

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 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 انتهایی خط برحسب جریان ابتدای خط به دست آمده است. در الگوریتم پیشنهاد شده، با استفاده از داده‌های یکی از دو انتهای خط، مکان‌های 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

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 رله های حفاظتی ایجاد می کنند.

خطوط انتقال دو مداره با توجه به مزایای زیست محیطی و اقتصادی که نسبت به خطوط تک مداره دارند، به طور گسترده ای در سیستم های قدرت مدرن استفاده شده اند [۲ و ۳] و حفاظت دیستانس عموماً به عنوان یک حفاظت اصلی در خطوط موازی استفاده می-شود [۴]. در حدود ۲۰ درصد از قطعی های مشترکین بر اثر بروز خطا در سیستم های انتقال است [۵] و حفاظت دیستانس خطوط دومی در تحت خطای cross-country به دلیل کوپلینگ متقابل دومی بسیار مشکل تر 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 تک فاز که در دو مکان مختلف سیستم رخ می دهد، استفاده می شود. خطای cross-country متداول، به صورت خطای تک فاز در هر نقطه ای از سیستم شروع می-شود [۷ و ۸]. بازه ی زمانی کوتاهی از خطای تک فاز تا خطای cross-country وجود دارد که در مقایسه با مدت خطا خیلی کوتاه است [۴]. در نتیجه می توان خطای کراس کانتری را به صورت دو خطای تک فاز هم زمان فرض کرد. ولتاژ در هادی های دو فاز سالم مدار در حد ولتاژ فاز به فاز سیستم افزایش می یابد. این افزایش ولتاژ در فازهای سالم سبب آسیب به برق گیرهای همان بخش شبکه یا بخش های دیگر می-شود. در نتیجه جریان خطا معمولاً بیشتر از جریان خطای تک فاز به زمین است [۷].

به دلیل این که خطاهایی که در شبکه رخ می دهد، اغلب از نوع تک فاز 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 دومی در مورد بررسی قرار گرفته است. خطوط دارای کوپلینگ متقابل یکسان بین فازهای هر مدار و فازهای دو مدار با هم می باشند. البته در این مطالعه خطا دوفاز فرض شده است و جبران سازی نیز در خطوط منظور نشده است. در [۴]، خط دومی در مورد بررسی دارای شرایطی

مشابه [۲] می باشد 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 دومی در 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 چشم پوشی شده است که مطالعه را شامل خطا خواهد کرد.

در [۱۱] و [۱۲]، شبکه ای از دوسو تغذیه شامل خطی دومی در دارای کوپلینگ متقابل که فاقد جبران سازی می باشد در نظر گرفته شده است. در [۱۱]، خطای مورد مطالعه، خطای دوفاز در یک مدار بوده است و در [۱۲] نیز مطالعه برای خطای تک فاز انجام شده و فاصله ی خطا به دست آمده است.

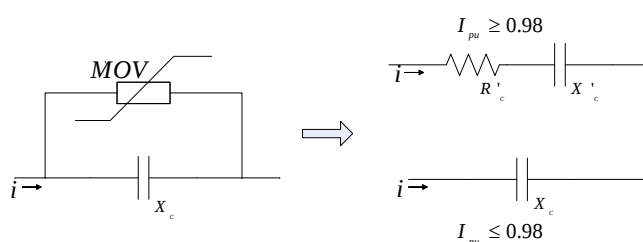
ملاحظه شد که در مطالعات گذشته، در برخی مقالات مکان یابی خطا، جبران سازی سری منظور شده است؛ و اگر جبران سازی منظور شده است، نوع خطا در این مقالات cross-country نبوده است و خطای دوفاز مطالعه شده که تعیین محل خطا در آن بسیار ساده تر از خطای cross-country می باشد. با توجه به مطالعاتی که تا کنون در زمینه حفاظت دیستانس صورت گرفته، تاثیر کوپلینگ متقابل بین تمامی فازها، جبران سازی سری خط انتقال و اثر زمین کردن سیستم به طور هم زمان 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 فاصله ی هر دو خطا از ابتدای خط یکسان هستند، در حالی که اغلب خطای cross-country در دو نقطه ی متفاوت و در فازهای متفاوت در شبکه رخ می دهد و از این فاکتور که موجب پیچیدگی حفاظت دیستانس می شود، صرف نظر شده است.

