الگوریتم جدید رله‌ی دیستانس در خطوط انتقال دو مداره جبران شده سری برای خطاهای cross-country با در نظر گرفتن اثر امپدانس زمین

محمد پاریاد[1]، دانشجوی کارشناسی ارشد ، کاظم مظلومی[2]، استادیار

۱- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران – paryad_m@yahoo.com
۲- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - kmazlumi@znu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، الگوریتم جدیدی جهت حفاظت ناحیه اول رله‌ی دیستانس در خطوط انتقال دو مداره جبران شده با خازن سری برای خطای cross-country با در نظر گرفتن اثر امپدانس زمین، پیشنهاد شده است. خطای cross-country به صورت دو خطای تکفاز که در فازها و مکان‌های متفاوت خط دو مداره رخ می‌دهد، در نظر گرفته شده است. در این روش، رابطه‌ای جدید برای محاسبه جریان انتهای خط برحسب جریان ابتدای خط به دست آمده است. در الگوریتم پیشنهاد شده، با استفاده از داده‌های یکی از دو انتهای خط، مکان های هر دو خطای تکفاز رخ داده در خط را با دقت مناسبی مشخص می‌کند. عملکرد این روش با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار MATLAB / SIMULINK بر روی خطی دو مداره به طول ۳۰۰ کیلومتر و جبران شده با خازن سری در دو انتها، در شرایطی که سیستم با امپدانس زمین شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: خطوط انتقال دو مداره، جبران سازی سری، خازن سری، حفاظت دیستانس، خطای cross-country.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۰۹/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول : کاظم مظلومی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : زنجان-دانشگاه زنجان-گروه برق

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

۱- مقدمه

خطوط انتقال جبران شده با خازن سری به دلایل فراوانی چون افزایش قابلیت اطمینان، افزایش ظرفیت خط، کاهش تلفات و بهبود پایداری گذرا و ماندگار در سیستم های قدرت مدرن مورد استفاده قرار می-گیرند[۱]. خازن سری* (SC) و تجهیزات حفاظتی آن† (MOV) علی-رغم اثرات مفیدی که روی عملکرد سیستم قدرت دارند، مشکلات و شرایط نامطلوبی را برای رله‌های حفاظتی ایجاد می‌کنند.

خطوط انتقال دو مداره با توجه به مزایای زیست محیطی و اقتصادی که نسبت به خطوط تک مداره دارند، به طور گسترده‌ای در سیستم‌های قدرت مدرن استفاده شده‌اند[۲ و۳] و حفاظت دیستانس عموماً به عنوان یک حفاظت اصلی در خطوط موازی استفاده می-شود[۴]. در حدود ۲۰ درصد از قطعی‌های مشترکین بر اثر بروز خطا در سیستم‌های انتقال است [۵] و حفاظت دیستانس خطوط دومداره تحت خطای cross-country به دلیل کوپلینگ متقابل دومدار بسیار مشکل‌تر از خطوط تک مداره است[۲]. تشخیص اشتباه رله دیستانس به سبب خطای cross-country ممکن است با وجود آنکه خطاهای رخ داده سه فاز نیستند، منجر به تریپ سه فاز هر دو مدار شود. این شرایط ممکن است، منجر به خروج ژنراتورها به دلیل از دست رفتن سنکرونیسم شود [۶].

اصطلاح cross-country برای دو خطای تکفاز که در دو مکان مختلف سیستم رخ می‌دهد، استفاده می‌شود. خطای cross-country متداول، به صورت خطای تکفاز در هر نقطه‌ای از سیستم شروع می-شود[۷ و۸]. بازه‌ی زمانی کوتاهی از خطای تکفاز تا خطای cross-country وجود دارد که در مقایسه با مدت خطا خیلی کوتاه است[۴]، در نتیجه می‌توان خطای کراس‌کانتری را به صورت دو خطای تکفاز هم زمان فرض کرد. ولتاژ در هادی‌های دو فاز سالم مدار در حد ولتاژ فاز به فاز سیستم افزایش می‌یابد. این افزایش ولتاژ در فازهای سالم سبب آسیب به برق‌گیرهای همان بخش شبکه یا بخش‌های دیگر می-شود. در نتیجه جریان خطا معمولاً بیشتر از جریان خطای تکفاز به زمین است [۷] .

به دلیل این‌که خطاهایی که در شبکه رخ می دهد، اغلب از نوع تکفاز هستند، بنابراین زمین کردن سیستم قدرت بسیار حائز اهمیت است. در نتیجه نحوه زمین کردن شبکه اثر قابل توجهی در حفاظت سیستم های قدرت دارد [۹].

در[۲]، الگوریتم تشخیص خطای رله دیستانس بر روی خط دومداره مورد بررسی قرار گرفته است. خطوط دارای کوپلینگ متقابل یکسان بین فازهای هر مدار و فازهای دو مدار با هم می‌باشند. البته در این مطالعه خطا دوفاز فرض شده است و جبران‌سازی نیز در خطوط منظور نشده است. در[۴]، خط دومداره مورد بررسی دارای شرایطی مشابه [۲] می‌باشد و خطای دوفاز به زمین در مکانی به فاصله یکسان از ابتدای خط مورد مطالعه قرار گرفته است.

در[۱۰]، الگوریتم رله دیستانس برای حالتی پیشنهاد شده است که خطای دوفاز و دوفاز به زمین در مکانی به فاصله یکسان از ابتدای خط و در خطی دومداره با شرایطی مانند [۲] که با خازن سری در دو انتهای خط جبران شده، تخمین زده شده است. در این روش، از جریان جاری شده از انتهای خط یا به عبارتی جریان عبوری از مقاومت خطا چشم‌پوشی شده است که مطالعه را شامل خطا خواهد کرد.

در[۱۱] و [۱۲]، شبکه‌ای از دوسو تغذیه شامل خطی دومداره و دارای کوپلینگ متقابل که فاقد جبران‌سازی می‌باشد در نظر گرفته شده است. در [۱۱]،خطای مورد مطالعه، خطای دوفاز در یک مدار بوده است و در [۱۲] نیز مطالعه برای خطای تکفاز انجام شده و فاصله‌ی خطا به‌دست آمده است.

ملاحظه شد که در مطالعات گذشته، در برخی مقالات مکان‌یابی خطا، جبران‌سازی سری منظور شده است؛ و اگر جبران سازی منظور شده است، نوع خطا در این مقالات cross-country نبوده است و خطای دوفاز مطالعه شده که تعیین محل خطا در آن بسیار ساده تر از خطای cross-country می باشد. با توجه به مطالعاتی که تا کنون در زمینه حفاظت دیستانس صورت گرفته، تاثیر کوپلینگ متقابل بین تمامی فازها، جبران‌سازی سری خط انتقال و اثر زمین کردن سیستم به‌طور هم‌زمان و تحت خطای cross-country مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین الگوریتمی جهت حفاظت خطوط انتقال در برابر خطای cross-country ارائه نشده است. در واقع خطای cross-country در مقالات گذشته به صورت خطای دوفاز مدل شده است که در آن فاصله‌ی هر دو خطا از ابتدای خط یکسان هستند، درحالی‌که اغلب خطای cross-country در دو نقطه‌ی متفاوت و در فازهای متفاوت در شبکه رخ می‌دهد و از این فاکتور که موجب پیچیدگی حفاظت دیستانس می‌شود، صرف‌نظر شده است.

در این مقاله خطای cross-country به صورت دو خطای تکفاز، در فازهای مختلف و در مکان‌های مختلف بر روی خط دومداره جبران شده با خازن سری (جبران سازی در دو انتهای خط صورت گرفته) در نظر گرفته شده است. به‌دست آوردن الگوریتمی جهت تنظیم امپدانس ناحیه اول رله دیستانس در شرایط خطای cross-country در خطوط انتقال دومداره با در نظر گرفتن کوپلینگ متقابل بین تمامی فازها، تاثیر جبران سری خط انتقال و تاثیر زمین کردن سیستم موضوع مورد مطالعه در این مقاله می‌باشد. در این مقاله الگوریتم جدیدی برای تخمین مکان هر دو خطای تکفاز به وسیله‌ی داده‌های یک سمت خط در خطوط انتقال جبران شده با خازن سری که تحت خطای cross-country قرار گرفته‌اند، ارائه داده است. الگوریتم ارائه شده فاصله‌ی خطای نزدیک‌تر و مقاومت خطای رخ داده را تخمین زده و رابطه‌ای را برای به‌دست آوردن جریان انتهای آن خط ارائه می‌دهد. با استفاده از جریان انتهای خط به‌دست آمده و تاثیر آن بر مکان خطای دیگر،

* Series Capacitor (SC)
† Metal-Oxide Varistor(MOV)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

فاصله‌ی آن خطای دیگر را نیز به‌دست می‌آورد. در این مقاله، به منظور بررسی صحت الگوریتم ارائه شده، شبیه‌سازی بر روی خط انتقال دومداره جبران‌شده با خازن سری در طرفین در نرم‌افزار MATLAB / SIMULINK صورت گرفته است.

