

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^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، کاظم مظلومی^۲، 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 خطاهای cross-country با در نظر گرفتن اثر امپدانس زمین، پیشنهاد شده است. خطاهای cross-country به صورت دو خطاهی 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 بر حسب جریان ابتدای خط به دست آمده است. در الگوریتم پیشنهاد شده، با استفاده از داده‌های یکی از دو انتهای خط، مکان‌های هر دو خطاهی تکفاز رخ داده در خط را با دقت مناسبی مشخص می‌کند. عملکرد این روش با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار MATLAB / SIMULINK در شرایطی که سیستم با امپدانس زمین شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: خطوط انتقال دو مداره، جبران سازی سری، خازن سری، حفاظت دیستانس، خطاهای 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

۱- مقدمه

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 خط اچشم‌پوشی شده است که مطالعه را شامل خط 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 خطابه به دست آمده است.

مالحظه شد که در مطالعات گذشته، در برخی مقالات مکان‌بایی خطای جبران‌سازی سری منظور شده است؛ و اگر جبران سازی منظور شده است، نوع خطای در این مقالات cross-country نبوده است و خطای دوفاز مطالعه شده که تعیین محل خطای در آن بسیار ساده تر از خطای cross-country می‌باشد. 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 به طور 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 مطالعات گذشته به صورت خطای دوفاز مدل شده است که در آن فاصله‌ی هر دو خطابه از ابتدای خط یکسان هستند، در حالی که 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. به دست 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 رابطه‌ی را برای به دست آوردن جریان انتهای آن خط ارائه می‌دهد. با استفاده از جریان انتهای خط به دست آمده و تاثیر آن بر مکان خطای دیگر،

خطوط انتقال جبران شده با خازن سری به دلایل فراوانی چون افزایش قابلیت اطمینان، افزایش طرفیت خط، کاهش تلفات و بهبود پایداری گذرا و ماندگار در سیستم‌های قدرت مدرن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. خازن سری^{*} (SC) و تجهیزات حفاظتی آن[†] (MOV) علی‌رغم 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 گستردگی در سیستم‌های قدرت مدرن استفاده شده‌اند [۲ و ۳] و حفاظت دیستانس عموماً به عنوان یک حفاظت اصلی در خطوط موازی استفاده می‌شود [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 اشتباہ 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 می‌شود [۷ و ۸]. 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 کراس کانتری 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 می‌شود. در نتیجه نحوه زمین کردن شبکه اثیر قابل توجهی در حفاظت زمین است [۷].

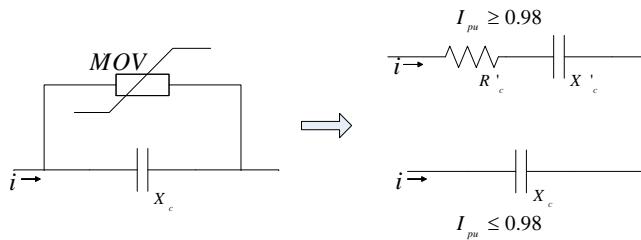
به دلیل این که خطاهایی که در شبکه رخ می‌دهد، اغلب از نوع تکفاز هستند، بنابراین زمین کردن سیستم قدرت بسیار حائز اهمیت است. در نتیجه نحوه زمین کردن شبکه اثیر قابل توجهی در حفاظت سیستم‌های قدرت دارد [۹].

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 خطای دوفاز فرض شده است و جبران‌سازی نیز در خطوط منظور نشده است. در [۴]، خط دومداره مورد بررسی دارای شرایط

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

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 انتهای 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 حافظت شده به وسیله MOV نتایج عالی را برای محاسباتی که قبلاً غیرممکن بوده، فراهم کرده است [۱۴].



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

در شکل (۱) نشان داده شده که برای $I_{pu} \geq 0.98$ ترکیب موازی خازن و حافظت آن به وسیله امپدانس خطی (مقاومت و راکتانس سری) تقریب زده می شود. مقادیر این تقریبها به وسیله فرمول های زیر به دست می آید [۱۵]:

$$R'_c = X_C \left(0.0745 + 0.49e^{-0.243i pu} - 35e^{-5i pu} - 0.6e^{-1.4i pu} \right) \quad (2)$$

$$X'_c = X_C \left(0.1010 - 0.005749i pu + 2.088e^{-0.8566i pu} \right) \quad (3)$$

معادلات (۲) و (۳) برای مقادیر $I_{pu} \geq 0.98$ قابل اعمال هستند. Ipu مقدار پریونیت جریان خطای عبوری از ترکیب موازی خازن و حافظت آن است و مقدار پایه این جریان، سطح جریان حفاظتی خازن می باشد.