در این مقاله خطای cross-country به صورت دو خطای تک فاز، در فازهای مختلف و در مکان های مختلف بر روی خط دومی در 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 دومی در نظر گرفتن کوپلینگ متقابل بین تمامی فازها، تاثیر جبران سری خط انتقال و تاثیر زمین کردن سیستم موضوع مورد مطالعه در این مقاله می باشد. در این مقاله الگوریتم جدیدی برای تخمین مکان هر دو خطای تک فاز به وسیله ی داده های یک سمت خط در خطوط انتقال جبران شده با خازن سری که تحت خطای cross-country قرار گرفته اند، ارائه داده است. الگوریتم ارائه شده فاصله ی خطای نزدیک تر و مقاومت خطای رخ داده را تخمین زده و رابطه ای را برای به دست آوردن جریان انتهای آن خط ارائه می دهد. با استفاده از جریان انتهای خط به دست آمده و تاثیر آن بر مکان خطای دیگر،

* 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 حفاظت 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 به وسیله 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 $I_{pu} \geq 0.98$ ترکیب موازی خازن و حفاظت آن به وسیله امپدانس خطی (مقاومت و راکتانس سری) تقریب زده می‌شود. مقادیر این تقریب‌ها به وسیله فرمول‌های زیر به دست می‌آید [۱۵]:

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

$$X'_C = X_C \left(0.1010 - 0.005749I_{pu} + 2.08e^{-0.8566I_{pu}} \right) \quad (3)$$

معادلات (۲) و (۳) برای مقادیر $I_{pu} \geq 0.98$ قابل اعمال هستند. 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 ($I_{pu} \geq 0.98$)، بنابراین حفاظت خازن شروع به هدایت بخشی از جریان خطا می‌کند. در نتیجه 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 0.98 است ($I_{pu} \leq 0.98$) و بنابراین حفاظت خازن جبرانی را هدایت نمی‌کند. در نتیجه معادلات Goldsworthy قابل اعمال نیستند و مقدار بانک خازن تغییری نمی‌کند و برابر X_C باقی می‌ماند.

فاصله‌ی آن خطای دیگر را نیز به دست 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 بخش-های ۳ و ۴ شرح داده شده‌اند. 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 شبکه‌های قدرت کنترل ولتاژ با استفاده از سه روش اصلی زیر صورت می‌گیرد [۱۳]:

- با تزریق قدرت راکتیو توسط جبران‌کننده‌های موازی مانند خازن و جبران‌کننده‌های 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.

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

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

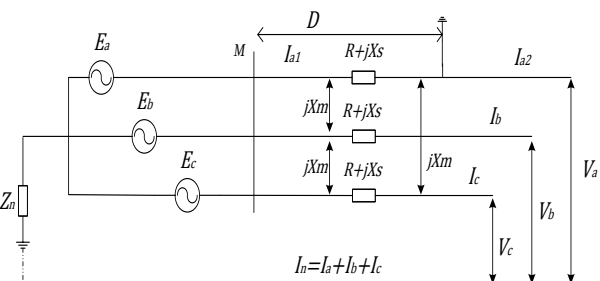
در هنگام رخ داد اتصال کوتاه، ولتاژ دو سر خازن سری به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. به همین دلیل خازن‌های سری باید در مقابل اتصال کوتاه سیستم حفاظت شوند و احتیاج به تجهیزات کامل حفاظتی دارند. حفاظت خازن سری طوری طراحی می‌شود که در زمانی که ولتاژ از سطح طراحی شده افزایش می‌یابد، خازن صدمه نبیند.