سایر بخش‌های مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش ۲ مدلی برای خازن و حفاظت آن ارائه شده است. سیستم زمین و الگوریتم تخمین امپدانس خطا برای خطای cross-country در بخش‌های ۳ و ۴ شرح داده شده اند. در بخش ۵ سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. نتیجه‌گیری در بخش ۶ ارائه شده است.

۲- مدل خازن سری و حفاظت آن (SC/MOV)

۲-۱- جبران‌سازی سری

در شبکه های قدرت کنترل ولتاژ با استفاده از سه روش اصلی زیر صورت می‌گیرد[۱۳]:

- با تزریق قدرت راکتیو توسط جبران‌کننده‌های موازی مانند خازن و جبران کننده‌های استاتیک
- استفاده از ترانسفورماتور مجهز به تپ‌چنجر
- از طریق کم کردن راکتانس القایی خطوط انتقال با نصب خازن سری

بانک‌های خازنی سری در بهبود بازده سیستم و افزایش توانایی انتقال توان خطوط نقش مفیدی دارند. این خازن‌ها اغلب برای کاهش راکتانس القایی خطوط انتقال استفاده می‌گردند و دارای فواید زیر می‌باشند:

- بهبود پایداری ماندگار و گذرای سیستم
- تقسیم بهتر بار بر روی خطوط موازی
- کاهش تلفات سیستم انتقال
- کاهش افت ولتاژ در خلال اغتشاشات شدید
- تنظیم بهتر بارگیری خطوط

ضریب جبران‌سازی سری (k) به صورت (۱) تعریف می‌شود که در واقع نسبت بین امپدانس خازن سری به امپدانس کل خط است.

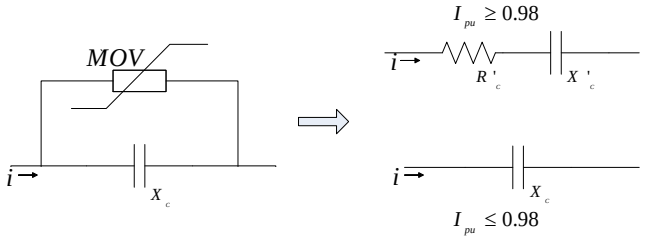
$$k = \frac{X_C}{X} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱)، X_C امپدانس خازن سری و X امپدانس کل خط است.

در هنگام رخ داد اتصال کوتاه، ولتاژ دو سر خازن سری به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. به همین دلیل خازن‌های سری باید در مقابل اتصال کوتاه سیستم حافظت شوند و احتیاج به تجهیزات کامل حفاظتی دارند. حفاظت خازن سری طوری طراحی می‌شود که در زمانی که ولتاژ از سطح طراحی شده افزایش می‌یابد، خازن صدمه نبیند.

۲-۲- مدل Goldsworthy

جهت اندازه‌گیری صحیح امپدانس خطا در خطوط انتقال جبران سازی شده با خازن سری توسط رله دیستانس، اندازه‌گیری امپدانس معادل خازن سری و حافظت آن (MOV) از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور در این مقاله برای تجزیه و تحلیل خطای رخ داده در خط انتقال دومداره که در دو انتها با خازن سری جبران شده است از مدل Goldsworthy[۱۴] استفاده شده است. مدل Goldsworthy در شکل (۱) نشان داده شده است و این مدل خطی خازن سری حفاظت شده به‌وسیله‌ی MOV نتایج عالی را برای محاسباتی که قبلاً غیرممکن بوده، فراهم کرده است [۱۴].



شکل(۱): مدل Goldsworthy خازن سری(SC) و حفاظت آن(MOV)

در شکل (۱) نشان داده شده که برای Ipu ≥۰/۹۸ ترکیب موازی خازن و حفاظت آن به وسیله‌ی امپدانس خطی (مقاومت و راکتانس سری) تقریب زده می‌شود. مقادیر این تقریب‌ها به وسیله فرمول‌های زیر به‌دست می‌آید[۱۵]:

$$R'_C = X_C\left(0.0745 + 0.49e^{-0.243i_{pu}} - 35e^{-5i_{pu}} - 0.6e^{-1.4i_{pu}}\right) \qquad (۲)$$

$$X'_C = X_C\left(0.1010 - 0.005749i_{pu} + 2.088e^{-0.8566i_{pu}}\right) \qquad (۳)$$

معادلات (۲) و (۳) برای مقادیر Ipu ≥۰/۹۸ قابل اعمال هستند. Ipu مقدار پریونیت جریان خطای عبوری از ترکیب موازی خازن و حفاظت آن است و مقدار پایه این جریان، سطح جریان حفاظتی خازن می‌باشد.

در حین خطای زمین مقدار جریان خطای عبوری از بانک خازن خیلی بالاست (Ipu ≥۰/۹۸)، بنابراین حفاظت خازن شروع به هدایت بخشی از جریان خطا می‌کند. درنتیجه ترکیب موازی خازن و حفاظت آن شبیه یک مقاومت و راکتانس سری معادل عمل می‌کند. در حالیکه در شرایط نرمال، مقدار پریونیت جریان عبوری از بانک خازنی کم‌تر از ۰/۹۸ است (Ipu ≤۰/۹۸) و بنابراین حفاظت خازن جریانی را هدایت نمی‌کند. در نتیجه معادلات Goldsworthy قابل اعمال نیستند و مقدار بانک خازن تغییری نمی‌کند و برابر Xc باقی می‌ماند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

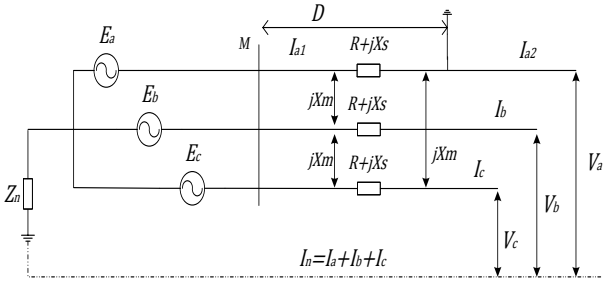
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

۳- سیستم زمین

اهمیت نقطه زمین وقتی ظاهر می شود که درشبکه‌های برق یک اتصال فاز به زمین بروز می‌نماید. در این حالت جریان فاز معیوب از طریق زمین به نقطه خنثی برگشت داده می شود. درصورتی‌که نقطه‌ی خنثی به زمین وصل نشده باشد، جریان اتصالی فاز به زمین به علت عدم وجود مسیر برگشت، ناچیز و خیلی کم‌تر از جریان معمولی فاز بوده و این امر موجب بالا رفتن ولتاژ فازهای سالم نسبت به زمین شده که خود موجب بروز اشکالاتی در ایزولاسیون شبکه خواهد بود [۱۶].