در حین خطای زمین مقدار جریان خطای عبوری از بانک خازن خیلی بالاست ($I_{pu} \geq 0.98$), بنابراین حافظت خازن شروع به هدایت بخشی از جریان خطای می کند. در نتیجه ترکیب موازی خازن و حافظت آن شبیه یک مقاومت و راکتانس سری معادل عمل می کند. در حالیکه در شرایط نرمال، مقدار پریونیت جریان عبوری از بانک خازنی کمتر از 0.98 است ($I_{pu} \leq 0.98$) و بنابراین حافظت خازن جریانی را هدایت نمی کند. در نتیجه معادلات Goldsworthy قابل اعمال نیستند و مقدار بانک خازن تغییری نمی کند و برابر X_C باقی میماند.

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

سایر بخش‌های مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش ۲ مدلی برای خازن و حافظت آن ارائه شده است. سیستم زمین و الگوریتم تخمین امپدانس خطای 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 حافظت آن (SC/MOV)

۱-۲ - جبران سازی سری

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

- با تزریق قدرت راکتیو توسط جبران کننده‌های 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 گذراي سیستم
- تقسیم بهتر بار بر روی خطوط موازی
- کاهش تلفات سیستم انتقال
- کاهش افت ولتاژ در خلال اغتشاشات شدید
- تنظیم بهتر بارگیری خطوط

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

$$k = \frac{X_c}{X} \quad (1)$$

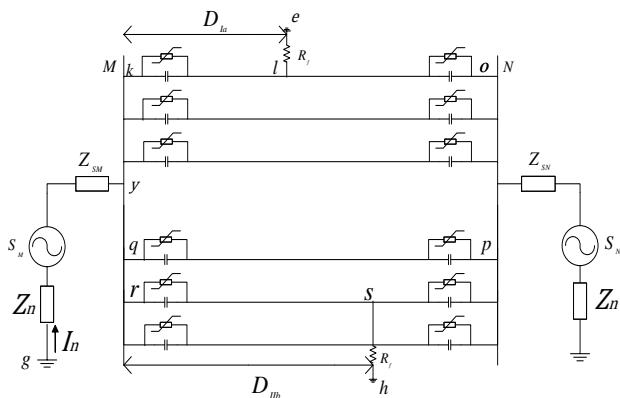
در رابطه‌ی (۱)، X_c امپدانس خازن سری و X امپدانس کل خط است.

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. حافظت خازن سری طوری طراحی می‌شود که در زمانی که ولتاژ از سطح طراحی شده افزایش می‌یابد، خازن صدمه نمی‌بیند.

۳- سیستم زمین

شده اند. شبکه با امپدانس Z_n زمین شده است و جریان عبوری از آن I_n با اعمال KCL در نقطه y برابر است با:

$$I_n = I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_b} + I_{ll_c} \quad (6)$$



شکل (۳): خط دومداره با جبران سازی سری تحت خطای cross-country در شبکه‌ی با امپدانس زمین شده

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

D : فاصله محل خطا از ابتدای خط

R_f : مقاومت خط

I و U : به ترتیب جریان خطوط و ولتاژ باس‌ها

I' : جریان انتهای خطوط در شرایط خطا

Z_m : امپدانس متقابل بین فازهای خط دومداره

Z_{ll} و Z_n : به ترتیب امپدانس خودی خط مدار اول و مدار دوم

I و I : 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

X_c و R_c : به ترتیب بیانگر مقاومت و امپدانس خازنی تقریب‌زده شده‌ی جبران‌ساز سری با (۲) و (۳)

X_c : امپدانس خازنی جبران‌ساز سری

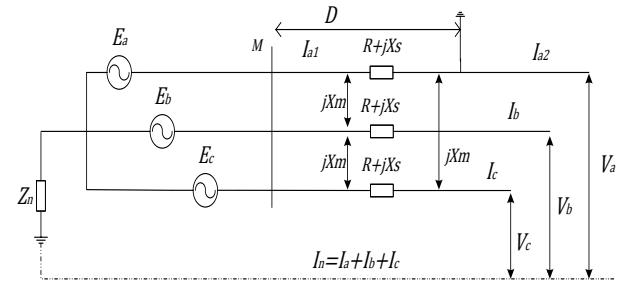
با اعمال قانون ولتاژ کیرشهف (KVL) در مسیر gykle داریم:

$$U_{Mla} = D_{la} [Z_{la} I_{la} + Z_m (I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_b} + I_{ll_c})] + (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) I_{la} + R_f I_{laf} + Z_n I_n \quad (7)$$

اهمیت نقطه زمین وقتی ظاهر می‌شود که در شبکه‌های برق یک اتصال فاز به زمین بروز می‌نماید. در این حالت جریان فاز معیوب از طریق زمین به نقطه خنثی برگشت داده می‌شود. درصورتی که نقطه 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 ایزو لاسیون شبکه خواهد بود [۱۶].