۳- سیستم زمین

اهمیت نقطه زمین وقتی ظاهر می شود که در شبکه های برق یک اتصال فاز به زمین بروز می نماید. در این حالت جریان فاز معیوب از طریق زمین به نقطه خنثی برگشت داده می شود. در صورتی که نقطه ی خنثی به زمین وصل نشده باشد، جریان اتصال فاز به زمین به علت عدم وجود مسیر برگشت، ناچیز و خیلی کم تر 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 شبکه ی موجود رابطه ی زیر برقرار است:

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



شکل (۲): شبکه ای زمین شده با امپدانس

همان طور که می دانیم رله دیستانس براساس فاصله محل خطا تا رله عمل می کند، بنابراین با توجه به رابطه (۴) فاصله محل خطا تا رله از رابطه زیر به دست می آید:

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

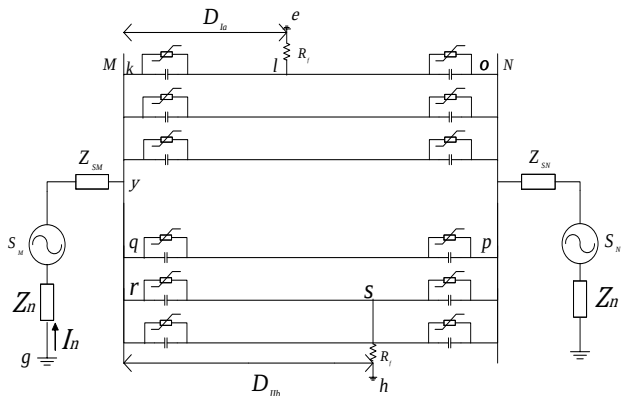
همان طور که در رابطه (۵) مشاهده می شود تعیین فاصله محل خطا تا رله و در نتیجه عملکرد دیستانس تحت تاثیر Z_n است و هرچه مقدار این امپدانس بیشتر شود تاثیر آن نیز افزایش می یابد، پس برای اینکه حفاظت دیستانس عملکرد صحیحی داشته باشد باید امپدانس را که شبکه با آن زمین شده است، در نظر گرفت.

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 فاصله ی نزدیک تری 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 نقطه ی y برابر است با:

$$I_n = I_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llb} + I_{llc} \quad (۶)$$



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

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

D : فاصله محل خطا از ابتدای خط

R_f : مقاومت خطا

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

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

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

f : به صورت زیروند بیانگر کمیت های مربوط به خطا

M و N : به صورت زیروند به ترتیب بیانگر کمیت های مربوط به باس M و N

R'_c و X'_c : به ترتیب بیانگر مقاومت و امپدانس خازنی تقریب زده شده ی جبران ساز سری با (۲) و (۳)

X_c : امپدانس خازنی جبران ساز سری

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

$$U_{Mla} = D[Z_{la}I_{la} + Z_m(I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llb} + I_{llc})] + (R'_{CMLa} - jX'_{CMLa})I_{la} + R_f I_{lf} + Z_n I_n \quad (۷)$$

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

$$a_4 + jb_4 = (Z_{la} - Z_m) [Z_{la} I_{la} + Z_m (I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llb} + I_{llc})]$$

$$a_3 + jb_3 = (Z_m - Z_{la}) [U_{Mla} - (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) I_{la} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{la} - R'_{CNla} + jX'_{CNla}) [Z_{la} I_{la} + Z_m (I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llb} + I_{llc})]$$

$$a_2 + jb_2 = [(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})] I_{la} - (Z_m - Z_{lla} - jX'_C) I_{lla}$$

$$a_1 + jb_1 = [U_{Mla} - (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) I_{la} - Z_n I_n] \cdot (Z_{la} - Z_m + R'_{CNla} - jX'_{CNla})$$

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:

$$D_{la} = \frac{b_1 a_2 - a_1 b_2}{b_4 a_2 - a_4 b_2} \quad (14)$$

$$R_f = \frac{(1 - D_{la})(a_4 D_{la} - a_1)}{a_2} \quad (15)$$

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

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

با اعمال KVL در مسیر gyrsh داریم:

$$U_{Mlb} = D_{lb} [Z_{lb} I_{lb} + Z_m (D_{la} I_{la} + (1 - D_{la}) I_{la}^r + I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llc})] + (R'_{CMlb} - jX'_{CMlb}) I_{lb} + R_f I_{llb} + Z_n I_n \quad (17)$$

$$U_{Mlb} = U_{Mlb} \quad (18)$$

با توجه به (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آید:

