بررسی تشخیص اشتباه جهت در رله دیستانس، هنگام وقوع خطاهای اتصال به زمین خطوط موازی و ارائه راهکار بهینه

کامران داودی[۱]، محمدرضانژاد[۱]، مسیح فهیمی[۱]، علی عمادی[۲]

[۱] گروه حفاظت و کنترل ، شرکت برق منطقه‌ای مازندران و گلستان ، ساری، kdavoudi@mazrec.co.ir

[۲] کارشناس فنی امور انتقال گلستان، شرکت برق منطقه‌ای مازندران و گلستان ، گرگان، Aemadi@mazrec.co.ir

چکیده

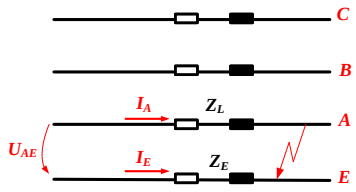
در ایستگاه‌های تغذیه‌شده از یک منبع با دو خط موازی، درصورت وقوع حادثه برروی یکی از خطوط در نزدیکی ایستگاه بار، هر دو رله دیستانس ایستگاه منبع، خطا را در زون ۲ خود مشاهده می‌کنند. با این حال علی‌رغم بازشدن کلید خط حادثه دیده در ایستگاه بار با عملکرد زون ۱ رله دیستانس، امکان اشتباه تشخیص جهت خطا توسط رله دیستانس خط سالم موازی در ایستگاه منبع به دلیل برگشت جریان خطا از نوترال ترانس‌های ایستگاه بار وجود دارد. ازاین‌رو در این مقاله به بررسی نحوه تشخیص اشتباه رله‌های دیستانس در خطوط موازی درحالت خطای اتصال به زمین پرداخته شده و نشان داده می‌شود که براساس روابط محاسبه امپدانس خطا توسط رله‌های دیستانس، امکان اشتباه درتشخیص جهت خطا توسط این رله‌ها وجود دارد. در ادامه نیز راهکارهای بهینه حل این مسئله ارائه شده است.

کلمات کلیدی

رله دیستانس، خطوط موازی، خطای تکفاز، تشخیص جهت.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین تجهیزات حفاظتی شبکه برق، رله‌های دیستانس می‌باشندکه به منظور حفاظت از خطوط انتقال وفوق‌توزیع در برابر وقوع حوادث و جداسازی خط حادثه دیده از شبکه اصلی در کمترین زمان از آن‌ها استفاده می‌شود[1,2]. همچنین این رله‌ها به عنوان حفاظت پشتیبان خطوط پیش‌رو درصورت عدم عملکرد حفاظت‌های مربوط به آن خط در اثر عواملی ازجمله خرابی رله، قطع DC ایستگاه و ... نیز استفاده می‌شوند. مبنای عملکرد این رله‌ها براساس محاسبه امپدانس خطا با استفاده از مقادیر ولتاژ و جریان دریافتی از تجهیزات اندازه‌گیری CT و CVT نصب شده بر روی خطوط می‌باشد. رله‌های دیستانس بر مبنای محاسبه امپدانس دیده شده و قرارگیری آن امپدانس در زون‌های حفاظتی خود، در زمان مشخص‌شده برای هر زون عمل می‌کنند[3]. این زون‌های حفاظتی عموما به دو شکل MHO و یا Quad می‌باشند که طبق دستورالعمل‌های موجود اولویت انتخاب شکل زون در رله‌های دیستانس، انتخاب نوعQuad آن است. طبق دستورالعمل‌های ابلاغی توانیر، رله‌های دیستانس در خطوط انتقال و خطوط فوق‌توزیع منشعب از ایستگاه‌های انتقال می‌بایست دارای ۳ زون Forward، یک زون Reverse و یک زون Non-Directional باشند[4]. در تنظیم رله‌های دیستانس خطوط، زون ۱ رله با تنظیم امپدانسی ۸۰٪ امپدانس خط اصلی و زون ۲ با تنظیم حداقل ۱۲۰٪ امپدانس خط اصلی تنظیم می‌شوند. همچنین زمان عملکرد زون ۱ در این رله‌ها به صورت آنی و با زمان 0 Sec و زون ۲ نیز با زمان 400 msec و هر دو به صورت Forward می‌باشند[5].



