superseding Mal-Operation of Distance Relay Under Stressed System Conditions," *Power systems*, pp. 393–421, Sep. 2020, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54275-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54275-7_15).
- [7] H. Mortazavi, H. Mehrjerdi, and M. Saad, "A Modified Load Encroachment Technique for Power Factor Monitoring," *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Aug. 2018, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/pesgm.2018.8586366>.
- [8] T. Ghanizadeh Bolandi, M. R. Haghifam, and M. Khederzadeh, "Real-time monitoring of zone 3 vulnerable distance relays to prevent maloperation under load encroachment condition," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 8, pp. 1878–1888, May 2017, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0486>.
- [9] A. Farid Bin Abidin and A. Mohamed, "On the use of voltage stability index to prevent undesirable distance relay operation during voltage instability," in *2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Jan. 2010, pp. 384–387, doi: [10.1109/EEEIC.2010.5489947](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2010.5489947).
- [10] M. Sharifzadeh, H. Lesani and M. Sanaye-Pasand, "A New Algorithm to Stabilize Distance Relay Operation During Voltage-Degraded Conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1639–1647, Aug. 2014, doi: [10.1109/TPWRD.2013.2285502](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2285502).



- [11] M. Jonsson and J. Daalder, "Distance protection and voltage stability," in *2000 International Conference on Power System Technology*, pp. 971–976, Nov. 2002, doi: <https://doi.org/10.1109/icpst.2000.897152>.
- [12] R. Cimadevilla and I. García, "Improvements in the operation of a distance relay during resistive faults," in *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2014, pp. 132-185, doi: 10.1109/CPRE.2014.6799000.
- [13] A. D. Filomena, R. H. Salim, M. Resener and A. S. Bretas, "Ground Distance Relaying with Fault-Resistance Compensation for Unbalanced Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1319-1326, July 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2007.909210.
- [14] S. Zhu, Y. Xing and F. Sui, "Fault component reactance relay," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1292-1300, July 1996, doi: 10.1109/61.517483.
- [15] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, "Power System Analysis," McGraw-Hill, 1994.
- [16] C. Russell Mason, "The Art and Science of Protective Relaying," Wiley, 1956.
- [17] G. Ziegler, "Numerical Distance Protection, Fourth Edition," Publicis Erlangen, 2011.
- [18] M. A. Ibrahim, "Disturbance Analysis for Power System," John Wiley & Sons, 2012.
- [19] Power System Relaying Committee of the IEEE Power and Energy Society, IEEE Std C37.113-2015, "IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines," IEEE-SA Standards Board, 2015.
- [20] Insulated Conductors Committee of the IEEE Power and Energy Society, IEEE Std 575-2014, "IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV," IEEE-SA Standards Board, 2014.

### زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Power Swing
  - <sup>2</sup> Load encroachment
  - <sup>3</sup> Voltage instability
  - <sup>4</sup> Fault resistance
  - <sup>5</sup> Cascading Failure
  - <sup>6</sup> Blackout
  - <sup>7</sup> Under Reach
  - <sup>8</sup> Over Reach
  - <sup>9</sup> Single Line Diagram (SLD)
  - <sup>10</sup> Power Swing Blocking (PSB)