در (۷)، مقادیر Z_m و Z_{la} مشخص هستند. مقادیر معادل جبران‌ساز 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 (۷) نامشخص است جریانی است که از مقاومت خط عبور می‌کند (I_{laf})؛ با اعمال قانون جریان کیرشهف (KCL) در این نقطه داریم:

$$I_{laf} = I_{la} - I_{la}^r \quad (8)$$

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 KVL در مسیر kopqk داریم:

$$[D_{la} (Z_{la} - Z_m) + (R'_{CMla} - jX'_{CMla})] I_{la} + [(1 - D_{la})(Z_{la} - Z_m) + (R'_{CNla} - jX'_{CNla})] I_{la}^r + (Z_m - Z_{lla} - jX'_C) I_{lla} = 0 \quad (9)$$

بنابراین:

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

با جایگذاری (۱۰) در (۸) داریم:

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

در نتیجه:

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

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

$$U_{Mla} = D_{la} [Z_{la} I_{la} + Z_m (I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llb} + I_{llc})] + (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) I_{la} + Z_n I_n + \left(\frac{[(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CMla} - jX'_{CMla}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})] I_{la} - (Z_m - Z_{lla} - jX'_C) I_{lla}}{(1 - D_{la})(Z_m - Z_{la}) - (R'_{CNla} - jX'_{CNla})} \right) R_f \quad (12)$$

تبدیل فوریه تمام سیکل با نرخ نمونه برداری ۱۰۰ نمونه در هر سیکل (برای سیستم ۵۰ هرتز) به عنوان فیلتر الگوریتم استفاده می شود. معادلات (۱۶) و (۲۵) نیز برای تخمین امپدانس خطاها مورد استفاده قرار می گیرد.

۵-۲- نتایج شبیه سازی

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 جبران سازی ثابت و فاصله بین دو خطا ثابت

در این سناریو خطای cross-country در خط جبران شده با خازن سری در شرایطی که جبران سازی به میزان ۳۰ درصد می باشد، رخ داده است. ویژگی این خطا به این صورت است که خطای تک فاز اول در فاز a مدار اول و خطای تک فاز 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 می شود. 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 شده اند.

جدول ۱- تاثیر تغییر مکان خطا بر راکتانس خطا (خطا 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_{lb} و D_{la} به ترتیب فاصله ی محل خطاهای تک فاز در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم از باس M می باشند که در ستون اول و دوم بر حسب درصدی از طول خط بیان شده اند. X_a و X_{bb} به

$$U_{Mb} - (R'_{CMlb} - jX'_{CMlb})I_{lb} = D_{lb}Z_{lb} \left[I_{lb} + \frac{Z_n}{Z_{lb}} (D_{la}I_{la} + (1-D_{la})I'_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llc}) \right] + R_f I_{lbf} \quad (19)$$

$$I_{lbf} = I_{lb} + \frac{Z_n}{Z_{lb}} (D_{la}I_{la} + (1-D_{la})I'_{la} + I_{lb} + I_{lc} + I_{lla} + I_{llc}) \quad (20)$$

در معادله ی (۲۰) تمامی پارامترها جز I'_{la} مشخص هستند. پارامتر ذکر شده از یک تقسیم جریان و با استفاده از (۱۴) و (۱۵) به دست می آید.

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

در نتیجه

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

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

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

در نتیجه

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

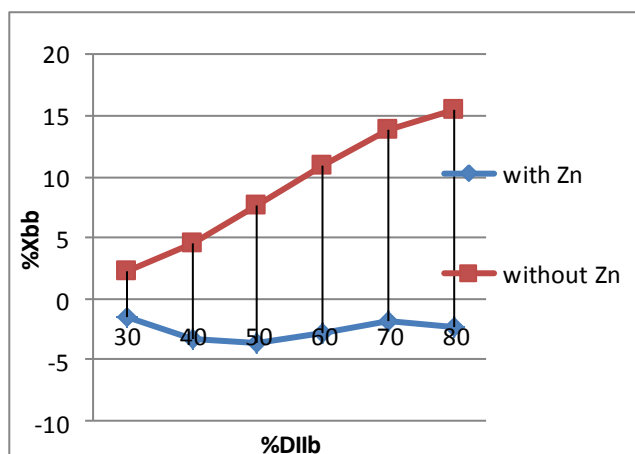
$$X_{bb} = D_{lb} * X_{lb} \quad (25)$$

با استفاده از (۱۴)، (۱۶)، (۲۴) و (۲۵) فاصله و امپدانس خطا برای دو خطای تک فاز در مکان های مختلف (خطای cross-country) به دست می آید. برای خطا در فازهای مختلف نیز فرمول هایی مشابه به دست می آید که در ضمیمه ی الف آمده است.