با توجه به شکل (۲)، اگر فرض کنیم خطای تک‌فازی در فاز a و به فاصله D از ابتدای شبکه رخ داده باشد، برای شبکه‌ی موجود رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$E_a = D\left[\left(R + jX_s\right)I_{a1} + jX_m\left(I_b + I_c\right)\right] + Z_n I_n \qquad (۴)$$



شکل (۲): شبکه‌ای زمین شده با امپدانس

همان‌طور که می‌دانیم رله دیستانس براساس فاصله محل خطا تا رله عمل می‌کند، بنابراین با توجه به رابطه (۴) فاصله محل خطا تا رله از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

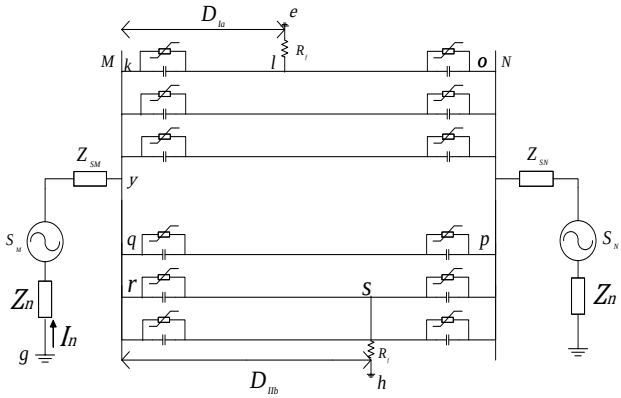
$$D = \frac{E_a - Z_n I_n}{\left(R + jX_s\right)I_{a1} + jX_m\left(I_b + I_c\right)} \qquad (۵)$$

همان طور که در رابطه (۵) مشاهده می‌شود تعیین فاصله محل خطا تا رله و درنتیجه عملکرد حفاظت دیستانس تحت تاثیر Z_n است و هرچه مقدار این امپدانس بیشتر شود تاثیر آن نیز افزایش می‌یابد، پس برای اینکه حفاظت دیستانس عملکرد صحیحی داشته باشد باید امپدانسی را که شبکه با آن زمین شده است، در نظر گرفت.

۴- الگوریتم پیشنهادی تخمین امپدانس

در شکل (۳)، فرض شده که خطاهای تک‌فاز (خطای Cross-Country) در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم رخ داده است. مطابق شکل خطای فاز a نسبت به فاز b در فاصله‌ی نزدیک‌تری از ابتدای خط قرار دارد و امپدانس متقابل بین فازهای مدار با هم برابر فرض شده اند. شبکه با امپدانس Z_n زمین شده است و جریان عبوری از آن I_n با اعمال KCL در نقطه‌ی y برابر است با:

$$I_n = I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{IIa} + I_{IIb} + I_{IIc} \qquad (۶)$$



شکل(۳): خط‌دومداره با جبران‌سازی سری تحت خطای cross-country در شبکه‌ی با امپدانس زمین‌شده

نمادها و زیروندهای به کار رفته در روابط به صورت زیر تعریف می‌شوند:

D: فاصله محل خطا از ابتدای خط

R_f: مقاومت خطا

I و U: به ترتیب جریان خطوط و ولتاژ باس‌ها

I^r: جریان انتهای خطوط در شرایط خطا

Z_m: امپدانس متقابل بین فازهای خط دومداره

Z_I و Z_{II}: به ترتیب امپدانس خودی خط مدار اول و مدار دوم

I و II: به صورت زیروند به ترتیب بیانگر کمیت‌های مربوط به مدار اول و مدار دوم

a و b و c : به صورت زیروند به ترتیب بیانگر کمیت‌های مربوط به فازهای a و b و c

f: به صورت زیروند بیانگر کمیت‌های مربوط به خطا

M و N: به صورت زیروند به ترتیب بیانگر کمیت‌های مربوط به باس M و N

R'_C و X'_C: به ترتیب بیانگر مقاومت و امپدانس خازنی تقریب‌زده شده‌ی جبران‌ساز سری با (۲) و (۳)

X_C: امپدانس خازنی جبران‌ساز سری

با اعمال قانون ولتاژ کیرشهف (KVL) در مسیر gykle داریم:

$$U_{Mla} = D_{la}\left[Z_{la}I_{la} + Z_m\left(I_{lb} + I_{lc} + I_{IIa} + I_{IIb} + I_{IIc}\right)\right] + \left(R'_{CMla} - jX'_{CMla}\right)I_{la} + R_f I_{laf} + Z_n I_n \qquad (۷)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

در (۷)، مقادیر Z_{Ia} و Z_m مشخص هستند. مقادیر معادل جبران‌ساز سری هم توسط روابط (۲) و (۳) به‌دست می‌آید. جریان خطوط و ولتاژها نیز توسط ابزار اندازه‌گیری در ابتدای خط معین می‌شود. به عبارتی آنچه در (۷) نامشخص است جریانی است که از مقاومت خطا عبور می‌کند (I_{Iaf})؛ با اعمال قانون جریان کیرشهف (KCL) در این نقطه داریم:

$$I_{Iaf} = I_{Ia} - I^{r}_{Ia} \qquad (۸)$$

در (۸)، مقدار I^{r}_{Ia} جریان انتهای خط است که با استفاده از ابزار اندازه‌گیری در ابتدای خط به‌دست نمی‌آید؛ بنابراین برای حذف آن از (۸) با اعمال KVL در مسیر kopqk داریم:

$$\begin{aligned}&\left[D_{Ia}\left(Z_{Ia}-Z_m\right)+\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)\right]I_{Ia}+\\&\left[\left(1-D_{Ia}\right)\left(Z_{Ia}-Z_m\right)+\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)\right]I^{r}_{Ia}\\&+\left(Z_m-Z_{IIa}-jX_C\right)I_{IIa}=0\end{aligned} \qquad (۹)$$

بنابراین:

$$I^{r}_{Ia}=\frac{\begin{array}{c}\left[D_{Ia}\left(Z_{Ia}-Z_m\right)+\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)\right]I_{Ia}\\+\left(Z_m-Z_{IIa}-jX_C\right)I_{IIa}\end{array}}{\left(1-D_{Ia}\right)\left(Z_m-Z_{Ia}\right)-\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)} \qquad (۱۰)$$

با جایگذاری (۱۰) در (۸) داریم:

$$I_{Iaf}=I_{Ia}-\left[\frac{\begin{array}{c}\left[D_{Ia}\left(Z_{Ia}-Z_m\right)+\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)\right]I_{Ia}\\+\left(Z_m-Z_{IIa}-jX_C\right)I_{IIa}\end{array}}{\left(1-D_{Ia}\right)\left(Z_m-Z_{Ia}\right)-\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)}\right]$$

در نتیجه:

$$I_{Iaf}=\frac{\begin{array}{c}\left[\left(Z_m-Z_{Ia}\right)-\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)-\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)\right]I_{Ia}\\-\left(Z_m-Z_{IIa}-jX_C\right)I_{IIa}\end{array}}{\left(1-D_{Ia}\right)\left(Z_m-Z_{Ia}\right)-\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)} \qquad (۱۱)$$

با جایگذاری (۱۱) در (۷) معادله زیر به‌دست می‌آید که مستقل از جریان عبوری از مقاومت محل خطاست.

$$\begin{aligned}U_{MIa}=&D_{Ia}\left[Z_{Ia}I_{Ia}+Z_m\left(I_{Ib}+I_{Ic}+I_{IIa}+I_{IIb}+I_{IIc}\right)\right]+\\&\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)I_{Ia}++Z_nI_n\\&R_f\left(\frac{\begin{array}{c}\left[\left(Z_m-Z_{Ia}\right)-\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)-\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)\right]I_{Ia}\\-\left(Z_m-Z_{IIa}-jX_C\right)I_{IIa}\end{array}}{\left(1-D_{Ia}\right)\left(Z_m-Z_{Ia}\right)-\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)}\right)\end{aligned} \qquad (۱۲)$$

معادله‌ی (۱۲) را می‌توان به فرم زیر نوشت.

$$\left(a_4+jb_4\right)D^2+\left(a_3+jb_3\right)D+\left(a_2+jb_2\right)R_f+\left(a_1+jb_1\right)=0 \qquad (۱۳)$$

که در آن

$$a_4+jb_4=\left(Z_{Ia}-Z_m\right)\left[Z_{Ia}I_{Ia}+Z_m\left(I_{Ib}+I_{Ic}+I_{IIa}+I_{IIb}+I_{IIc}\right)\right]$$

$$\begin{aligned}a_3+jb_3=&\left(Z_m-Z_{Ia}\right)\left[U_{MIa}-\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)I_{Ia}-Z_nI_n\right]+\\&\left(Z_m-Z_{Ia}-R'_{CNIa}+jX'_{CNIa}\right)\\&.\left[Z_{Ia}I_{Ia}+Z_m\left(I_{Ib}+I_{Ic}+I_{IIa}+I_{IIb}+I_{IIc}\right)\right].\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a_2+jb_2=&\left[\left(Z_m-Z_{Ia}\right)-\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)-\left(R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)\right]I_{Ia}\\&-\left(Z_m-Z_{IIa}-jX_C\right)I_{IIa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a_1+jb_1=&\left[U_{MIa}-\left(R'_{CMIa}-jX'_{CMIa}\right)I_{Ia}-Z_nI_n\right]\\&.\left(Z_{Ia}-Z_m+R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}\right)\end{aligned}$$

