

## طرح حفاظت دیستانس جدیدی در خطوط انتقال سه پایانه

مرضیه نقدی<sup>۱</sup> جواد ساده<sup>۱</sup> مجتبی نظام محله<sup>۲</sup>  
کارشناس ارشد قدرت استادیار گروه برق دانشجوی کارشناسی ارشد قدرت  
<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۲</sup> دانشگاه صنعت آب و برق تهران (شهید عباسپور)  
marzie\_naghdi@yahoo.com sadeh@ferdowsi.um.ac.ir mojtabanezam@gmail.com

چکیده - در این مقاله طرح حفاظت دیستانس جدیدی پیشنهاد شده است که حفاظت اصلی کاملی برای کل خط انتقال سه پایانه را انجام می‌دهد. در حفاظت خطوط با طرحهای دیستانس معمول ناحیه انتهایی خط حفاظت نمی‌شود و در خطوط سه پایانه نیز نقاط کوری در نزدیکی نقطه انشعاب، در ناحیه حفاظتی اول رله وجود دارد. با ارتباط رله‌ها بوسیله کانالهای مخابراتی بین پایانه‌ها و استفاده از طرحهای حفاظت دیفرانسیل این موارد در حفاظت خط سه پایانه حل شده؛ ولی بکارگیری کانالهای مخابراتی نیز خود دارای مشکلاتی است. روش پیشنهادی در حفاظت اصلی کل خط سه پایانه، نیاز به ارتباط مخابراتی بین پایانه‌ها ندارد. کلید واژه- حفاظت دیستانس، حفاظت دیفرانسیل، خط انتقال سه پایانه، روش حفاظتی Succession, PSCAD/EMTDC.

### ۱- مقدمه

اصلی در خط سه پایانه استفاده می‌کند. طرحهایی که از رله‌های دیفرانسیل به عنوان حفاظت اصلی استفاده می‌کنند، دارای قابلیت اطمینان و سرعت عملکرد بهتری نسبت به سایر حفاظتها می‌باشد. نکته قابل توجه در حفاظت دیفرانسیل ارائه حفاظت اصلی کاملی برای کل خط انتقال است. در این نوع حفاظت اطلاعات مربوط به دامنه یا فاز جریان باید به فاصله بسیار دورتری مبادله شود، که نیاز این نوع حفاظت، به طرحهای مخابراتی و سنکرونیزاسیون دقیق زمانی را روشن می‌سازد. گسترش انواع رله‌های دیجیتال از طرفی و بکارگیری کانالهای ارتباطی از جمله فیبر نوری با قابلیت انتقال اطلاعات با حجم بالا و همچنین کاربرد سیستم GPS جهت حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، استفاده از حفاظت دیفرانسیل در خطوط انتقال چند پایانه را آسان نموده است. معمولاً در این طرحها از رله‌های دیستانس یا حفاظتهای دیگر برای حفاظت پشتیبان استفاده می‌شود [۱ و ۷]. ولی رله‌های دیفرانسیل با مشکلات خاصی مثل اشتباه عملکردی در مقایسه پلاریته جریان در پایانه‌ها، ناکافی بودن جریان جهت قطع، اشباع ترانسهای جریان در پایانه‌ها، تاخیر زمانی در ارسال اطلاعات، محدودیتهای اقتصادی در نصب کانالهای مخابراتی، احتیاج به رله‌های دیستانس به عنوان پشتیبان ... در زمان کاربرد مواجه