۵- مدل سازی سیستم و نتایج شبیه سازی

۵-۱- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، الگوریتم پیشنهادی برای حفاظت ناحیه ی اول رله ی دیستانس بر روی سیستم قدرت شکل (۳) مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم مورد نظر دارای ولتاژ پایه ۳۱۵kV می باشد 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 می کند. شبیه سازی ها 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

۵-۲-۲- تاثیر میزان جبران سازی 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 به دست 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 جبران سازی بر راکتانس خطا (خطا بر حسب درصد)

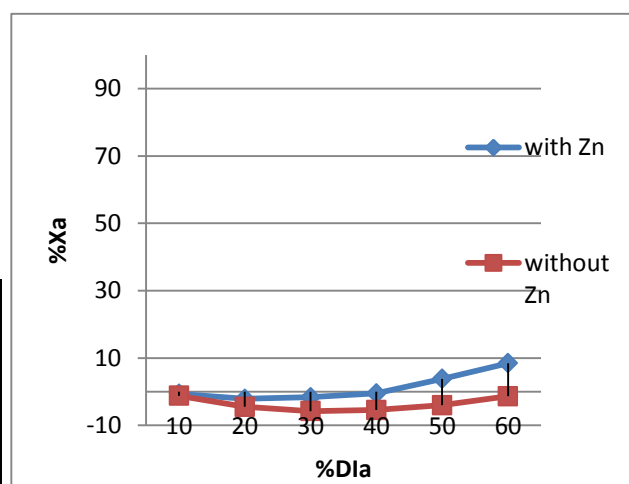
	%D _{bb}	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
%k	%D _{bb}	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
۳۰	%X _a	-۰/۶۵	-۲/۱۵	-۱/۶۷	۰/۴۹	۳/۷۹	۸/۴۶
	%X _{bb}	-۱/۴۴	-۳/۲۶	-۳/۵۹	-۲/۷۸	-۱/۷۶	-۲/۲۸
۵۰	%X _a	-۱/۳۲	-۴/۱۰	-۳/۰۱	۰/۵۹*	۵/۸۲	۱۳/۰۶
	%X _{bb}	۱/۰۴	۰/۳۰	۱/۶۳	۴/۶۴*	۸/۶۶	۱۲/۶۶
۷۰	%X _a	-۲/۲۵	-۶/۳۵	-۳/۳۵	۲/۲۱	۹/۴۷	۱۸/۹۶
	%X _{bb}	۴/۱۳	۴/۳۸	۷/۵۷	۱۲/۸۳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

ترتیب خطای امپدانس تخمین زده 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.

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

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۱) که در اکثر موارد کم‌تر از ۵ درصد می‌باشد تخمین امپدانس خطا توسط روش پیشنهادی به مکان خطا (در شرایط جبران سازی 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

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)

$%D_{la}$	$%D_{lb}$	$%X_a$	$%X_{bb}$
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 تخمین زده 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

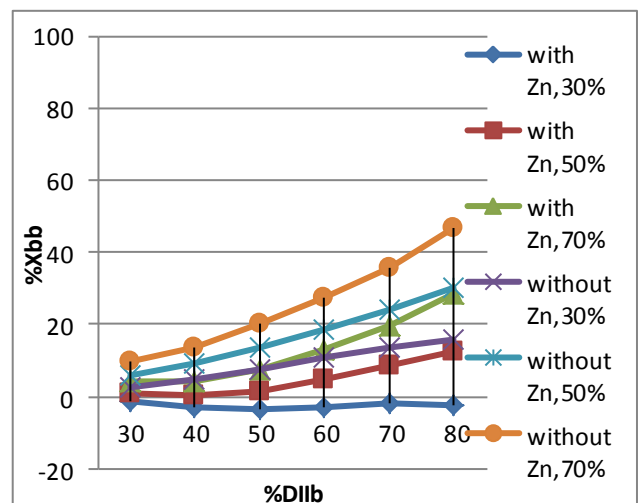
برای مشاهده‌ی تاثیر مقاومت خطا بر تخمین امپدانس خطا، در شبکه‌ای با ۳۰ درصد جبران‌سازی، فاصله‌ی دو خطا را ۰/۲ پریونیت در نظر گرفته و تخمین امپدانس را به ازای مقاومت خطاهای مختلف به‌دست می‌آوریم که نتایج آن در جدول (۴) مشاهده می‌شود. ستون اول مقاومت خطا برحسب اهم می‌باشد و نمادهای به کاررفته در ستون دوم 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)