با تفکیک قسمت حقیقی و موهومی، معادله‌ی (۱۳) به یک دستگاه دو معادله دو مجهول تبدیل می‌شود که با حل آن جواب‌های زیر به‌دست می‌آیند:

$$D_{Ia}=\frac{b_1a_2-a_1b_2}{b_4a_2-a_4b_2} \qquad (۱۴)$$

$$R_f=\frac{\left(1-D_{Ia}\right)\left(a_4D_{Ia}-a_1\right)}{a_2} \qquad (۱۵)$$

بنابراین امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله در فاز a مدار اول برابرست با:

$$X_a=D_{Ia}*\mathrm{X}_{Ia} \qquad (۱۶)$$

با اعمال KVL در مسیر gyrsh داریم:

$$\begin{aligned}U_{MIIb}=&D_{IIb}\left[Z_{IIb}I_{IIb}+Z_m\left(D_{Ia}I_{Ia}+\left(1-D_{Ia}\right)I^{r}_{Ia}+I_{Ib}+I_{Ic}+I_{IIa}+I_{IIc}\right)\right]\\&+\left(R'_{CMIIb}-jX'_{CMIIb}\right)I_{IIb}+R_fI_{IIbf}+Z_nI_n\end{aligned} \qquad (۱۷)$$

$$U_{MIIb}=U_{MIb} \qquad (۱۸)$$

با توجه به (۱۷) و (۱۸) به‌دست می‌آید:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

$$U_{MIb}-\left(R'_{CMIIb}-jX'_{CMIIb}\right)I_{IIb}= D_{IIb}Z_{IIb}\left[I_{IIb}+\frac{Z_m}{Z_{IIb}}\left(D_{Ia}I_{Ia}+\left(1-D_{Ia}\right)I^{r}_{Ia}+I_{Ib}+I_{Ic}+I_{IIa}+I_{IIc}\right)\right]+R_f I_{IIbf} \quad (۱۹)$$

$$I_{fbb}=I_{IIb}+\frac{Z_m}{Z_{IIb}}\left(D_{Ia}I_{Ia}+\left(1-D_{Ia}\right)I^{r}_{Ia}+I_{Ib}+I_{Ic}+I_{IIa}+I_{IIc}\right) \quad (۲۰)$$

در معادله‌ی (۲۰) تمامی پارامترها جز I^{r}_{Ia} مشخص هستند. پارامتر ذکر شده از یک تقسیم جریان و با استفاده از (۱۴) و (۱۵) به‌دست می‌آید.

$$I^{r}_{Ia}=I_{Ia}\left(\frac{R_f}{R_f+\left(1-D_{Ia}\right)Z_{Ia}+R'_{CNIa}-jX'_{CNIa}}\right) \quad (۲۱)$$

در نتیجه

$$\left(\frac{U_{MIb}-\left(R'_{CMIIb}-jX'_{CMIIb}\right)I_{IIb}-Z_nI_n}{I_{fbb}}\right)-D_{IIb}Z_{IIb}-R_f\frac{I_{IIbf}}{I_{fbb}}=0 \quad (۲۲)$$

با فرض اینکه I_{IIbf} و I_{fbb} در یک فاز هستند[۸] حاصل‌ضرب R_f در نسبت این دو جریان عددی حقیقی است پس

$$imag\left(\frac{U_{MIb}-\left(R'_{CMIIb}-jX'_{CMIIb}\right)I_{IIb}-Z_nI_n}{I_{fbb}}\right)=imag\left(D_{IIb}Z_{IIb}\right) \quad (۲۳)$$

در نتیجه

$$D_{IIb}=\frac{imag\left(\frac{U_{MIb}-\left(R'_{CMIIb}-jX'_{CMIIb}\right)I_{IIb}-Z_nI_n}{I_{fbb}}\right)}{imag\left(Z_{IIb}\right)} \quad (۲۴)$$

$$X_{bb}=D_{IIb}*\mathrm{X}_{IIb} \quad (۲۵)$$

با استفاده از (۱۴)، (۱۶)، (۲۴) و (۲۵) فاصله و امپدانس خطا برای دو خطای تک‌فاز در مکان های مختلف (خطای cross-country) به‌دست می‌آید. برای خطا در فازهای مختلف نیز فرمول‌هایی مشابه به دست می‌آید که در ضمیمه‌ی الف آمده است.

۵- مدل‌سازی سیستم و نتایج شبیه سازی

۵-۱- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، الگوریتم پیشنهادی برای حفاظت ناحیه‌ی اول رله‌ی دیستانس بر روی سیستم قدرت شکل (۳) مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم مورد نظر دارای ولتاژ پایه ۳۱۵kV می‌باشد و سایر پارامترهای آن در ضمیمه ب آمده است. اختلاف فاز بین منابع از ۱۵- تا ۱۵ درجه برای شرایط بی باری و بار سنگین تغییر می‌کند. شبیه-سازی‌ها در نرم افزار MATLAB / SIMULINK صورت گرفته و از تبدیل فوریه تمام سیکل با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در هر سیکل (برای سیستم ۵۰ هرتز) به عنوان فیلتر الگوریتم استفاده می‌شود. معادلات (۱۶) و (۲۵) نیز برای تخمین امپدانس خطاها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش بر اساس سناریو ها مختلف نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار می گیرد که دقت روش در شرایط مختلف مورد آزمایش و تحلیل قرار بگیرد.

۵-۲-۱- تاثیر تغییر مکان خطای cross-country در شرایط جبران‌سازی ثابت و فاصله بین دو خطا ثابت

در این سناریو خطای cross-country در خط جبران‌شده با خازن سری در شرایطی که جبران‌سازی به میزان ۳۰ درصد می‌باشد، رخ داده است. ویژگی این خطا به این صورت است که خطای تکفاز اول در فاز a مدار اول و خطای تکفاز دوم در فاز b مدار دوم رخ می دهد و فاصله دو خطا از هم با تغییر محل خطاها ثابت و ۰/۲ پریونیت فرض شده است. تاثیر تغییر مکان بر روی تخمین امپدانس خطا در جدول(۱) مشاهده می‌شود. در این حالت مقاومت خطا ۱۵ اهم می-باشد و دو منبع ۱۵ درجه اختلاف فاز دارند. منابع شبکه نیز با مقاومت ۵۰ اهمی زمین شده‌اند.

جدول ۱- تاثیر تغییر مکان خطا بر راکتانس خطا(خطا بر حسب درصد)

$\%D_{Ia}$	$\%D_{IIb}$	$\%X_a$	$\%X_{bb}$
۱۰	۳۰	-۰/۶۵	-۱/۴۴
۲۰	۴۰	-۲/۱۵	-۳/۲۶
۳۰	۵۰	-۱/۶۷	-۳/۵۹
۴۰	۶۰	۰/۴۹	-۲/۷۸
۵۰	۷۰	۳/۷۹	-۱/۷۶
۶۰	۸۰	۸/۴۶	-۲/۲۸

D_{Ia} و D_{IIb} به ترتیب فاصله‌ی محل خطاهای تک‌فاز در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم از باس M می‌باشند که در ستون اول و دوم برحسب درصدی از طول خط بیان شده‌اند. X_a و X_{bb} به

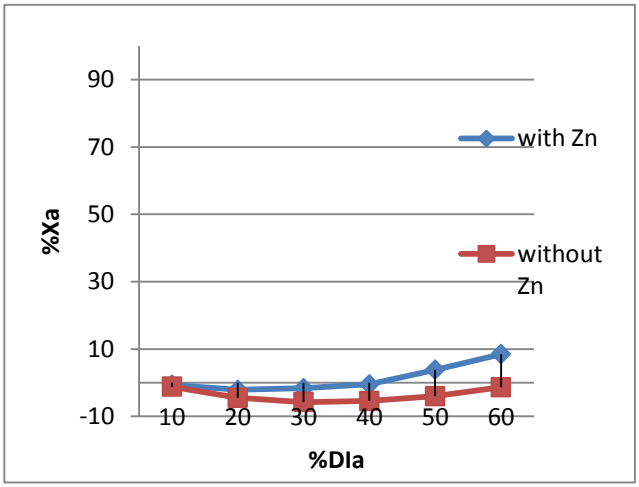
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

ترتیب خطای امپدانس تخمین‌زده شده در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم می‌باشند که بر حسب درصد در ستون سوم و چهارم بیان شده‌اند. برای بیان درصد خطای تخمین امپدانس از تعریف زیر استفاده می‌شود [۲] که نسبت تفاضل امپدانس واقعی از مقدار تخمین زده شده به مقدار امپدانس کل خط است.