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

$$E_a = D [(R + jX_s) I_{a1} + jX_m (I_b + I_c)] + Z_n I_n \quad (4)$$



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 بدست می‌آید:

$$D = \frac{E_a - Z_n I_n}{(R + jX_s) I_{a1} + jX_m (I_b + I_c)} \quad (5)$$

همان‌طور 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

معادله‌ی (۱۲) را می‌توان به فرم زیر نوشت.

$$(a_4 + jb_4)D^2 + (a_3 + jb_3)D + (a_2 + jb_2)R_f + (a_1 + jb_1) = 0 \quad (13)$$

که در آن

$$a_4 + jb_4 = (Z_{la} - Z_m)[Z_{la}I_{la} + Z_m(I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_b} + I_{ll_c})]$$

$$\begin{aligned} a_3 + jb_3 &= (Z_m - Z_{la})[U_{Mla} - (R'_{CMla} - jX'_{CMla})I_{la} - Z_nI_n] + \\ &\quad (Z_m - Z_{la} - R'_{CNla} + jX'_{CNla}) \\ &\quad \cdot [Z_{la}I_{la} + Z_m(I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_b} + I_{ll_c})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 + jb_2 &= [(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})]I_{la} \\ &\quad - (Z_m - Z_{ll_a} - jX_c)I_{ll_a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_1 + jb_1 &= [U_{Mla} - (R'_{CMla} - jX'_{CMla})I_{la} - Z_nI_n] \\ &\quad \cdot (Z_{la} - Z_m + R'_{CNla} - jX'_{CNla}) \end{aligned}$$

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

$$D_{la} = \frac{b_1a_2 - a_1b_2}{b_4a_2 - a_4b_2} \quad (14)$$

$$R_f = \frac{(1 - D_{la})(a_4D_{la} - a_1)}{a_2} \quad (15)$$

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

$$X_a = D_{la} * X_{la} \quad (16)$$

با اعمال KVL در مسیر gyrsh داریم:

$$\begin{aligned} U_{MIIb} &= D_{lb}[Z_{lb}I_{lb} + Z_m(D_{la}I_{la} + (1 - D_{la})I_{la}^r + I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_c})] \\ &\quad + (R'_{CMIIb} - jX'_{CMIIb})I_{lb} + R_f I_{ll_b} + Z_n I_n \end{aligned} \quad (17)$$

$$U_{MIIb} = U_{lb} \quad (18)$$

با توجه به (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آید:

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

$$I_{laf} = I_{la} - I_{la}^r \quad (18)$$

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

$$\begin{aligned} &[D_{la}(Z_{la} - Z_m) + (R'_{CMla} - jX'_{CMla})]I_{la} + \\ &\quad [(1 - D_{la})(Z_{la} - Z_m) + (R'_{CNla} - jX'_{CNla})]I_{la}^r \\ &\quad + (Z_m - Z_{ll_a} - jX_c)I_{ll_a} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

بنابراین:

$$I_{la}^r = \frac{[D_{la}(Z_{la} - Z_m) + (R'_{CMla} - jX'_{CMla})]I_{la} + (Z_m - Z_{ll_a} - jX_c)I_{ll_a}}{(1 - D_{la})(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})} \quad (10)$$

با جایگذاری (۱۰) در (۸) داریم:

$$I_{laf} = \left[\frac{[D_{la}(Z_{la} - Z_m) + (R'_{CMla} - jX'_{CMla})]I_{la} + (Z_m - Z_{ll_a} - jX_c)I_{ll_a}}{(1 - D_{la})(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})} \right] \quad (11)$$

در نتیجه:

$$I_{laf} = \frac{[(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})]I_{la} - (Z_m - Z_{ll_a} - jX_c)I_{ll_a}}{(1 - D_{la})(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})} \quad (11)$$

با جایگذاری (۱۱) در (۷) معادله زیر به دست می‌آید که مستقل از جریان عبوری از مقاومت محل خط است.

$$\begin{aligned} U_{Mla} &= D_{la}[Z_{la}I_{la} + Z_m(I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_b} + I_{ll_c})] + \\ &\quad (R'_{CMla} - jX'_{CMla})I_{la} + Z_n I_n \\ R_f &= \left[\frac{[(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})]I_{la} - (Z_m - Z_{ll_a} - jX_c)I_{ll_a}}{(1 - D_{la})(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

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 خطاهای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش بر اساس سناریو‌ها مختلف نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد که دقیق روش در شرایط مختلف مورد آزمایش و تحلیل قرار بگیرد.