شکل ۱: نمایی از وقوع خطای فاز-زمین در فاز *A*

در هنگام وقوع خطای فاز-زمین، رله‌های دیستانس زیمنس طبق رابطه (۱) محاسبات امپدانس خطا جهت بررسی امکان قرارگیری آن در یکی از زون‌های دیستانس را انجام می‌دهند[6].

$$R_{A-E}=\frac{U_{A-E}}{I_A}=\frac{\mathrm{Cos}(\varphi_U-\varphi_A)-\frac{I_E}{I_A}.\frac{X_E}{X_L}.\mathrm{Cos}(\varphi_U-\varphi_E)}{1-\left(\frac{X_E}{X_L}+\frac{R_E}{R_L}\right).\frac{I_E}{I_A}.\mathrm{Cos}(\varphi_E-\varphi_A)+\frac{X_E}{X_L}.\frac{R_E}{R_L}.\left(\frac{I_E}{I_A}\right)}$$

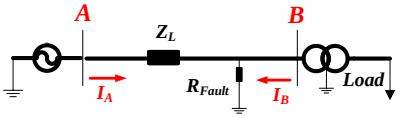
$$X_{A-E}=\frac{U_{A-E}}{I_A}=\frac{\mathrm{Sin}(\varphi_U-\varphi_A)-\frac{I_E}{I_A}.\frac{R_E}{R_L}.\mathrm{Sin}(\varphi_U-\varphi_E)}{1-\left(\frac{X_E}{X_L}+\frac{R_E}{R_L}\right).\frac{I_E}{I_A}.\mathrm{Cos}(\varphi_E-\varphi_A)+\frac{X_E}{X_L}.\frac{R_E}{R_L}.\left(\frac{I_E}{I_A}\right)} \qquad (۱)$$

که شرح هرکدام از پارامترهای رابطه (۱) در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) : معرفی پارامترها

عنوان پارامتر	معرفی پارامتر
R_{A-E}	مقاومت خطای فاز A - زمین
X_{A-E}	راکتانس خطای فاز A- زمین
U_{A-E}	ولتاژ فاز A-زمین
I_A	جریان فاز A
φ_u	زاویه ولتاژ فاز نسبت به مرجع
φ_E	زاویه جریان زمین نسبت به مرجع
φ_A	زاویه جریان فاز A نسبت به مرجع
I_E/I_A	نسبت فازور جریان زمین به جریان فاز A
X_E/X_L	نسبت راکتانس جبرانساز مولفه صفر
R_E/R_L	نسبت مقاومت جبرانساز مولفه صفر

طبق شکل ۲،در صورت وقوع خطای فاز-زمین بر روی یک خط در نزدیکی ایستگاه B، رله‌های دیستانس در ایستگاه‌های طرفین به دلیل تشخیص جریان بالا در فاز حادثه‌دیده و باتوجه به برگشت جریان از دوفاز سالم و ایجاد یک I_E(جریان زمین) و باتوجه به زوایای جریان فاز و زمین آن خط، طبق رابطه (۱) امپدانس محل حادثه رله محاسبه کرده و رله دیستانس ایستگاه B به دلیل تشخیص خطا در زون۱، به صورت آنی و با زمان صفر و رله دیستانس ایستگاه A به دلیل تشخیص خطا در زون۲، با زمان ۴۰۰ میلی‌ثانیه اقدام به ارسال فرمان تریپ می‌کند.

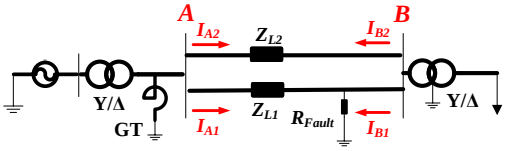


شکل ۲: نمایی از وقوع خطای فاز-زمین بین دو ایستگاه A و B.