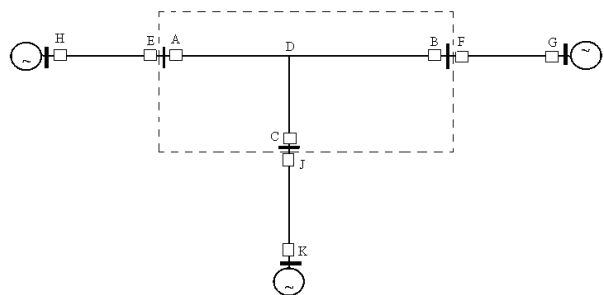
ساده‌ترین و متداولترین خط انتقال چند پایانه، خطوط سه پایانه هستند [۱]. حفاظت این خطوط به سادگی خط دو پایانه نیست؛ نصب تجهیزات اندازه‌گیری در نقطه انشعاب امکانپذیر نمی‌باشد و سیستمهای حفاظتی باید از سیگنالهای ولتاژ و جریان در پایانه‌های خط انتقال برای تشخیص خطا استفاده کنند. طرحهای حفاظتی مختلفی در این خطوط بکار گرفته شده، حفاظتهای دیستانس با استفاده از رله‌های جهتدار و کانالهای مخابراتی فرکانس بالا (HF) مانند Direct Underreaching Transfer Trip, Permissive Underreaching Transfer Trip, Permissive Overreaching Transfer Trip و Directional Comparison Blocking [۱ و ۲ و ۳]، طرح دیستانس تطبیقی بر اساس مقایسه ولتاژ و جریان پیش و پس خطا [۴]، طرحهای حفاظت دیفرانسیل جریانی با مقایسه فاز و دامنه جریان پایانه‌ها به کمک تبدیل فوریه [۵] یا موجک [۶] و رله‌های دیفرانسیل جریانی به همراه رله‌های جهتدار [۱] از این جمله‌اند. حفاظت دیفرانسیل در خطوط انتقال سه پایانه از مقایسه فاز جریان (مثل مقایسه پلاریته جریان خطا در پایانه‌ها)، یا مقایسه دامنه جریان و یا مقایسه دامنه و فاز جریان (هر دو با هم) برای حفاظت

هستند [۷]. این نکات کاربرد بعضی از طرحهای حفاظتی دیگر را در خطوط سه پایانه مختلف موجب می‌گردد. طرح حفاظت دیستانسی در مرجع شماره [۸] ارائه شده که دارای طرح حفاظت کاملتری نسبت به طرحهای حفاظت دیستانس دیگر است. ولی این طرح حفاظتی دارای نقاط کوری در نزدیکی نقطه انشعاب خط سه پایانه است؛ این نقاط کور نواحی هستند که در بعضی از شرایط خطا توسط هیچیک از رله‌های پایانه‌های خط در ناحیه اول رله تشخیص داده نمی‌شود [۲]. همچنین طرح موردنظر حفاظت کاملی از خط سه پایانه را ارائه نمی‌کند؛ در صورت بروز خطا در فاصله ۸۰ درصد خط تا پایان خط، رله موجود در پایانه نزدیک عمل کرده، ولی رله‌های پایانه‌های دور ممکن است در ناحیه اول عمل نکنند.

در این مقاله، طرح حفاظت دیستانس جدیدی با توجه به روش Succession در خطوط انتقال سه پایانه پیشنهاد شده، که خود به تنهایی حفاظت اصلی و پشتیبان را انجام می‌دهد، ضمن آنکه بدون استفاده از کانالهای مخابراتی بین پایانه‌های خط سه پایانه حفاظت اصلی کاملی برای کل خط ارائه می‌کند. طرحهای حفاظتی در خطوط انتقال به موارد اقتصادی و تجهیزات موجود در سیستم وابسته‌اند، این نکته در خطوط با ولتاژ بالای ۲۳۰kV دارای اهمیت بیشتری است. لذا عدم وابستگی طرح پیشنهادی به تجهیزات مختلفی که برای انتقال اطلاعات در پایانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، قابل توجه است.

## ۲- طرح حفاظت دیستانس پیشنهادی در خط انتقال سه پایانه

۲-۱- تنظیم ناحیه اول رله دیستانس هر پایانه خط:  
شکل ۱ یک خط انتقال سه پایانه را نشان می‌دهد (ناحیه‌ای که در کادر با خط نقطه چین قرار دارد).



شکل ۱: سیستم قدرت نمونه با سه پایانه

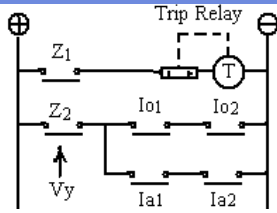
از آنجاکه نصب تجهیزات اندازه‌گیری و حفاظتی در نقطه انشعاب خط امکان ندارد (نقطه D در شکل ۱)؛ رله‌های حفاظتی در پایانه‌های خط انتقال با استفاده از مقادیر ولتاژ و جریان در همان پایانه، باید به ازای هر خطا روی هر سه انشعاب از خط سه پایانه یعنی فاصله AD، BD و CD، شکل ۱ عمل کنند. در طرح حفاظت دیستانس پیشنهادی، ناحیه اول حفاظتی رله دیستانس در هر پایانه خط سه پایانه شکل ۱ مثل رله A، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_{1A} = Z_{AD} + K * [\min(Z_A(B), Z_A(C)) - Z_{AD}] \quad (1)$$