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

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 کم‌تر 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 میزان ۴/۶۴ 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 فاز b مدار دوم را از آن دور می‌کنیم و نتایج به‌دست آمده در جدول (۳) مشاهده می‌شود. دو منبع با هم ۱۵ درجه

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 جبران سازی خط به وسیله راکتور سه فاز بر الگوریتم پیشنهادی

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

جدول ۶- تاثیر راکتور سه فاز راکتانس خط (خطا بر حسب درصد)

$\%D_{la}$	$\%D_{lb}$	$\%X_a$	$\%X_{bb}$
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) می‌توان نتیجه گرفت که جبران سازی خط به وسیله راکتور سه فاز در دو انتهای خط با ظرفیت ۵۰ مگاوار و با اتصال ستاره زمین شده تاثیر چشم گیری بر الگوریتم پیشنهادی ندارد.

الگوریتم های قدیمی رله دیستانس برای خطای کراس کانتری، به این دلیل که امکان رخداد دو خطای تک فاز در مکان های مختلف را در نظر نگرفته اند، قادر به تشخیص و تخمین امپدانس خطا برای خطای دورتر نمی باشند. به طور مثال اگر خطای کراس کانتری به صورت خطاهای تک فاز در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم رخ دهد و فاصله ی خطاها از هم به میزان ۰/۳ پریونیت باشد، میزان خطا در تخمین امپدانس خطا برای فاز b، در مکان های مختلف در طول خط انتقال دومداره توسط الگوریتم ارائه شده در [۴] به صورت بیان شده در جدول (۷) می‌باشد.

	$\%X_{bb}$	-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
	$\%X_{bb}$	-۲/۵۳	-۶/۳۷	-۸/۸۸	-۱۱/۱	-۱۳/۵	-۱۸/۱

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 خطایی کم تر از ۶ درصد می‌باشد. به طور مثال اعدادی که با علامت (*) مشخص شده اند بیان گر درصد خطای اندازه گیری 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 تخمین زده شده برای این دوفاز به ترتیب برابر ۰/۷۸ و ۰/۱۶ درصد است.

۵-۲-۵- تاثیر اختلاف فاز منابع در شرایط جبران سازی

ثابت و فاصله بین دو خطا ثابت

برای بررسی تاثیر اختلاف فاز منابع بر تخمین فاصله و امپدانس خطا، فاصله ی بین دو خطا را ۰/۲ پریونیت در نظر گرفته و در شرایطی که میزان جبران سازی شبکه ۳۰ درصد می‌باشد، تخمین امپدانس را به ازای اختلاف فاز ۱۵، ۵، و -۵ 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 ۵-۲-۱ است.

جدول ۵- تاثیر تغییر اختلاف فاز منابع بر راکتانس خطا

	$\%D_{bb}$	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
δ	$\%D_{bb}$	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 شده اند 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 به دست آمده

پیشنهادی در این تحقیق برای خطای cross-country ابتدا به تخمین محل خطای نزدیک تر می پردازد سپس با استفاده از فاصله ی خطا و مقاومت خطای به دست آمده، مقدار جریان انتهای خط و تاثیر آن در محل خطای دوم را که در فاصله ی دورتری است محاسبه می کند و محل خطای دوم و امپدانس خطا را تخمین می زند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای حفاظت ناحیه ی اول رله ی دیستانس در خطوط دومداره ی جبران شده با خازن سری تحت خطای cross-country به صورت دو خطای تک فاز در مکان های مختلف ارائه شد. این روش با استفاده از سیگنال های ابتدای خط قادر به تخمین سیگنال های انتهای خط می باشد و امپدانس خطا را فقط با داده های یک سمت خط بعد از یک سیکل تخمین می زند. نیاز به کانال مخابراتی بین پست های ابتدا و انتهای خط انتقال دومداره ندارد. در نتیجه دارای مشکلات ناشی از خطا در ارسال داده ها نمی باشد. روش ارائه شده در اکثر موارد دارای خطایی کم تر از ۱۰ درصد می باشد که می تواند با تنظیم مناسب ناحیه ی حفاظتی رله ی دیستانس خطای رخ داده را در ناحیه ی اول حفاظتی تشخیص دهد.