بااین‌حال درصورتی‌که از دوخط موازی برای تغذیه ایستگاه B استفاده شود، در هنگام وقوع خطای فاز-زمین در نزدیکی ایستگاه B بر روی یکی از خطوط، امکان عملکرد اشتباه رله دیستانس خط سالم در ایستگاه A وجود دارد.

۲- بررسی عملکرد رله‌های دیستانس دردو خط موازی

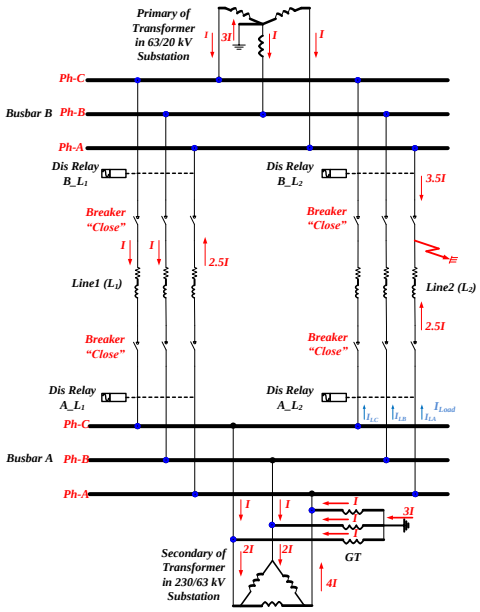
طبق شکل ۳، درصورتی‌که یک ایستگاه بار، با دوخط موازی تغذیه شود می‌بایست عملکرد رله‌های دیستانس هر دو خط در زمان وقوع حادثه در یکی از آن دو خط مورد بررسی قرارگیرد.



شکل ۳: دیاگرام تغذیه ایستگاه بار از ایستگاه منبع با دو خط موازی.

در شکل ۳، ایستگاه A به عنوان ایستگاه منبع بوده که ازطریق دو خط موازی L_1 و L_2، ایستگاه بار B را تغذیه می‌کند. ایستگاه A دارای یک ترانسفورماتور ۲۳۰/۶۳ کیلوولت با آرایش Y/Δ بوده که در سمت ۶۳ کیلوولت آن یک GT نصب شده است. همچنین ایستگاه B نیز دارای یک ترانسفورماتور ۶۳/۲۰ کیلوولت با آرایش Y/Δ بوده که سمت Y آن زمین شده است.

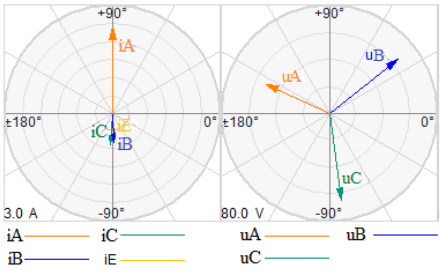
آرایش گسترده شکل ۳، به صورت شکل ۴ می‌باشد. درصورت وقوع حادثه بر روی خط L_2 در نزدیکی ایستگاه B، رله دیستانس B_L_2 خطا را در زون ۱ و رله‌های دیستانس A_L_1 و A_L_2 خطا را در زون ۲ خود تشخیص می‌دهند.



شکل۴: مسیرهای جریان خطا قبل‌از بازشدن کلیدخط L_2 در ایستگاه B.

باتوجه‌به ماهیت خطای فاز-زمین، مسیر جریان خطا از نوترال سمت Y ترانسفورماتور ایستگاه B و GT ایستگاه A بسته می‌شود که در شکل ۴