در این رابطه K ۰.۸ یا ۰.۹ در نظر گرفته می‌شود. این ضریب برای اطمینان از این نکته است که با وجود خطای ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ و سایر خطاها برد رله از پایانه‌های B و C فراتر نرود.  $Z_A(B)$  امپدانس است که رله A به ازای خطا در نقطه B می‌بیند و  $Z_A(C)$  امپدانس است که به ازای خطا در نقطه C، رله A دیده است. به این ترتیب رله A برای هر شرایط، تمام خطی را که خود در آن واقع است یعنی خط AD را محافظت می‌کند. لذا شرایطی رخ نمی‌دهد که نقطه‌ای در روی هر خط سه پایانه وجود داشته باشد که هیچ یک از رله‌های پایانه‌ها آن را رویت نکنند. اگر خطا در فاصله AD رخ دهد و رله B یا C یا هر دو، آنرا نبینند، رله A حتماً آنرا می‌بیند. برای خطا در روی خطوط BD و CD همینطور؛ یعنی ناحیه اول برای رله‌هایی که در نقاط B و C واقعند به همین ترتیب تعریف می‌شود. در تنظیم ناحیه اول رله A در مرجع [۸] نقاطی روی خط AD در نزدیکی نقطه انشعاب D وجود دارد که ممکن است در بعضی شرایط دیده نشوند [۲]. تنظیم ناحیه اول رله در مرجع [۸] به صورت زیر است:

$$Z_{1A} = K * [\min(Z_A(B), Z_A(C), Z_{AB}, Z_{AC})] \quad (2)$$

دقت کنید که اگر  $Z_{DB}$  نسبت به  $Z_{AD}$  کوچک باشد، با توجه به رابطه (۲) نقطه‌ای روی فاصله AD ممکن است وجود داشته باشد که در رابطه (۲) دیده نشود؛ به این نواحی، نقاط کور گفته می‌شود. نقاط کور در بعضی شرایط خطا که در مرجع [۲] به طور کامل به آن پرداخته شده است توسط هیچ رله‌ای در پایانه‌ها دیده نمی‌شوند. با تعریف ناحیه اول به صورت رابطه (۱) این نکته حل شده، زیرا حداقل ناحیه اول رله A برابر فاصله AD است.



شکل ۳: مدار فرمان ناحیه اول رله دیستانس در خط سه پایانه

اما جریان توالی صفر برای خطاهای سه فاز متقارن مقداری ندارد که تغییر آن برای مدار مکمل استفاده شود. لذا از یک مدار اضافی که برای تشخیص خطاهای سه فاز از تغییر جریان یکی از فازها مثل فاز A ( $I_{a1}$  به  $I_{a2}$ ) در شکل ۳ استفاده می‌شود. هر گاه یک خطای سه فاز متقارن در نقطه P رخ دهد؛ رله A در ناحیه اول آنرا تشخیص نمی‌دهد و ولی رله B در ناحیه اول آن را می‌بیند و عمل می‌کند. در اثر عملکرد رله B جریان فاز a در رله A تغییر می‌کند و مدار مکمل در شکل ۳ بکار می‌افتد. با آنکه جریان توالی صفر در این خطا در نقطه P صفر بود؛ رله A عمل خواهد کرد.

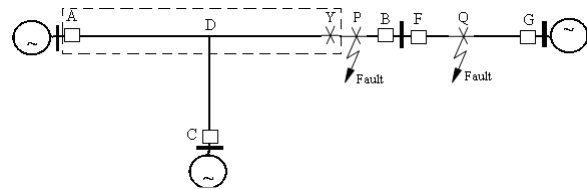
اگر یک اتصال کوتاه تک فاز در نقطه Q در شکل ۲ رخ دهد به این معنا که اتصال کوتاه رخ داده برای خط سه پایانه یک خطای داخلی نباشد. رله B این خطا را تشخیص نمی‌دهد. خطای Q در ناحیه اول رله F رخ داده است. این خطا اگر در ناحیه دوم رله A باشد، و قبل از اینکه رله F عمل کند، اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین در نقطه Q به اتصال کوتاه دوفاز به زمین تبدیل شود؛ تغییر جریان  $I_{0A}$  بدون عملکرد رله B ایجاد می‌شود و احتمال عملکرد رله A در ناحیه اول با توجه به شکل ۳ وجود دارد؛ در صورتی که خطا در خارج از خط سه پایانه در نقطه Q اتفاق افتاده است. برای جلوگیری از کار نابجای رله A در این شرایط، عملکرد رله توسط ولتاژ انتهای ناحیه حفاظتی خنثی می‌شود. فرض کنید نقطه Y روی خط BD، انتهای ناحیه اول رله A باشد. ولتاژ نقطه Y آخرین نقطه تحت ناحیه اول تعریف شده در رابطه (۱) به عنوان یک سیگنال کمکی در نظر گرفته می‌شود:

$$V_y = I_A * Z_{1A} \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $I_A$  جریان رله A در هر خطا و  $Z_{1A}$  نیز در رابطه (۱) تعریف شده است. در حالتی که یک خطای تک فاز در نقطه P قبل از عملکرد رله B به خطای دوفاز به زمین تبدیل شود؛ مدار مکمل ناحیه اول رله A در شکل ۳

در ناحیه اول تعریف شده رله A در رابطه (۱) قسمتی از انتهای خطوط BD و CD یعنی نزدیک نقطه B و نزدیک نقطه C محافظت نمی‌شود. برای کامل کردن ناحیه حفاظتی اول رله A، که به ازای تمام خطاهای داخلی خط سه پایانه (خطا روی هر انشعاب) عمل کند، از یک مدار مکمل موازی با مدار ناحیه اول، استفاده می‌گردد.

فرض کنید خطا خارج از ناحیه حفاظتی  $Z_{1A}$  رخ داده، ولی روی یکی از انشعابهای خط سه پایانه واقع است. یکی از رله‌های B یا C خطا را در ناحیه اول خود می‌بیند، مثل خطا در نقطه P در روی خط BD شکل ۲، که خطا در ناحیه اول رله B دیده می‌شود، ولی انتهای ناحیه حفاظتی اول رله A نقطه Y باشد. بنابراین رله A خطا را در ناحیه حفاظتی دوم خود ( $Z_{2A}$ ) حس می‌کند.



شکل ۲: نمایش ناحیه اول رله A در خط سه پایانه

به منظور تشخیص خطا در نقطه P بوسیله رله A در ناحیه اول از تغییر جریان توالی صفر استفاده می‌شود. جریان توالی صفر در نقطه A برابر است با:

$$I_{0A} = I_{aA} + I_{bA} + I_{cA} \quad (3)$$

برای خطا در نقطه‌ای مثل P که روی خط BD رخ داده و رله A آن را در ناحیه دوم خود می‌بیند، رله B خطا را در ناحیه اول خود ( $Z_{1B}$ ) حس می‌کند، رله B عمل کرده و جریان توالی صفر در نقطه A، ( $I_{0A}$ ) تغییر می‌کند ( $I_{0A1}$  به  $I_{0A2}$  تبدیل می‌شود) با این تغییر، مدار مکمل ناحیه اول رله A در شکل ۳ فعال شده، خطا را در ناحیه اول رله A با تاخیر زمانی خیلی کوتاهتر از تاخیر زمانی برای ناحیه دوم رله دیستانس تشخیص می‌دهد. به این حالت اصطلاحاً فقدان شتاب یا Acceleration Failure در قطع گفته می‌شود [۹]. این نکته در مورد خطاهایی که روی خط CD رخ می‌دهد نیز صادق است. در شکل ۳ طرح مدار فرمان ناحیه اول رله A دیده می‌شود:

به صورت رابطه (۶) تعریف شده است (شکل ۱):

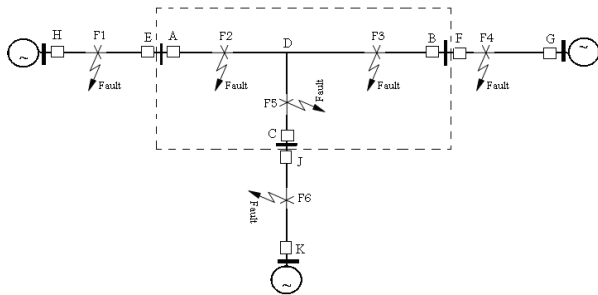
$$Z_{3A} = K2 * [\min(Z_A(G), Z_A(K), Z_{AE}, Z_{AK})] \quad (۶)$$

ضریب  $K2$  بین ۱.۱ تا ۱.۳ در نظر گرفته می شود. مقدار ماکزیمم امپدانس تنظیمی نیز از آنجا ناشی می شود که ناحیه سوم رله نباید با نواحی سوم رله های  $F$  و  $J$  (شکل ۱) تلاقی داشته باشد.