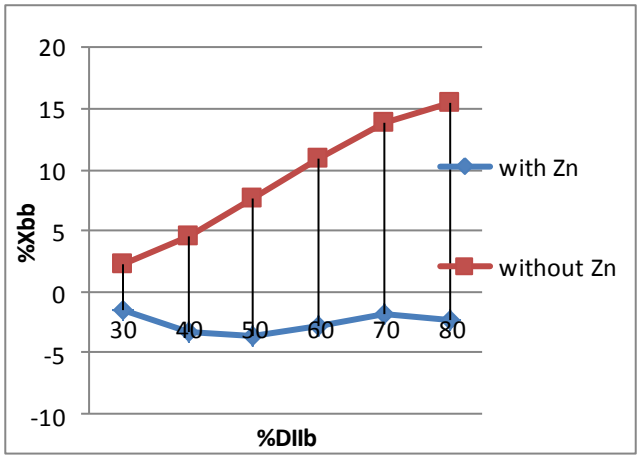
$$e\% = \frac{X_{est} - X_{act}}{X} \times 100 \qquad (۲۳)$$

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول (۱) که در اکثر موارد کم‌تر از ۵ درصد می‌باشد تخمین امپدانس خطا توسط روش پیشنهادی به مکان خطا (در شرایط جبران‌سازی ثابت و فاصله بین دو خطا ثابت) حساسیت کمی دارد. به طور مثال در سطر چهارم جدول (۱) خطای فاز a مدار اول در ۳۰ درصد خط (مکانی به فاصله‌ی ۳۰ درصد خط از باس M) و خطای فاز b مدار دوم در ۵۰ درصد خط قرار داده شده است. درصد خطای امپدانس تخمین زده شده در فاز a مدار اول به میزان ۱/۶۷- درصد و درصد خطای امپدانس تخمین زده شده در فاز b مدار دوم به میزان ۳/۵۹- درصد می‌باشد.

در الگوریتم‌های قدیمی از اثر امپدانس زمین صرف نظر شده است. در شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب تاثیر در نظر گرفتن اثر امپدانس زمین بر تخمین محل خطای فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم نشان داده شده است.



شکل (۱) تخمین محل خطای فاز a مدار اول با در نظر گرفتن امپدانس زمین و بدون در نظر گرفتن امپدانس زمین



شکل (۲) تخمین محل خطای فاز b مدار دوم با در نظر گرفتن امپدانس زمین و بدون در نظر گرفتن امپدانس زمین

۵-۲-۲- تاثیر میزان جبران‌سازی با شرایط فاصله بین دو خطا ثابت

در این سناریو برای بررسی تاثیر میزان جبران سازی بر تخمین امپدانس خطا، در خط دومداره که به وسیله‌ی خازن در دو انتها جبران شده است خطاهایی را به فاصله‌ی ۰/۲ پریونیت در طول خط قرار می‌دهیم و میزان جبران سازی را برابر ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد قرار می‌دهیم. نتایج به‌دست آمده از این شرایط در جدول (۲) مشاهده می‌شود. در این حالت مقاومت خطا ۱۵ اهم می‌باشد و دو منبع ۱۵ درجه اختلاف فاز دارند و با مقاومت ۵۰ اهمی زمین شده‌اند.

جدول ۲- تاثیر میزان جبران‌سازی بر راکتانس خطا(خطا بر حسب درصد)

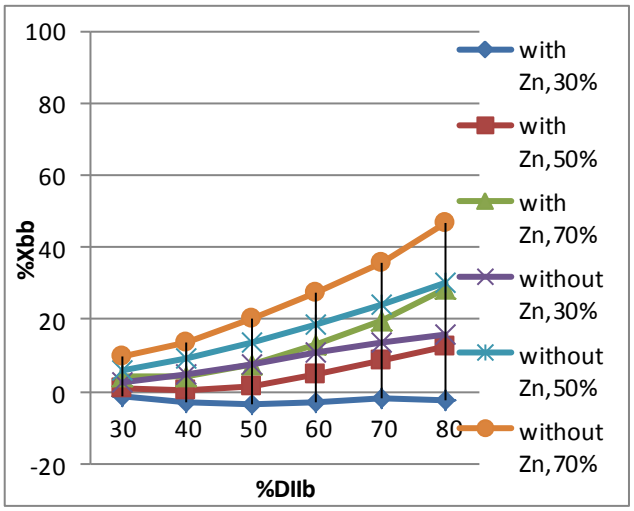
	$\%D_{Ia}$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
% k	$\%D_{IIb}$	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
۳۰	$\%X_{a}$	-۰/۶۵	-۲/۱۵	-۱/۶۷	۰/۴۹	۳/۷۹	۸/۴۶
	$\%X_{bb}$	-۱/۴۴	-۳/۲۶	-۳/۵۹	-۲/۷۸	-۱/۷۶	-۲/۲۸
۵۰	$\%X_{a}$	-۱/۳۲	-۴/۱۰	-۳/۰۱	۰/۵۹*	۵/۸۲	۱۳/۰۶
	$\%X_{bb}$	۱/۰۴	۰/۳۰	۱/۶۳	۴/۶۴*	۸/۶۶	۱۲/۶۶
۷۰	$\%X_{a}$	-۲/۲۵	-۶/۳۵	-۳/۳۵	۲/۲۱	۹/۴۷	۱۸/۹۶
	$\%X_{bb}$	۴/۱۳	۴/۳۸	۷/۵۷	۱۲/۸۳	۱۹/۷۵	۲۸/۶۶

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

در این جدول ستون اول نشان‌دهنده‌ی درصد جبران‌سازی (۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) می‌باشد. سطر اول نشان‌دهنده‌ی محل خطا در فاز a مدار اول و سطر دوم نشان‌دهنده‌ی محل خطا در فاز b مدار دوم می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) مشاهده می‌شود که امپدانس خطای تخمین زده شده توسط روش پیشنهادی در اکثر موارد دارای خطایی کم تر از ۵ درصد می‌باشد.

به طور مثال اعدادی که در جدول (۲) با علامت (*) مشخص شده‌اند درصد خطای امپدانس تخمین زده شده در شرایط جبران‌سازی ۵۰ درصد می‌باشد. خطای فاز a مدار اول در ۴۰ درصد خط و خطای فاز b مدار دوم در ۶۰ درصد خط قرار داده شده است. درصد خطای امپدانس تخمین زده شده در فاز a مدار اول به میزان ۰/۵۹ درصد و درصد خطای امپدانس تخمین زده شده در فاز b مدار دوم به میزان۴/۶۴ درصد می‌باشد. در شکل(۳) تاثیر در نظر گرفتن اثر امپدانس زمین بر تخمین محل خطای فاز b مدار دوم در شرایط جبران‌سازی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با در نظر نگرفتن اثر امپدانس زمین میزان خطای تخمین محل خطا افزایش می‌یابد.



شکل (۳) تخمین محل خطای فاز b مدار دوم با در نظر گرفتن امپدانس زمین و بدون در نظر گرفتن امپدانس زمین در شرایط جبران‌سازی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد

۵-۲-۳- تاثیر فاصله‌ی دو خطا در شرایط جبران‌سازی ثابت

در این سناریو برای مشاهده‌ی تاثیر فاصله دو خطا بر تخمین امپدانس خطا، در شبکه‌ای که دارای جبران‌سازی به میزان ۳۰ درصد می‌باشد، خطای تک‌فاز را در فاز a مدار اول و در فاصله‌ی ۰/۱ پریونیت از ابتدای خط قرار می‌دهیم و خطای فازb مدار دوم را از آن دور می‌کنیم و نتایج به‌دست آمده در جدول (۳) مشاهده می‌شود. دو منبع با هم ۱۵درجه اختلاف فاز دارند، با مقاومت ۵۰ اهمی زمین شده‌اند و مقاومت خطا برابر ۳۰ اهم است.