۵-۱- تأثیر تغییر مکان خطای cross-country در شرایط جبران‌سازی ثابت و فاصله بین دو خط ثابت

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

جدول ۱- تأثیر تغییر مکان خطای بر راکتانس خطای (خطای بر حسب درصد)

% D_{la}	% D_{lb}	% 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_{la} و D_{lb} به ترتیب فاصله‌ی محل خطاهای تکفاز در فاز مدار اول و فاز b مدار دوم از بسیار M می‌باشند که در ستون اول و دوم بر حسب درصدی از طول خط بیان شده‌اند. X_a و X_{bb} به

$$U_{Mlb} - (R'_{CMlb} - jX'_{CMlb}) I_{lb} = \quad (19)$$

$$D_{lb} Z_{lb} \left[I_{lb} + \frac{Z_m}{Z_{lb}} (D_{la} I_{la} + (1-D_{la}) I_{la}^r + I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_c}) \right] + R_j I_{ll_b}$$

$$I_{ll_b} = I_{lb} + \frac{Z_m}{Z_{lb}} (D_{la} I_{la} + (1-D_{la}) I_{la}^r + I_{lb} + I_{lc} + I_{ll_a} + I_{ll_c}) \quad (20)$$

در معادله (۲۰) تمامی پارامترها جزو مشخص هستند. پارامتر ذکر شده از یک تقسیم جریان و با استفاده از (۱۴) و (۱۵) بدست می‌آید.

$$I_{la}^r = I_{la} \left(\frac{R_f}{R_f + (1-D_{la}) Z_{la} + R'_{CNla} - jX'_{CNla}} \right) \quad (21)$$

در نتیجه

$$\left(\frac{U_{Mlb} - (R'_{CMlb} - jX'_{CMlb}) I_{lb} - Z_n I_n}{I_{ll_b}} \right) - D_{lb} Z_{lb} - R_f \frac{I_{ll_b}}{I_{ll_b}} = 0 \quad (22)$$

با فرض اینکه I_{ll_b} در یک فاز هستند [۸] حاصل ضرب R_f در نسبت این دو جریان عددی حقیقی است پس

$$imag \left(\frac{U_{Mlb} - (R'_{CMlb} - jX'_{CMlb}) I_{lb} - Z_n I_n}{I_{ll_b}} \right) = imag(D_{lb} Z_{lb}) \quad (23)$$

در نتیجه

$$D_{lb} = \frac{imag \left(\frac{U_{Mlb} - (R'_{CMlb} - jX'_{CMlb}) I_{lb} - Z_n I_n}{I_{ll_b}} \right)}{imag(Z_{lb})} \quad (24)$$

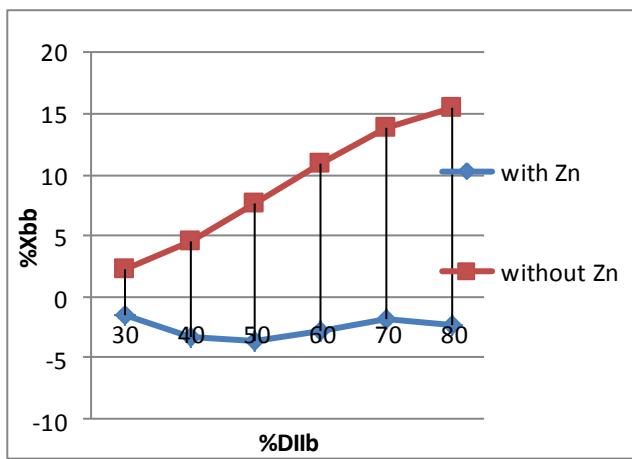
$$X_{bb} = D_{lb} * X_{lb} \quad (25)$$

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

۵- مدل‌سازی سیستم و نتایج شبیه‌سازی

۱-۵- 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 ضمیمه‌ی ب آمده است. اختلاف فاز بین منابع از ۱۵ تا ۱۵ درجه برای شرایط بی‌باری و بار سنگین تغییر می‌کند. شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار MATLAB / SIMULINK صورت گرفته و از



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

۲-۲-۵- تاثیر میزان جبران سازی با شرایط فاصله بین دو خط ثابت

در این سنارویو برای بررسی تاثیر میزان جبران سازی بر تخمین امپدانس خط، در خط دومداره که به وسیله‌ی خازن در دو انتهای جبران شده است خطاهای را به فاصله‌ی $\frac{1}{2}$ پریونیت در طول خط قرار می‌دهیم و میزان جبران سازی را برابر ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد قرار می‌دهیم. نتایج به دست آمده از این شرایط در جدول (۲) مشاهده می‌شود. در این حالت مقاومت خط ۱۵ اهم می‌باشد و دو منبع ۱۵ درجه اختلاف فاز دارند و با مقاومت ۵۰ اهمی زمین شده‌اند.