نکته قابل توجه آن است که در این طرح دیستانس از یک رله دیستانس هم برای حفاظت اصلی و هم پشتیبان استفاده گردید. در صورتی که طرح دیفرانسیل برای پشتیبانی محتاج رله های اضافی دیگر است.

### ۳- شبیه سازی

جهت تحلیل عملکرد روش پیشنهادی، سیستم قدرت  $400\text{ kV}$  و  $50\text{ Hz}$  (شکل ۴ با  $AD=100$ ,  $BD=110$ ,  $CD=200$  و  $FG=120$ ,  $HE=50$ ,  $JK=30$  کیلومتر) با نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی شده است.



شکل ۴: سیستم قدرت با خط سه پایانه شبیه سازی شده

به ازای خط در نقاط مختلف نتایج حاصله در جدول ۱ و ۲ آمده است. دقت کنید که در خط هایی که در نقاط مختلف در خط سه پایانه ایجاد شده، همه رله های پایانه ها نتایج یکسانی را به دست آورده اند. نتایج حاصله صحت روش ارائه شده برای حفاظت خط در خط های داخلی را تایید می کند.

فعال می شود، برای خطای مشابهی در نقطه  $Q$  هم به همین ترتیب است. ولی تغییر ولتاژ  $Vy$  برای خطای تک فاز که در نقطه  $P$  به خطای دو فاز تبدیل شود، کوچکتر از تغییر ولتاژ  $Vy$  حالت مشابه در نقطه  $Q$  است. از این تغییر ولتاژ  $Vy$  برای خنثی کردن مدار مکمل استفاده می گردد. اگر این تغییر ولتاژ زیاد باشد مدار مکمل شکل ۳ خنثی می شود، یا کنتاکت  $Z_2$  در شکل ۳ باز می شود. در این صورت این مدار مکمل برای خطاهای خارجی در نقطه  $Q$  عمل نمی کند.

حالت دیگر آن است که خطای تکفاز در نقطه  $Q$  قبل از عملکرد  $F$  توسط رله  $G$  در شکل ۲ دیده شود و رله  $G$  قبل از رله  $F$  عمل کند. در این حالت نیز جریان توالی صفر از دید رله  $A$  تغییر می کند و مدار مکمل بکار می افتد. ولی ولتاژ  $Vy$  هم تغییر می کند و از عملکرد نابجای رله  $A$  بازای مدار مکمل شکل ۳ جلوگیری می شود.

به این ترتیب رله  $A$  هر خطای داخلی در خط سه پایانه را بدون استفاده از کانالهای مخابراتی تشخیص می دهد. تنظیم دو رله  $B$  و  $C$  به همین ترتیب می باشد. طرح ارائه شده شبیه طرح Succession (قطع بدون ارسال سیگنال HF) در خط دو پایانه است [۹]. به این ترتیب هر رله تمامی اتصال کوتاه های داخلی را بر روی خط سه پایانه تشخیص می دهد، بدون اینکه دچار اشتباهات طرح های دیستانس دیگر که در این خطوط عنوان شده [۲ و ۳] شود، ضمن اینکه نیاز به مدارهای مخابراتی و یا اطلاعات پیش از خطا نیست [۴ و ۵].

### ۲-۲- تنظیم ناحیه دوم و سوم رله دیستانس هر پایانه

خط: تنظیم ناحیه دوم و سوم رله های دیستانس در این طرح پیشنهادی، مثل مرجع [۸] است. در مرجع [۸] تنظیم ناحیه دوم از رابطه زیر بدست می آید:

$$Z_{2A} = K1 * [\max(Z_A(B), Z_A(C), Z_{AB}, Z_{AC})] \quad (۵)$$

در رابطه (۵)  $K1$  برابر ۱.۱ تا ۱.۳ است. با رابطه (۵) ناحیه دوم رله نیز با هیچیک از رله های خطوط مجاور تلاقی یا عدم هماهنگی ندارد، حالات مختلف ممکن و بررسی ناحیه تنظیمی مورد در مرجع [۸] به طور کامل توصیف شده است.