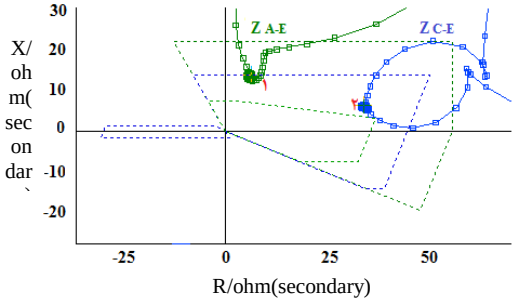
مسیرهای جریان خطا نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود جریان فاز A در خطوط L_1 و L_2 برابر با 2.5I مـی‌باشـد و درنتیجـه 3.5I جریان خطا از فاز A خط L_2 در ایستگاه B عبور می‌کند. در ایـن حالـت، رله دیستانس B_L_2 به‌صورت آنی اقدام به ارسال فرمان تریپ نموده که با لحاظ‌کردن تاخیرهای تشخیص، ارسال و سایر تاخیرهای مکانیکی کلیدها، بریکرهای خط L_2 در ایستگاه B در حدود ۵۰ الی ۱۰۰ میلی ثانیـه قطـع می‌شوند. جریان و ولتاژ دیده‌شده توسط رله دیستانس A_L_1 در ایسـتگاه A بر روی خط L_1 به صورت شکل ۵ می باشد.



شکل ۵: جریان و ولتاژ رله A_L_1 در ایستگاه A برروی خط L_1 قبل‌از بازشدن کلیدخط L_2 در ایستگاه B.

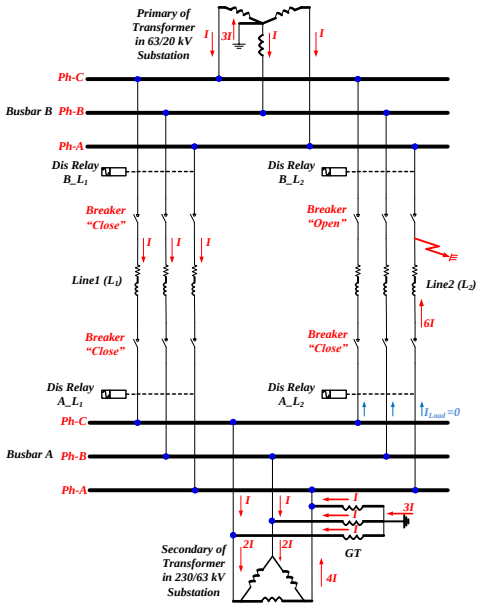
همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده اسـت، جریـان فـاز A در خط L_1، بیش از مجموع جریان فازهای دیگر می‌باشد از این رو جریان I_E ایجاد می‌شود بطوری که $I_{L1}>I_E$. باتوجه به اینکه خطا در فـاز A رخ داده، رله A_L_1 نیز خطا را در فاز A تشخیص داده و مسـیر حرکـت امپـدانس خطا برای خطای $Z_{A\text{-}E}$ به صورت شکل ۶ میباشد به طوری که رلـه، خطـا را در زون ۲ واقع در نقطه ۱ تشخیص می‌دهد (در این زمان $Z_{C\text{-}E}$ خارج از صفحه مختصات است).

باقطع شدن بریکر خط L_2 در ایستگاه B، مسیرهای جریان خطا به صورت شکل ۷ خواهد بود. در این حالت جریان نوترال ترانسفورماتور ایسـتگاه B بصورت سه جریان همفاز، از طریق خط L_1، به محل خطا تزریق می‌شود.

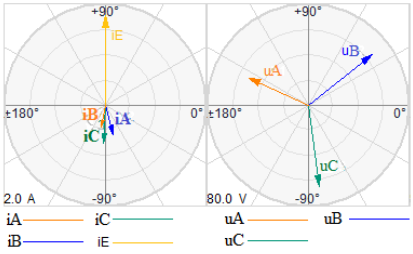


شکل ۶: مسیر حرکت امپدانس در طی زمان خطا.