جدول ۳- تاثیر فاصله‌ی دو خطا بر راکتانس خطا (خطا بر حسب درصد)

$\%D_{Ia}$	$\%D_{IIb}$	$\%X_{a}$	$\%X_{bb}$
۱۰	۲۰	-۰/۱۹	-۳/۹۲
	۳۰	۰/۲۲	-۳/۵۳
	۴۰	۰/۵۸	-۲/۵۱
	۵۰	۰/۸۹	۲/۰۶
	۶۰	۰/۳۳	-۱/۱۱
	۷۰	۱/۱۵	۰/۴۷
	۸۰	۱/۶۱	۴/۵۱

به طور مثال در سطر چهارم جدول (۳) خطای فاز a در ۱۰ درصد خط و خطای فاز b در ۴۰ درصد خط قرار داده شده است. درصد خطای امپدانس تخمین‌زده شده با روش پیشنهادی در فاز a مدار اول به میزان ۰/۱۱- درصد و در فاز b مدار دوم به میزان ۰/۱۴- درصد می‌باشد. نتایج به‌دست آمده که در جدول (۳) مشاهده می‌شود در اکثر موارد کم‌تر از ۳ درصد می‌باشد و بیان‌گر حساسیت کم تخمین امپدانس خطا توسط روش پیشنهادی به فاصله‌ی دو خطا از هم می‌باشد.

۵-۲-۴- تاثیر تغییر مقاومت خطا در شرایط جبران‌سازی ثابت و فاصله بین دو خطا ثابت

برای مشاهده‌ی تاثیر مقاومت خطا بر تخمین امپدانس خطا، در شبکه‌ای با ۳۰ درصد جبران‌سازی، فاصله‌ی دو خطا را ۰/۲ پریونیت در نظر گرفته و تخمین امپدانس را به ازای مقاومت خطاهای مختلف به‌دست می‌آوریم که نتایج آن در جدول (۴) مشاهده می‌شود. ستون اول مقاومت خطا برحسب اهم می باشد و نمادهای به کاررفته در ستون دوم به صورت توضیح داده شده در بخش ۵-۲-۱ است. سطر اول نشان‌دهنده‌ی محل خطا در فاز a مدار اول و سطر دوم نشان‌دهنده‌ی محل خطا در فاز b مدار دوم می‌باشد.

جدول ۴- تاثیر تغییر مقاومت خطا بر راکتانس خطا(خطا بر حسب درصد)

	$\%D_{Ia}$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
R_f (Ω)	$\%D_{IIb}$	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
۵	$\%X_{a}$	-۰/۹۵	-۱/۶۹	-۰/۸۰	۱/۰۷	۳/۹۰	۷/۶۳
	$\%X_{bb}$	-۰/۷۶	-۱/۵۳	-۰/۰۸	۳/۳۱	۸/۰۷	۱۲/۳۵
۱۰	$\%X_{a}$	-۰/۸۳	۲/۱۷	۱/۲۱	۰/۷۸*	۳/۸۴	۸/۰۳
	$\%X_{bb}$	-۱/۰۴	-۲/۴۳	-۱/۸۳	۰/۱۶*	۲/۸۶	۴/۴۶
۲۰	$\%X_{a}$	-۰/۴۱	-۱/۸۵	-۲/۱۷	۰/۱۶	۳/۷۴	۸/۹۲

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

	$\%X_{bb}$	-۱/۹۹	-۴/۱۳	-۵/۳۹	-۵/۶۰	-۵/۹۷	-۸/۱۲
۳۰	$\%X_{a}$	۰/۲۲	-۱/۰۹	-۲/۰۶	-۰/۷۵	۳/۵۵	۹/۸۳
	$\%X_{bb}$	-۳/۵۳	-۶/۳۷	-۸/۸۸	-۱۱/۱	-۱۳/۵	-۱۸/۱

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول (۴) مشاهده می‌شود که امپدانس خطای تخمین زده شده برای مقاومت خطاهای مختلف توسط روش پیشنهادی در اکثر موارد دارای خطایی کم تر از ۶ درصد می‌باشد. به طور مثال اعدادی که با علامت (*) مشخص شده‌اند بیان‌گر درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس تخمین زده شده برای فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم است. خطای فاز a را در ۴۰ درصد خط و خطای فاز b را در ۶۰ درصد خط قرار گرفته است و خطای امپدانس تخمین‌زده شده برای این دوفاز به ترتیب برابر ۰/۷۸ و ۰/۱۶ درصد است.

۵-۲-۵- تاثیر اختلاف فاز منابع در شرایط جبران‌سازی ثابت و فاصله بین دو خطا ثابت

برای بررسی تاثیر اختلاف فاز منابع بر تخمین فاصله و امپدانس خطا، فاصله‌ی بین دو خطا را ۰/۲ پریونیت در نظر گرفته و در شرایطی که میزان جبران‌سازی شبکه ۳۰ درصد می‌باشد، تخمین امپدانس را به ازای اختلاف فاز ۱۵، ۵، ۵- و ۱۵- بین منابع انجام می‌دهیم که نتایج آن در جدول (۵) قابل مشاهده است. ستون اول جدول (۵) اختلاف فاز بین منابع سیستم مورد مطالعه برحسب درجه می‌باشد و نمادهای ستون دوم به صورت توضیح داده شده در بخش ۵-۲-۱ است.

جدول ۵- تاثیر تغییر اختلاف فاز منابع بر راکتانس خطا

	$\%D_{Ia}$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
δ	$\%D_{IIb}$	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
۱۵	$\%X_{a}$	-۰/۰۴	۰/۲۹	۱/۷۵	۴/۲۷	۷/۹۴	۱۲/۹۸
	$\%X_{bb}$	۳/۴۹	۴/۲۰	۵/۷۵	۶/۷۱	۸/۰۸	۹/۴۱
۵	$\%X_{a}$	-۰/۵۵	-۰/۵۵	۰/۷۲	۳/۰۷	۶/۵۴	۱۱/۳۵
	$\%X_{bb}$	۱/۸۴	۲/۵۷	۳/۶۳	۴/۲۱	۶/۴۳	۷/۵۳
-۵	$\%X_{a}$	-۰/۷۰	-۱/۳۸	-۰/۲۷	۱/۸۹	۵/۱۶	۹/۶۶
	$\%X_{bb}$	۰/۳۵	-۰/۰۰۷	۱/۷۲	۲/۲۹	۴/۲۸	۴/۵۱
-۱۵	$\%X_{a}$	-۰/۸۳	-۲/۱۷*	-۱/۲۱	۰/۷۸	۳/۸۴	۸/۰۳
	$\%X_{bb}$	-۱/۸۹	-۱/۹۳*	-۰/۹۳	۰/۸۲	۲/۷۳	۲/۹۷

برای مثال در شرایط اختلاف فاز ۱۵- درجه اگر خطای فاز a مدار اول در ۲۰ درصد خط و خطای فاز b مدار دوم در ۴۰ درصد خط قرار گیرد اعدادی که با علامت (*) مشخص شده‌اند نشان می‌دهند که میزان خطای امپدانس تخمین زده شده در فاز a مدار اول برابر ۲/۱۷- درصد و در فاز b مدار دوم ۱/۹۳- درصد می‌باشد. نتایج به‌دست آمده در جدول (۵) نشان می‌دهد که امپدانس خطای تخمین زده شده توسط روش پیشنهادی در اکثر موارد دارای خطایی کم تر از ۵ درصد می‌باشد.