ضمایم

ضمیمه ی الف

در جدول (۱۰) ضرایب معادله ی (۱۰) به ازای خطا در فازهای دیگر خط دومداره مشاهده می شود. از این ضرایب با توجه به فرمول های بخش (۳) برای تخمین امپدانس خطای نزدیک تر استفاده می شود.

جدول ۱۰- ضرایب معادله (۱۳) برای سایر خطاها

IB	$a_4 + jb_4$	$(Z_b - Z_m)[Z I_{Ib} + Z_m(I_{Ia} + I_{Ic} + I_{Ib} + I_{Ic})]$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_b)[U_{Mb} - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})I_{Ib} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_b - R'_{CMB} + jX'_{CMB})[Z I_{Ib} + Z_m(I_{Ia} + I_{Ic} + I_{Ib} + I_{Ic})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_b) - (R'_{CMB} - jX'_{CMB}) - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})]I_{Ib} - (Z_m - Z_b - jX'_{C})I_{Ib}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{Mb} - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})I_{Ib} - Z_n I_n] \cdot (Z_b - Z_m + R'_{CMB} - jX'_{CMB})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_b - Z_m)[Z I_{Ic} + Z_m(I_{Ia} + I_{Ib} + I_{Ic} + I_{Ic})]$

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

	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
%D _{ib}					
%X _{ib}	-۳۶/۰۲*	-۳۹/۳۴	-۴۳/۱۱	-۴۹/۶۴	-۵۰/۵۹

برای مثال عددی که در جدول (۷) با علامت (*) مشخص شده است، نشان می دهد که امپدانس خطای اندازه گیری 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 می باشد.

حال اگر فاصله بین دو خطا را افزایش دهیم میزان خطای تخمین امپدانس خطا برای فاز b بیشتر می شود. 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.

جدول ۸- درصد خطای اندازه گیری امپدانس خطا برای فاز b مدار دوم توسط روش ارائه شده در [۴] و در حالت فاصله دو خط متغیر

	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
%D _{ib}					
%X _{ib}	-۳۶/۰۲	-۵۵/۰۰	-۷۷/۱۹	-۸۵/۲۱*	-۹۷/۷۰

برای مثال عددی که در جدول (۸) با علامت (*) مشخص شده است، نشان می دهد که امپدانس خطای اندازه گیری 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 می باشد.

اگر خطای cross-country به صورت خطاهای تک فاز در فاز a مدار اول و فاز b مدار دوم رخ دهد و فاصله ی خطاها از هم به میزان ۰/۲ پریونیت باشد، میزان خطا در تخمین امپدانس خطا برای فاز b، در مکان های مختلف در طول خط انتقال دومداره توسط الگوریتم ارائه شده در [۱۲] به صورت بیان شده در جدول (۹) می باشد.

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

	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
%D _{ib}						
%X _{ib}	۹۱/۸۹	۴۹/۴۷	۴۹/۷۰	۵۷/۳۴	۶۹/۸۴	۸۸/۵۹

بنابراین مشاهده شد که الگوریتم های ارائه شده در گذشته قادر به تخمین امپدانس خطای دورتر و تشخیص محل خطا نیستند. الگوریتم

در جدول (۱۱) نیز فرمول به دست آوردن فاصله ی خطا برای خطاهای دورتر مشاهده می شود.

جدول ۱۱ - ضرایب معادله (۲۵) برای سایر خطاها

IA	$\frac{\text{imag}\left(\frac{U_{Mk} - (R'_{CMk} - jX'_{CMk})I_{Lk} - Z_n I_n}{I_{Jk}}\right)}{\text{imag}(Z_{Jk})}$
IB	$\frac{\text{imag}\left(\frac{U_{Mb} - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})I_{Lb} - Z_n I_n}{I_{Jb}}\right)}{\text{imag}(Z_{Jb})}$
IC	$\frac{\text{imag}\left(\frac{U_{Mc} - (R'_{CMc} - jX'_{CMc})I_{Lc} - Z_n I_n}{I_{Jc}}\right)}{\text{imag}(Z_{Jc})}$
IIA	$\frac{\text{imag}\left(\frac{U_{Mka} - (R'_{CMA} - jX'_{CMA})I_{La} - Z_n I_n}{I_{Jka}}\right)}{\text{imag}(Z_{Jka})}$
IIC	$\frac{\text{imag}\left(\frac{U_{Mkc} - (R'_{CMc} - jX'_{CMc})I_{Lc} - Z_n I_n}{I_{Jkc}}\right)}{\text{imag}(Z_{Jkc})}$