جریان و ولتاژ دیده شده توسط رله دیسـتانس A_L_1 درایسـتگاه A برروی خط L_1 بعد از بازشدن کلید خط L_2 در ایستگاه B، بصورت شـکل ۷ می‌باشد. با توجه به همفاز بودن جریان فازها، همان‌طور که در شـکل ۷ نشان داده شده است جریان زمین (I_E) دیده‌شده توسط رله دیسـتانس در خط L_1، بیش از جریان فازها می‌باشد بطوری که $I_E>I_{L1}$. در ایـن حالـت، طبق شکل ۶، مسیر حرکت امپدانس خطا $Z_{A\text{-}E}$ از زون‌های رله دیستانس A_L_1، خارج شده و درکمتر از 13msec امپدانس خطا $Z_{C\text{-}E}$ وارد زون ۲ رله می‌شود. به علت فاصله زمانی کوتاه بـین خـروج $Z_{A\text{-}E}$ و ورود $Z_{C\text{-}E}$ بـه زون ۲، فانکشن دیستانس ریست نشده و همچنان خطا را در زون ۲ خـود تشخیص می‌دهد (محل شماره ۲ در شکل ۶).



شکل۷: مسیرهای جریان خطا بعداز بازشدن کلیدخط L_2 در ایستگاه B.



شکل ۸: جریان و ولتاژ رله A_L_1 در ایستگاه A برروی خط L_1 بعداز بازشدن کلیدخط L_2 در ایستگاه B.

در برخی حالات و در شرایط واقعی شبکه، مانند خطـای رخ داده بـر روی خطوط ۶۳ کیلوولـت ۲۳۰ کردکـوی – بنـدرترکمن در شـبکه بـرق مازندران و گلستان، و همان طور که در شـکل ۸ نشـان داده شـده اسـت، جریان برگشتی فازهای خط L_1، بعد از بازشدن کلید خط L_2 در ایسـتگاه B، کاملا همفاز نبوده و ولتاژها کاملا متقارن نیستند مقادیر برداری ولتاژ و جریان در حادثه خط یادشده به صورت جدول ۲ می‌باشد.

با استفاده از رابطه (۱)، و به دلیل اینکه $\left|\varphi_{U_{CE}}-\varphi_E\right|<180^o$ (واقع در ربع سوم محور مختصات) و $\varphi_E-\varphi_C>180^o$ (واقع در ربع سوم محور مختصات) برای فاز C، تشخیص داده شده است، از این رو مقادیر X_{CE} و

R_{CE} محاسبه‌شده توسط رله دیستانس A_L_1 مقدار مثبتی شده ودر ربع اول محورمختصات قرارگرفته و رله دیستانس بصورت خطای Forward آن را تشخیص می‌دهد. همچنین یکی دیگر از عوامل موثر درتشخیص اشتباه رله دیستانس A_L_1، نسبت $I_E>I_{L3}$ می‌باشد. با توجه به جدول ۱، در این حادثه نسبت $I_E>I_{L3}$ برابربا ۲,۵۷ بوده است.

جدول (۲) : مقادیر ولتاژ و جریان دیده شده توسط رله A_L_1

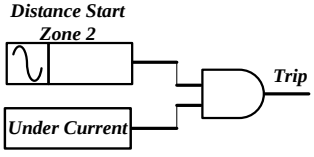
مقادیر ولتاژ	مقادیر جریان
$V_A= 51.9\angle +156^o$ $V_B= 64.9\angle +38^o$ $V_C= 64.8\angle -86^o$	$I_A =0.4\angle -103^o$ $I_B=0.6\angle -75^o$ $I_C= 0.7\angle -94^o$ $I_E=1.8\angle +90^o$

به طورخلاصه، باتوجه به مقادیر زاویه جریان و ولتاژ فاز C، طبق رابطه (۱)، مقادیر R_{C-E} و X_{C-E} عددی مثبت بوده و بدلیل نسبت بالای $I_E>I_{L1}$، مخرج این روابط عدد بزرگی‌شده و درنتیجه مقدار امپدانس X_{C-E} رله عدد مثبت کوچکی تشخیص داده می‌شود که حتی با وجود اینکه جریان فاز C در خط L_2 بعد از بازشدن کلید، حدود 0.3 جریان فاز C قبل از بازشدن کلید است، ولی امپدانس تشخیصی رله مقدار کمتری را نشان می‌دهد که حتی بسیار به زون ۱ نیز نزدیک است.