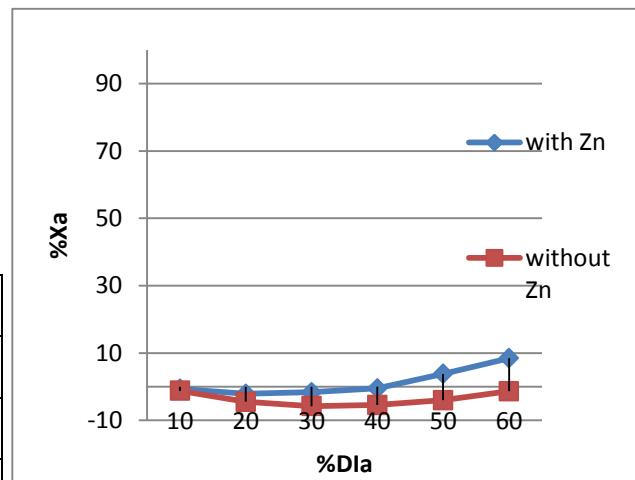
جدول ۲- تاثیر میزان جبران سازی بر راکتانس خط (خطا بر حسب درصد)

		۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
% k	% D _{bb}	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	-۳/۷۸	-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	۴/۲۸	۷/۵۷	۱۲/۸۳	۱۹/۷۵	۲۸/۶۶

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 تعريف زیر استفاده می‌شود [۲] که نسبت تفاضل امپدانس واقعی از مقدار تخمین‌زده شده به مقدار امپدانس کل خط است.

$$e \% = \frac{X_{est} - X_{act}}{X} \times 100 \quad (23)$$

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۱) که در اکثر موارد کمتر از ۵ درصد می‌باشد تخمین امپدانس خط اوسط روش پیشنهادی به مکان خط (در شرایط جبران‌سازی ثابت و فاصله بین دو خط 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 بس M) و خطای فاز b مدار دوم در ۵۰ درصد خط قرار داده شده است. درصد خطای امپدانس تخمین‌زده شده در فاز a مدار اول به میزان ۱/۶۷- درصد و درصد خطای امپدانس تخمین‌زده 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

اختلاف فاز دارند، با مقاومت ۵۰ اهمی زمین شده‌اند و مقاومت خطا برابر ۳۰ اهم است.

جدول ۳- تاثیر فاصله‌ی دو خطای بر راکتانس خطای (خطای 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	۰/۱۸۹	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 تخمين زده شده با روش پيشنهادي در فاز a مدار اول به ميزان ۰/۱۴ درصد مي باشد. درصد خط و خطای فاز b مدار دوم در ۶۰ درصد خط قرار داده شده است. درصد خطای امپدانس تخمين زده شده در فاز a مدار اول به ميزان ۰/۵۹ درصد و درصد خطای امپدانس تخمين زده شده در فاز b مدار دوم به ميزان ۴/۶۴ درصد مي باشد. در شكل (۳) تاثير در نظر گرفتن اثر امپدانس زمین بر تخمين محل خطای فاز b مدار دوم در شرياط جبران‌سازی ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درصد نشان داده شده است. مشاهده مي شود با در نظر نگرفتن اثر امپدانس زمین تخمين محل خطای افرايش مي يابد.

۴-۲-۵- تاثير تغيير مقاومت خطای فاز b در شرياط جبران‌سازی ثابت و فاصله بین دو خطای ثابت

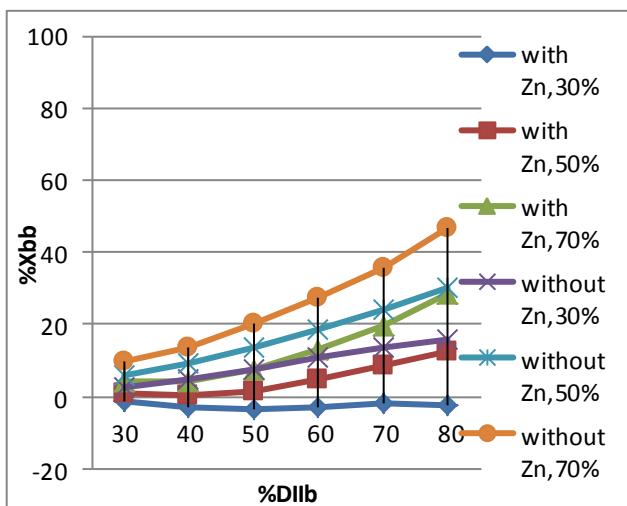
برای مشاهده‌ی تاثير مقاومت خطای فاز b بر تخمين امپدانس خطای فاز a با ۳۰ درصد جبران‌سازی، فاصله‌ی دو خطای ۰/۲ پريونيت در نظر گرفته و تخمين امپدانس را به ازاي مقاومت خطای فاز a مختلف به دست می آوريم که نتایج آن در جدول (۴) مشاهده مي شود. ستون اول مقاومت خطای فاز a بر حسب اهم مي باشد و نمادهای به کار رفته در ستون دوم به صورت توضیح داده شده در بخش ۱-۵ است. سطر اول نشان‌دهنده‌ی محل خطای فاز a در فاز a مدار اول و سطر دوم نشان‌دهنده‌ی محل خطای فاز b در فاز b مدار دوم مي باشد.