ضمیمه ی ب

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

امپدانس خودی واحد طول فازها

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

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

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

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

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

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

امپدانس متقابل واحد طول بین فازها

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

منابع معادل شبکه

IC	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{Lc})[U_{Mc} - (R'_{CMc} - jX'_{CMc})I_{Lc} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{Lc} - R'_{CNc} + jX'_{CNc})[Z_{Lc} I_{Lc} + Z_m (I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc} + I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{Lc}) - (R'_{CMc} - jX'_{CMc}) - (R'_{CNc} - jX'_{CNc})]I_{Lc} - (Z_m - Z_{Lc} - jX'_{CNc})I_{Lc}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{Mc} - (R'_{CMc} - jX'_{CMc})I_{Lc} - Z_n I_n] \cdot (Z_{Lc} - Z_m + R'_{CNc} - jX'_{CNc})$
IIA	$a_4 + jb_4$	$(Z_{La} - Z_m)[Z_{La} I_{La} + Z_m (I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc} + I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc})]$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{La})[U_{Ma} - (R'_{CMA} - jX'_{CMA})I_{La} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{La} - R'_{CNa} + jX'_{CNa})[Z_{La} I_{La} + Z_m (I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc} + I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{La}) - (R'_{CMA} - jX'_{CMA}) - (R'_{CNa} - jX'_{CNa})]I_{La} - (Z_m - Z_{La} - jX'_{CNa})I_{La}$
IIB	$a_1 + jb_1$	$[U_{Ma} - (R'_{CMA} - jX'_{CMA})I_{La} - Z_n I_n] \cdot (Z_{La} - Z_m + R'_{CNa} - jX'_{CNa})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_{Lb} - Z_m)[Z_{Lb} I_{Lb} + Z_m (I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc} + I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc})]$
	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{Lb})[U_{Mb} - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})I_{Lb} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{Lb} - R'_{CNb} + jX'_{CNb})[Z_{Lb} I_{Lb} + Z_m (I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc} + I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc})]$
IIC	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{Lb}) - (R'_{CMB} - jX'_{CMB}) - (R'_{CNb} - jX'_{CNb})]I_{Lb} - (Z_m - Z_{Lb} - jX'_{CNb})I_{Lb}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{Mb} - (R'_{CMB} - jX'_{CMB})I_{Lb} - Z_n I_n] \cdot (Z_{Lb} - Z_m + R'_{CNb} - jX'_{CNb})$
	$a_4 + jb_4$	$(Z_{Lc} - Z_m)[Z_{Lc} I_{Lc} + Z_m (I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc} + I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc})]$
IIC	$a_3 + jb_3$	$(Z_m - Z_{Lc})[U_{Mc} - (R'_{CMc} - jX'_{CMc})I_{Lc} - Z_n I_n] + (Z_m - Z_{Lc} - R'_{CNc} + jX'_{CNc})[Z_{Lc} I_{Lc} + Z_m (I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc} + I_{La} + I_{Lb} + I_{Lc})]$
	$a_2 + jb_2$	$[(Z_m - Z_{Lc}) - (R'_{CMc} - jX'_{CMc}) - (R'_{CNc} - jX'_{CNc})]I_{Lc} - (Z_m - Z_{Lc} - jX'_{CNc})I_{Lc}$
	$a_1 + jb_1$	$[U_{Mc} - (R'_{CMc} - jX'_{CMc})I_{Lc} - Z_n I_n] \cdot (Z_{Lc} - Z_m + R'_{CNc} - jX'_{CNc})$

- 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.

$$S_M = 315kv, 50Hz$$

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

$$S_N = 315kv, 50Hz$$

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

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 nonearthen 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