۳- راهکارهای حل مسئله تشخیص اشتباه جهت رله دیستانس در خطوط موازی

یکی از راهکاری مناسب برای حل این مسئله و جلوگیری ازخروج خط سالم درهنگام وقوع خطا در خط موازی با آن، استفاده از تله پروتکشن در حفاظت دیستانس خطوط می‌باشد. باوجود تله‌پروتکشن، بعد از تشخیص خطا در زون ۱ توسط رله B_L_2، یک سیگنال تله‌پروتکشن برای رله A_L_2 صادرشده و این رله نیز با زمان زون ۱ قطع خواهد کرد و با رفع خطا، رله‌های دیگر عملکردی نخواهند داشت.

راهکار دوم فعال‌کردن فانکشن Loss of Load و یا ایجاد این منطق در رله‌های فاقد این فانکشن با AND کردن استارت دیستانس زون ۲ و Undercurrent هریک از فازها می‌باشد. بدین‌صورت‌که در زمان بازشدن کلید خط L_2 در ایستگاه B، رله دیستانس A_L_2 باتشخیص صفرشدن جریان فازهای سالم و تشخیص Loss of Load اقدام به صدور فرمان تریپ آنی در زمان کمتر از زمان زون ۲ کرده و با رفع خطا، ازگسترش احتمالی حادثه جلوگیری شود.



شکل ۹: نحوه ایجاد منطق Loss of Load در رله دیستانس.

همچنین راهکار سوم درحالتی که بیش از یک ترانسفورماتور در ایستگاه B وجود داشته باشد، بهره‌برداری از ترانسفورماتورها در ایستگاه B به صورت سکشن باز است. دراین صورت، باتوجه به بالا رفتن امپدانس مسیر زمین در ایستگاه B در هنگام وقوع خطا، جریان کمتری از نوترال ترانسفورماتورها عبور کرده و احتمال ورود مسیر امپدانس به درون زون‌های رله دیستانس بسیار کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شده است که در خطوط موازی تغذیه‌کننده یک ایستگاه بار، امکان خروج هردو خط درزمان وقوع خطا دریکی از آن‌ها وجود دارد. این خروج در برخی حالات خطا و ناشی از اختلاف زوایای ولتاژ، جریان خطای زمین و جریان خطای فاز است. به همین دلیل امکان تشخیص اشتباه رله دیستانس خط سالم امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. ازاین‌رو بمنظور جلوگیری از خروج اشتباه خط سالم، استفاده از تله پروتکشن ویا فعال‌کردن فانکشن Loss of Load در رله و یا بهره برداری به صورت سکشن باز از ترانسفورماتورهای ایستگاه بار، ضروری می‌باشد.

مراجع

[1] Korashy A, Kamel S, Jurado F, Eslami M. "Optimal coordination of distance relays and non-standard characteristics for directional overcurrent relays using a modified African vultures optimization algorithm", *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023 Mar 29.

[2] Ghorbani A, Mehrjerdi H, Iqbal A. "Modeling of Digital Distance Relay in EMTPWorks Considering Protective Zones and Trip Characteristics", *In2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)* 2019 Nov 19 (pp. 1-6).

[3] Taheri B, Hosseini SA, Salehimehr S."An overview of power swing detection methods in distance relays and the factors involved," *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023 Feb;17(4):743-61.

[۴] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت بر امنیت شبکه، مدیریت مطالعات و حفاظت شبکه، نظامنامه سیستم رله و حفاظت شبکه انتقال برق ایران، ویرایش ششم، اردیبهشت ۱۴۰۲.

[۵] معاونت هماهنگی تولیدشرکت توانیر، دفتر فنی انتقال، دستورالعمل نحوه محاسبه تنظیم رله‌های حفاظتی بخش فوق توزیع، اسفند ۱۳۹۱.

[6] Siemens AG. Distance Protection 7SA522 V4. 74: Manual.