جدول ۴- تاثير تغيير مقاومت خطای فاز b بر راکتانس خطای (خطای بر حسب درصد)

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

در اين جدول ستون اول نشان‌دهنده‌ی درصد جبران‌سازی (۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درصد) مي باشد. سطر اول نشان‌دهنده‌ی محل خطای فاز a مدار اول و سطر دوم نشان‌دهنده‌ی محل خطای فاز b مدار دوم مي باشد. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۴) مشاهده مي شود که امپدانس خطای تخمين زده شده توسيط روش پيشنهادي در اكثرا موارد دارای خطای کم تراز ۵ درصد مي باشد.

به طور مثال اعدادي که در جدول (۴) با علامت (*) مشخص شده‌اند درصد خطای امپدانس تخمين زده شده در شرياط جبران‌سازی ۵ درصد مي باشد. 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 تخمين زده شده در فاز a مدار اول به ميزان ۰/۵۹ درصد و درصد خطای امپدانس تخمين زده شده در فاز b مدار دوم به ميزان ۴/۶۴ درصد مي باشد. در شكل (۳) تاثير در نظر گرفتن اثر امپدانس زمین بر تخمين محل خطای فاز b مدار دوم در شرياط جبران‌سازی ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درصد نشان داده شده است. مشاهده مي شود با در نظر نگرفتن اثر امپدانس زمین تخمين محل خطای افرايش مي يابد.



شكل (۳) تخمين محل خطای فاز b مدار دوم با در نظر گرفتن امپدانس زمین و بدون در نظر گرفتن امپدانس زمین در شرياط جبران‌سازی ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ درصد

۳-۲-۵- تاثير فاصله‌ی دو خطای فاز a در شرياط جبران‌سازی ثابت

در اين سناريو برای مشاهده‌ی تاثير فاصله‌ی دو خطای فاز a بر تخمين امپدانس خطای فاز b در شبکه‌ای که دارای جبران‌سازی به ميزان ۳۰ درصد مي باشد، خطای تک‌فاز را در فاز a مدار اول و در فاصله‌ی ۱/۰ پريونيت از ابتدائي خط قرار مي دهيم و خطای فاز b مدار دوم را از آن دور مي كنيم و نتایج به دست آمده در جدول (۴) مشاهده مي شود. دو منع با هم ۱۵ درجه

در جدول (۵) نشان می‌دهد که امپدانس خطای تخمین زده شده توسط روش پیشنهادی در اکثر موارد دارای خطای کم تر از ۵ درصد می‌باشد.

	$\% X_{aa}$	-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

۶-۲-۵- 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، رخداده است. خطاهایی را به فاصله‌ی $0/2$ پریونیت در طول خط قرار می‌دهیم و خط در دو انتهای به وسیله راکتور سه‌فاز با ظرفیت ۵۰ مگاواط 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.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۴) مشاهده می‌شود که امپدانس خطای تخمین زده شده برای مقاومت خطاهای مختلف توسط روش پیشنهادی در اکثر موارد دارای خطای کم تر از ۶ درصد می‌باشد. به طور مثال اعدادی که با علامت (*) مشخص شده‌اند بیان-گر درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس تخمین زده 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 تخمین زده شده برای این دو فاز به ترتیب برابر $0/78$ و $0/16$ درصد است.

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

برای بررسی تاثیر اختلاف فاز منابع بر تخمین فاصله و امپدانس خط، فاصله‌ی بین دو خط را $0/2$ پریونیت در نظر گرفته و در شرایطی که میزان جبران‌سازی شبکه ۳۰ درصد می‌باشد، تخمین امپدانس را به ازای اختلاف فاز $15, 5, -5$ و -15 بین منابع انجام می‌دهیم که نتایج آن در جدول (۵) قابل مشاهده است. ستون اول جدول (۵) اختلاف فاز بین منابع سیستم مورد مطالعه بر حسب درجه می‌باشد و نمادهای ستون دوم به صورت توضیح داده شده در بخش ۱-۲-۵ است.