۵-۲-۶- تاثیر جبران‌سازی خط به وسیله راکتور سه‌فاز بر الگوریتم پیشنهادی

در این سناریو خطای cross-country در خط جبران‌شده با خازن سری در شرایطی که جبران‌سازی به میزان ۳۰ درصد می‌باشد، رخ داده است. خطاهایی را به فاصله‌ی ۰/۲ پریونیت در طول خط قرار می‌دهیم و خط در دو انتها به‌وسیله راکتور سه‌فاز با ظرفیت ۵۰ مگاوار جبران شده است. در این حالت مقاومت خطا ۱۵ اهم می‌باشد و دو منبع ۱۵ درجه اختلاف فاز دارند. منابع شبکه نیز با مقاومت ۵۰ اهمی زمین شده‌اند.

جدول ۶- تاثیر راکتور سه‌فاز راکتانس خطا(خطا بر حسب درصد)

$\%D_{Ia}$	$\%D_{IIb}$	$\%X_{a}$	$\%X_{bb}$
۱۰	۳۰	-۰/۰۶۴	-۲/۱۷
۲۰	۴۰	-۱/۴۷	-۳/۹۲
۳۰	۵۰	-۱/۰۰	-۴/۱۱
۴۰	۶۰	۱/۲۲	-۳/۰۵
۵۰	۷۰	۴/۵۸	-۱/۶۸
۶۰	۸۰	۹/۳۲	-۱/۷۴

با مقایسه نتایج جدول(۶) و جدول (۱) می توان نتیجه گرفت که جبران‌سازی خط به وسیله راکتور سه‌فاز در دو انتهای خط با ظرفیت ۵۰ مگاوار و با اتصال ستاره زمین‌شده تاثیر چشم‌گیری بر الگوریتم پیشنهادی ندارد.

الگوریتم‌های قدیمی رله دیستانس برای خطای کراس‌کانتری، به این دلیل که امکان رخداد دو خطای تک‌فاز در مکان‌های مختلف را در نظر نگرفته‌اند، قادر به تشخیص و تخمین امپدانس خطا برای خطای دورتر نمی‌باشند. به‌طور مثال اگر خطای کراس‌کانتری به صورت خطاهای تک‌فاز در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم رخ دهد و فاصله‌ی خطاها از هم به میزان ۰/۳ پریونیت باشد، میزان خطا در تخمین امپدانس خطا برای فاز b، در مکان‌های مختلف در طول خط انتقال دومداره توسط الگوریتم ارائه شده در [۴] به صورت بیان شده در جدول(۷) می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

جدول ۷- درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس خطا برای فاز b مدار دوم توسط روش ارائه شده در [۴] و درحالت فاصله دو خطا ثابت

$\%D_{IIb}$	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
$\%X_{bb}$	-۳۶/۰۲*	-۳۹/۳۴	-۴۳/۱۱	-۴۹/۶۴	-۵۰/۵۹

برای مثال عددی که در جدول (۷) باعلامت (*) مشخص شده است، نشان می‌دهد که امپدانس خطای اندازه‌گیری شده برای فاز b مدار دوم، به ازای رخ دادن خطای cross-country در ۱۰ درصدی فاز a مدار اول و ۴۰ درصدی فاز b مدار دوم، دارای ۳۶/۰۲- درصد خطا می‌باشد.

حال اگر فاصله بین دو خطا را افزایش دهیم میزان خطا در تخمین امپدانس خطا برای فاز b بیشتر می‌شود. برای مثال اگر خطای فاز a مدار اول در ۱۰ درصدی خط انتقال رخ دهد و خطای فاز b مدار دوم در فواصل مختلفی از خطای فاز a مدار اول رخ دهد، درصد خطا در تخمین امپدانس خطا برای فاز b به صورت بیان شده در جدول(۸) است.

جدول۸- درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس خطا برای فاز b مدار دوم توسط روش ارائه شده در [۴] و در حالت فاصله دو خطا متغیر

$\%D_{IIb}$	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
$\%X_{bb}$	-۳۶/۰۲	-۵۵/۰۰	-۷۷/۱۹	-۸۵/۲۱*	-۹۷/۷۰

برای مثال عددی که در جدول(۸) باعلامت (*) مشخص شده است، نشان می‌دهد که امپدانس خطای اندازه‌گیری شده برای فاز b مدار دوم، به ازای رخ دادن خطای cross-country در ۱۰ درصدی فاز a مدار اول و ۷۰ درصدی فاز b مدار دوم، دارای ۸۵/۲۱- درصد، خطا می‌باشد.

اگر خطای cross-country به صورت خطاهای تک‌فاز در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم رخ دهد و فاصله‌ی خطاها ازهم به میزان ۰/۲ پریونیت باشد، میزان خطا در تخمین امپدانس خطا برای فاز b، در مکان‌های مختلف در طول خط انتقال دومداره توسط الگوریتم ارائه شده در [۱۲] به صورت بیان شده در جدول(۹) می‌باشد.

جدول ۹- درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس خطا برای فاز b مدار دوم توسط الگوریتم [۱۲]

$\%D_{IIb}$	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
$\%X_{bb}$	۹۱/۸۹	۴۹/۴۷	۴۹/۷۰	۵۷/۳۴	۶۹/۸۴	۸۸/۵۹

بنابراین مشاهده شد که الگوریتم‌های ارائه شده در گذشته قادر به تخمین امپدانس خطای دورتر و تشخیص محل خطا نیستند. الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق برای خطای cross-country ابتدا به تخمین محل خطای نزدیک تر می‌پردازد سپس با استفاده از فاصله‌ی خطا و مقاومت خطای به دست آمده، مقدار جریان انتهای خط و تاثیر آن در محل خطای دوم را که در فاصله‌ی دورتری است محاسبه می‌کند و محل خطای دوم و امپدانس خطا را تخمین می‌زند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای حفاظت ناحیه‌ی اول رله‌ی دیستانس در خطوط دومداره‌ی جبران شده با خازن سری تحت خطای cross-country به صورت دو خطای تک‌فاز در مکان‌های مختلف ارائه شد. این روش با استفاده از سیگنال‌های ابتدای خط قادر به تخمین سیگنال‌های انتهای خط می‌باشد و امپدانس خطا را فقط با داده های یک سمت خط بعد از یک سیکل تخمین می‌زند. نیاز به کانال مخابراتی بین پست‌های ابتدا و انتهای خط انتقال دومداره ندارد. در نتیجه دارای مشکلات ناشی از خطا در ارسال داده‌ها نمی‌باشد. روش ارائه شده در اکثر موارد دارای خطایی کم‌تر از ۱۰ درصد می باشد که می تواند با تنظیم مناسب ناحیه‌ی حفاظتی رله‌ی دیستانس خطای رخ داده را در ناحیه‌ی اول حفاظتی تشخیص دهد.

ضمایم

ضمیمه‌ی الف

در جدول (۱۰) ضرایب معادله‌ی (۱۰) به ازای خطا در فازهای دیگر خط دومداره مشاهده می‌شود. از این ضرایب با توجه به فرمول‌های بخش (۳) برای تخمین امپدانس خطای نزدیک‌تر استفاده می‌شود.

جدول ۱۰ – ضرایب معادله(۱۳) برای سایر خطاها

IB	$a_4 + jb_4$	$(Z_{Ib} - Z_m)[Z_{Ib} I_{Ib} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ic} + I_{IIa} + I_{IIb} + I_{IIc})]$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{Ib})[U_{MIb} - (R'_{CMIb} - jX'_{CMIb}) I_{Ib} - Z_n I_n] +$ $(Z_m - Z_{Ib} - R'_{CNIb} + jX'_{CNIb})$ $.[Z_{Ib} I_{Ib} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ic} + I_{IIa} + I_{IIb} + I_{IIc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{Ib}) - (R'_{CMIb} - jX'_{CMIb}) - (R'_{CNIb} - jX'_{CNIb})] I_{Ib}$ $-(Z_m - Z_{IIb} - jX_C) I_{IIb}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{MIb} - (R'_{CMIb} - jX'_{CMIb}) I_{Ib} - Z_n I_n]$ $.(Z_{Ib} - Z_m + R'_{CNIb} - jX'_{CNIb})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_{Ic} - Z_m)[Z_{Ic} I_{Ic} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{IIa} + I_{IIb} + I_{IIc})]$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