با بررسی های حالات مختلف مرجع [۸] تنظیم ناحیه سوم را

### مراجع

- [۱] طهماسب‌قلی شاهرخ‌شاهی، "حفاظت الکتريکی و رله‌های حفاظتی خطوط انتقال انرژی"، تهران: دنيا، ۱۳۸۳.
- [۲] G.E. Alexander and J.G. Andrichakand, "Application of Phase and Ground Distance Relays to Three Terminal Lines", *GE Power Management*, GER 3964.
- [۳] J.S. Daniel, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, "Three Terminal Line Protection Based on a Superimposed Component Impedance Relay", *IEE PROCEEDINGS-C*, Vol. 140, No.6. p.p.447-454, 1993.
- [۴] D.V. Coury, J.S. Thorp, K.M. Hopkinson, K.P. Birman, "Agent Technology Applied to Adaptive Relay Setting for Multi-Terminal Lines", *Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE2000*, Vol. 2, p.p. 1196-1201, 2000.
- [۵] M.G. Adamiak, W. Premerlan and G. E. Alexander, "A New Approach to Current Differential Protection for Transmission Lines", *GE Power Management*, GER 3981, 1998.
- [۶] M.M. Eissa, "A New Digital Relaying Scheme for EHV Three Terminal Transmission Lines", *Electric Power Systems Research*, Vol. 73, p.p. 107-112, 2005.
- [۷] A.P. Apostolov, "Universal Transmission Line Protection Intelligent Electronic Devices", *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*, Vol. 2, p.p. 693-698, 2001.
- [۸] علی‌محمد رنجبر و محمدرضا رکوعی، "هماهنگی رله‌های دیستانس با کامپیوتر"، نشریه علمی و فنی برق ۴، ۱۳۶۸.
- [۹] C. Deshu, L. Pei, P. Hua, G.S. Hope and O.P. Malik, "Scheme for Accelerated Trip for Faults in the Second Zone of Protection of a Transmission Line", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, 1989.

جدول ۱: ناحیه تشخیصی رله در خطا روی خط AD و BD خط سه پایانه

Dist. From A to F2(km)	Incep. Angle(o)	fault resistance (ohm )	Relay A	Relay B	Relay C
			Zone	Zone	Zone
20	0	20	Z1	Z1	Z1
45	0	100	Z1	Z1	Z1
50	90	25	Z1	Z1	Z1
70	90	110	Z1	Z1	Z1
100	45	50	Z1	Z1	Z1
Dist. From C to F5(km)	Incep. Angle(o)	fault resistance (ohm )	Relay A	Relay B	Relay C
			Zone	Zone	Zone
20	0	10	Z1	Z1	Z1
50	0	110	Z1	Z1	Z1
90	90	85	Z1	Z1	Z1
130	90	30	Z1	Z1	Z1
175	45	57	Z1	Z1	Z1
200	45	150	Z1	Z1	Z1

جدول ۲: ناحیه تشخیصی رله در خطا روی خط CD و FG خط سه پایانه

Dist. From B to F3(km)	Incep. Angle(o)	fault resistance (ohm )	Relay A	Relay B	Relay C
			Zone	Zone	Zone
10	0	25	Z1	Z1	Z1
35	0	80	Z1	Z1	Z1
50	90	35	Z1	Z1	Z1
75	45	100	Z1	Z1	Z1
110	45	75	Z1	Z1	Z1
Dist. From F to F4(km)	Incep. Angle(o)	fault resistance (ohm )	Relay A	Relay B	Relay C
			Zone	Zone	Zone
10	0	12	Z2	--	Z2
25	0	90	Z2	--	Z2
50	90	30	Z2	--	Z2
75	90	110	Z2	--	Z3
90	45	20	Z3	--	Z3
115	45	105	Z3	--	Z3

برای خطا در نقاط  $F_1, F_6$  نیز نتایج قابل قبولی به دست آمده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طرح حفاظت دیستانس جدیدی با توجه به روش Succession در خطوط انتقال سه پایانه پیشنهاد شده، که حفاظت اصلی کاملی را برای خط بدون نیاز به کانالهای مخابراتی انجام می‌دهد. عدم وابستگی طرح پیشنهادی به تجهیزات انتقال اطلاعات در پایانه‌ها قابل توجه است. طرح پیشنهادی در یک سیستم قدرت با یک خط انتقال سه پایانه با نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصله صحت ادعای الگوریتم پیشنهادی را تایید می‌کند. در این طرح برای پشتیبانی از حفاظتهای دیگر استفاده نشده، و طرح پیشنهادی برای پشتیبانی به حفاظت دیگر بر روی خط وابسته نیست.