جدول ۵- تاثیر تغییر اختلاف فاز منابع بر راکتانس خط

$\% D_{aa}$	$\% D_{bb}$	$\% X_a$	$\% X_{bb}$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
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						

δ	$\% D_{aa}$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
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 ^۰	-۱/۲۱	۰/۷۸	۳/۸۴	۸/۰۳
	$\% X_{bb}$	-۱/۸۹	-۱/۹۳ ^۰	-۰/۹۳	۰/۸۲	۲/۷۳	۲/۹۷

برای مثال در شرایط اختلاف فاز 15 - درجه اگر خطای فاز a مدار اول در 20 درصد خط و خطای فاز b مدار دوم در 40 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 $2/17$ - درصد و در فاز b مدار دوم $-1/93$ - درصد می‌باشد. نتایج به دست آمده

پیشنهادی در این تحقیق برای خطای cross-country ابتدا به تخمین محل خطای نزدیک تر می‌پردازد سپس با استفاده از فاصله‌ی خط 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 خط 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 تکفارز در مکان‌های مختلف ارائه شد. این روش با استفاده از سیگنال‌های ابتدای خط قادر به تخمین سیگنال‌های انتهای خط می‌باشد و امپدانس خط را فقط با داده‌های 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 خط در ارسال داده‌ها نمی‌باشد. روش ارائه شده در اکثر موارد دارای خطایی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد که می‌تواند 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 خط 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 معادله‌ی (۱۰) برای سایر خطاهای

	$a_4 + jb_4$	$(Z_{B_n} - Z_m)([Z_B I_B + Z_m (I_{B_n} + I_{C_n} + I_{H_n} + I_{B_n} + I_{H_n})])$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_B)([U_{MB} - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})I_B - Z_n I_n] + (Z_m - Z_B - R'_{CNB} + jX'_{CNB}) \cdot [Z_B I_B + Z_m (I_{B_n} + I_{C_n} + I_{H_n} + I_{B_n} + I_{H_n})])$
IB	$a_2 + jb_2$	$[(Z_n - Z_B) - (R'_{CMB} - jX'_{CMB}) - (R'_{CNB} - jX'_{CNB})]I_B - (Z_n - Z_B - jX_c)I_B$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{MB} - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})I_B - Z_n I_n] \cdot (Z_B - Z_m + R'_{CNB} - jX'_{CNB})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_{B_n} - Z_m)([Z_B I_{C_n} + Z_m (I_{B_n} + I_{B_n} + I_{H_n} + I_{B_n} + I_{H_n})])$

جدول ۷- درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس خط برای فاز b مدار

دوم توسط روش ارائه شده در [۴] و در حالت فاصله‌ی دو خط ثابت

% D_{B_n}	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
% X_{B_n}	-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 رخدادن خطای cross-country در ۱۰ درصدی فاز a مدار اول و ۴۰ درصدی فاز b مدار دوم، دارای ۲-۳۶/۰۲ درصد خطای می‌باشد.

حال اگر فاصله بین دو خط را افزایش دهیم میزان خطای در تخمین امپدانس خطای 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 خطای در تخمین امپدانس خطای فاز b به صورت بیان شده در جدول (۸) است.

جدول ۸- درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس خط برای فاز b مدار دوم

توضیع روش ارائه شده در [۴] و در حالت فاصله‌ی دو خط متغیر

% D_{B_n}	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
% X_{B_n}	-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 رخدادن خطای cross-country در ۱۰ درصدی فاز a مدار اول و ۷۰ درصدی فاز b مدار دوم، دارای ۸۵/۲۱-درصد، خطای می‌باشد.

اگر خطای cross-country به صورت خطاهای تکفارز در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم رخ دهد و فاصله‌ی خطاهای از هم به میزان ۰/۰ پریونیت باشد، میزان خطای در تخمین امپدانس خطای 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 خط برای فاز b مدار دوم

توضیع الگوریتم [۱۲]

% D_{B_n}	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
% X_{B_n}	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 خطای نیستند. الگوریتم

در جدول (۱۱) نیز فرمول به دست آوردن فاصله‌ی خطاب برای خطاهای دورتر مشاهده می‌شود.

جدول ۱۱ - ضرایب معادله (۲۵) برای سایر خطاهای

IA	$\frac{imag \left(\frac{U_{M_{la}} - (R'_{CM_{la}} - jX'_{CM_{la}}) I_{la} - Z_n I_n}{I_{fa}} \right)}{imag(Z_{la})}$
IB	$\frac{imag \left(\frac{U_{M_{lb}} - (R'_{CM_{lb}} - jX'_{CM_{lb}}) I_{lb} - Z_n I_n}{I_{fb}} \right)}{imag(Z_{lb})}$
IC	$\frac{imag \left(\frac{U_{M_{lc}} - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) I_{lc} - Z_n I_n}{I_{fc}} \right)}{imag(Z_{lc})}$
IIA	$\frac{imag \left(\frac{U_{M_{la}} - (R'_{CM_{la}} - jX'_{CM_{la}}) I_{la} - Z_n I_n}{I_{fa}} \right)}{imag(Z_{la})}$
IIC	$\frac{imag \left(\frac{U_{M_{lc}} - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) I_{lc} - Z_n I_n}{I_{fc}} \right)}{imag(Z_{lc})}$