IC	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{Ic})[U_{MIc} - (R'_{CMIc} - jX'_{CMIc})I_{Ic} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{Ic} - R'_{CNIc} + jX'_{CNIc}) .[Z_{Ic} I_{Ic} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{IIa} + I_{IIb} + I_{IIc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{Ic}) - (R'_{CMIc} - jX'_{CMIc}) - (R'_{CNIc} - jX'_{CNIc})]I_{Ic} - (Z_m - Z_{IIc} - jX_C)I_{IIc}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{MIc} - (R'_{CMIc} - jX'_{CMIc})I_{Ic} - Z_n I_n] .(Z_{Ic} - Z_m + R'_{CNIc} - jX'_{CNIc})$
IIA	$a_4 + jb_4$	$(Z_{IIa} - Z_m)[Z_{IIa} I_{IIa} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{IIb} + I_{IIc})]$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{IIa})[U_{MIIa} - (R'_{CMIIa} - jX'_{CMIIa})I_{IIa} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{IIa} - R'_{CNIIa} + jX'_{CNIIa}) .[Z_{IIa} I_{IIa} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{IIb} + I_{IIc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{IIa}) - (R'_{CMIIa} - jX'_{CMIIa}) - (R'_{CNIIa} - jX'_{CNIIa})]I_{IIa} - (Z_m - Z_{Ia} - jX_C)I_{Ia}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{MIa} - (R'_{CMIIa} - jX'_{CMIIa})I_{IIa} - Z_n I_n] .(Z_{IIa} - Z_m + R'_{CNIIa} - jX'_{CNIIa})$
IIB	$a_4 + jb_4$	$(Z_{IIb} - Z_m)[Z_{IIb} I_{IIb} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{IIa} + I_{IIc})]$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{IIb})[U_{MIb} - (R'_{CMIIb} - jX'_{CMIIb})I_{IIb} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{IIb} - R'_{CNIIb} + jX'_{CNIIb}) .[Z_{IIb} I_{IIb} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{IIa} + I_{IIc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{IIb}) - (R'_{CMIIb} - jX'_{CMIIb}) - (R'_{CNIIb} - jX'_{CNIIb})]I_{IIb} - (Z_m - Z_{Ib} - jX_C)I_{Ib}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{MIb} - (R'_{CMIIb} - jX'_{CMIIb})I_{IIb} - Z_n I_n] .(Z_{IIb} - Z_m + R'_{CNIIb} - jX'_{CNIIb})$
IIC	$a_4 + jb_4$	$(Z_{IIc} - Z_m)[Z_{IIc} I_{IIc} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{IIa} + I_{IIb})]$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{IIc})[U_{MIc} - (R'_{CMIIc} - jX'_{CMIIc})I_{IIc} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{IIc} - R'_{CNIIc} + jX'_{CNIIc}) .[Z_{IIc} I_{IIc} + Z_m (I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{IIa} + I_{IIb})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{IIc}) - (R'_{CMIIc} - jX'_{CMIIc}) - (R'_{CNIIc} - jX'_{CNIIc})]I_{IIc} - (Z_m - Z_{Ic} - jX_C)I_{Ic}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{MIc} - (R'_{CMIIc} - jX'_{CMIIc})I_{IIc} - Z_n I_n] .(Z_{IIc} - Z_m + R'_{CNIIc} - jX'_{CNIIc})$

در جدول (۱۱) نیز فرمول به‌دست آوردن فاصله‌ی خطا برای خطاهای دورتر مشاهده می‌شود.

جدول ۱۱ – ضرایب معادله(۲۵) برای سایر خطاها

IA	$\dfrac{imag\left(\dfrac{U_{MIa} - (R'_{CMIa} - jX'_{CMIa})I_{Ia} - Z_n I_n}{I_{fa}}\right)}{imag(Z_{Ia})}$
IB	$\dfrac{imag\left(\dfrac{U_{MIb} - (R'_{CMIb} - jX'_{CMIb})I_{Ib} - Z_n I_n}{I_{fb}}\right)}{imag(Z_{Ib})}$
IC	$\dfrac{imag\left(\dfrac{U_{MIc} - (R'_{CMIc} - jX'_{CMIc})I_{Ic} - Z_n I_n}{I_{fc}}\right)}{imag(Z_{Ic})}$
IIA	$\dfrac{imag\left(\dfrac{U_{MIa} - (R'_{CMIIa} - jX'_{CMIIa})I_{IIa} - Z_n I_n}{I_{faa}}\right)}{imag(Z_{IIa})}$
IIC	$\dfrac{imag\left(\dfrac{U_{MIc} - (R'_{CMIIc} - jX'_{CMIIc})I_{IIc} - Z_n I_n}{I_{fcc}}\right)}{imag(Z_{IIc})}$

ضمیمه‌ی ب

پارامترهای خط دومداره۳۱۵-kV و به طول ۳۰۰-km

امپدانس خودی واحد طول فازها

Z_{Ia} =0.0902 + j0.5973 Ω/km

Z_{Ib} =0.0875 + j0.5978 Ω/km

Z_{Ic} =0.0862 + j0.5978 Ω/km

Z_{IIa} =0.0862 + j0.5978 Ω/km

Z_{IIb} =0.0875 + j0.5978 Ω/km

Z_{IIc} =0.0902 + j0.5973 Ω/km

امپدانس متقابل واحد طول بین فازها

Z_m = 0.0611+ j0.2659 Ω/km

منابع معادل شبکه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]

$$S_M = 315kv, 50Hz$$

$$Z_{SM} = j6\Omega$$

$$S_N = 315kv, 50Hz$$

$$Z_{SN} = j9\Omega$$

مراجع

[1] P. M. Anderson, Power System Protection. New York: McGraw-Hill, IEEE Press Power Engineering Series, 1999.

[2] Z. Y. Xu, W. Li, T. S. Bi, G. Xu and Q. X. Yang, "First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross-country nonearthed faults," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 4, pp. 2486–2494, October 2011.

[3] A. Santosh Kumar, V. Surendranath Chowdary and G. Kalidas Babu " Fault distance measurement of series compensated lines using ANN ", IOSR-JEEE, e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-333, Vol.7, pp. 105-112, Jul.-Aug 2013.

[4] T. S. Bi, W. Li, Z. Y. Xu and Q. X. Yang, "First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross country grounded faults," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 4, October 2012.

[۵] هاشمی دزکی، حامد، عسکریان ابیانه، حسین و مظلومی، کاظم، افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع به کمک بهینه‌سازی چند منظوره سیستم حفاظتی و کلیدزنی، مجله علمی و پژوهشی کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق ایران، سال اول، شماره اول، ۱۳۹۱.

[6] A. G. Phadke and L. Jihuang " A new computer based integrated distance relay for parallel transmission lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, February 1985.

[7] ABB Technical Report, Distribution Automation Handbook Section 8.6 MV Feeder Earth-fault Protection, ABB Oy, Distribution Automation, 2011.

[8] Alstom Technical Report, Network Protection & Automation Guide, Edition 2011.

[9] J. L. Blackburn and T. J. Domin, "Protective relaying principles and applications", Taylor & Francis Group, Third edition, 2006.

[10] V. H. Makwana and B. R. Bhalja, " A new adaptive distance relaying scheme for mutually coupled series-compensated parallel transmission lines during intercircuit faults," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 4, October 2011.

[11] Z. Qingchao, Z. Yao, S. Wennan, Y. Yixin and W. Zhigang "Fault location of two-parallel transmission line for non-earth fault using one-terminal data," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.

[12] X. Yang , M. S. Choi and S. J. Lee "Double-circuit transmission lines fault locatin algorithm for single line-to-ground fault," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 2, No. 4, pp. 434-440, 2007.

[۱۳] کاظمی، احد، بررسی سیستم‌های قدرت ۲، دانشگاه پیام نور، مدیریت چاپ و انتشارات، تهران، ۱۳۷۸.

[14] D. L. Goldsworthy " A linearized model for mov-protected series capacitors," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 4, November 1987.

[15] Ranjeet Kumar, Amrita Sinha and G.K. Choudhary "A new digital distance relaying algorithm for first-zone protection for series-compensated double-circuit transmission lines ", Third International Conference on Advances in Computing and Communications, pp.102-106, 29-31 Aug. 2013

[۱۶] پور محمد، عباس‌علی، اتصال زمین در شبکه‌های توزیع و پیشنهادات اصلاحی جهت بهبود سیستم حفاظتی، نهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق، دانشگاه زنجان، اردیبهشت ۱۳۸۳.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.8.8]