ضمیمه‌ی ب

پارامترهای خط دومداره ۳۱۵-kV و به طول ۳۰۰-km

امپدانس خودی واحد طول فازها

$$Z_{la} = 0.0902 + j0.5973 \Omega/km$$

$$Z_{lb} = 0.0875 + j0.5978 \Omega/km$$

$$Z_{lc} = 0.0862 + j0.5978 \Omega/km$$

$$Z_{lla} = 0.0862 + j0.5978 \Omega/km$$

$$Z_{llb} = 0.0875 + j0.5978 \Omega/km$$

$$Z_{llc} = 0.0902 + j0.5973 \Omega/km$$

امپدانس متقابل واحد طول بین فازها

$$Z_m = 0.0611 + j0.2659 \Omega/km$$

منابع معادل شبکه

IC	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{lc}) [U_{M_{lc}} - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) I_{lc} - Z_n I_n] +$ $(Z_m - Z_{lc} - R'_{CN_{lc}} + jX'_{CN_{lc}})$ $[Z_{llc} I_{lc} + Z_m (I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{llc} + I_{bc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{lc}) - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) - (R'_{CN_{lc}} - jX'_{CN_{lc}})] I_{lc}$ $-(Z_m - Z_{lc} - jX_c) I_{lc}$
IIA	$a_1 + jb_1$	$[U_{M_{la}} - (R'_{CM_{la}} - jX'_{CM_{la}}) I_{la} - Z_n I_n]$ $. (Z_{lc} - Z_m + R'_{CN_{la}} - jX'_{CN_{la}})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_{lla} - Z_m) [Z_{llc} I_{la} + Z_m (I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{llc} + I_{bc})]$
IIB	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{lb}) [U_{M_{lb}} - (R'_{CM_{lb}} - jX'_{CM_{lb}}) I_{lb} - Z_n I_n] +$ $(Z_m - Z_{lb} - R'_{CN_{lb}} + jX'_{CN_{lb}})$ $[Z_{llb} I_{lb} + Z_m (I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{llb} + I_{bc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{lb}) - (R'_{CM_{lb}} - jX'_{CM_{lb}}) - (R'_{CN_{lb}} - jX'_{CN_{lb}})] I_{lb}$ $-(Z_m - Z_{lb} - jX_c) I_{lb}$
IIC	$a_1 + jb_1$	$[U_{M_{la}} - (R'_{CM_{la}} - jX'_{CM_{la}}) I_{la} - Z_n I_n]$ $. (Z_{lb} - Z_m + R'_{CN_{la}} - jX'_{CN_{la}})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_{lla} - Z_m) [Z_{llb} I_{lb} + Z_m (I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{llb} + I_{bc})]$
IIB	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{lb}) [U_{M_{lb}} - (R'_{CM_{lb}} - jX'_{CM_{lb}}) I_{lb} - Z_n I_n] +$ $(Z_m - Z_{lb} - R'_{CN_{lb}} + jX'_{CN_{lb}})$ $[Z_{llb} I_{lb} + Z_m (I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{llb} + I_{bc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{lb}) - (R'_{CM_{lb}} - jX'_{CM_{lb}}) - (R'_{CN_{lb}} - jX'_{CN_{lb}})] I_{lb}$ $-(Z_m - Z_{lb} - jX_c) I_{lb}$
IIC	$a_1 + jb_1$	$[U_{M_{lc}} - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) I_{lc} - Z_n I_n]$ $. (Z_{lb} - Z_m + R'_{CN_{lc}} - jX'_{CN_{lc}})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_{llc} - Z_m) [Z_{llb} I_{lc} + Z_m (I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{llc} + I_{bc})]$
IIC	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{lc}) [U_{M_{lc}} - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) I_{lc} - Z_n I_n] +$ $(Z_m - Z_{lc} - R'_{CN_{lc}} + jX'_{CN_{lc}})$ $[Z_{llc} I_{lc} + Z_m (I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{llc} + I_{bc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{lc}) - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) - (R'_{CN_{lc}} - jX'_{CN_{lc}})] I_{lc}$ $-(Z_m - Z_{lc} - jX_c) I_{lc}$
IIC	$a_1 + jb_1$	$[U_{M_{lc}} - (R'_{CM_{lc}} - jX'_{CM_{lc}}) I_{lc} - Z_n I_n]$ $. (Z_{lb} - Z_m + R'_{CN_{lc}} - jX'_{CN_{lc}})$

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

$$S_M = 315\text{kV}, 50\text{Hz}$$

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

$$S_N = 315\text{kV}, 50\text{Hz}$$

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

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 ذکری، 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، احمد، بررسی سیستم‌های قدرت ۲، دانشگاه پیام نور، مدیریت چاپ و انتشارات، تهران، ۱۳۷۸.
- [14] D. L. Goldsworthy “ A linearized model for move-protected series capacitors,” IEEE Transactions on