



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 16, No. 02, 2025
pp. 101- 116
Research Paper

Design and Implementation of Correct Operation of Transmission Line Distance Relay in the Presence of SVC under Asymmetrical Faults in Power Systems without Utilizing Communication Systems

Saeed Abazari ^{*1}, Abbas Marefat ²

¹ Dept. of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

² Dept. of Engineering, University of Sharekord, Shahrekord, Iran

Abstract:

This paper addresses the design and implementation of correct distance relay operation for transmission lines during single-phase asymmetric faults in the presence of SVC. The method used is based on utilizing negative, positive, and zero sequence currents to detect the effect of the Static Var Compensator during single-phase fault occurrence, without relying on costly communication systems. The importance of this method lies in its low cost, independence from remote devices and relays at the distance relay installation site, the elimination of noise effects, and the prevention of cyberattacks that are typically probable in communication systems and can disrupt the correct operation of distance relays. This method has been practically implemented with internal circuits in the Siemens 7SA522 distance relay configuration. Simulation results and practical relay testing using relay test equipment demonstrate the effectiveness of the proposed method for correct distance relay operation in power systems with SVC, without the use of remote equipment and communication systems.

Keywords: Static Var Compensator, Distance relay, Asymmetrical components.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/isee.2025.146151.1756>

مقاله پژوهشی

طراحی و اجرای عملکرد صحیح رله دیستانس خط انتقال در حضور SVC با بروز خطای

نامتقارن در سیستم قدرت بدون بهره‌گیری از سیستم مخابراتی

سعید اباذری^۱، عباس معرفت^۲

۱- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

abazari-s@eng.sku.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

abmarefat@chmail.ir

چکیده: در این مقاله، عملکرد صحیح رله دیستانس خط انتقال هنگام رخداد خطای نامتقارن تک‌فاز در حضور SVC طراحی و اجرا می‌شود. روش به‌کاررفته مبتنی بر بهره‌گیری از جریان‌های توالی مثبت، منفی و صفر است که می‌تواند اثر جبران‌ساز توان راکتیو استاتیک را هنگام بروز خطای تک‌فاز بدون استفاده از سیستم‌های مخابراتی با هزینه زیاد تشخیص دهد. اهمیت این روش در کاهش هزینه، عدم وابستگی به دستگاه‌های اضافی، از بین بردن اثرات نویز و بروز حملات سایبری است که معمولاً احتمال وجود آن در سیستم‌های مخابراتی زیاد است و می‌تواند عملکرد صحیح رله دیستانس را دچار اختلال کند. این روش به صورت عملی با مدارهای داخلی در پیکربندی رله دیستانس زیمنس SA522V اجرا شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون عملی رله با دستگاه تست رله کارایی روش به‌کاررفته را در عملکرد صحیح رله دیستانس در سیستم قدرت با وجود SVC، بدون بهره‌گیری از تجهیزات دوردست و سیستم مخابراتی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: جبران‌ساز توان راکتیو استاتیک، رله دیستانس، مؤلفه‌های نامتقارن.

۱- مقدمه

امروزه با افزایش رشد مصرف انرژی الکتریکی و عدم امکان گسترش خطوط انتقال به دلیل محدودیت زمین، نیاز به افزایش ظرفیت توان انتقالی که به دلایل مسائل عایقی و حرارتی و پایداری به صورت معمولی نمی‌توان از ظرفیت بالقوه این خطوط استفاده کرد، بیش از هر زمان احساس می‌شود. یکی از روش‌های معمول افزایش ظرفیت توان انتقالی خطوط بهره‌گیری از سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر

AC (FACTS)^۱ است [۱]. یکی از این تجهیزات جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو (SVC^۲) است که برای تنظیم دینامیکی ولتاژ و جبران توان راکتیو و اصلاح ضریب قدرت و افزایش توان انتقالی خطوط به کار می‌رود. این تجهیز مبتنی بر استفاده از سویچ‌های الکترونیک قدرت و عناصر پسیو است [۲]. کاربرد این تجهیز، با وجود مزایای فراوانی که دارد، مشکلاتی مانند تریق هارمونیک به شبکه و اختلال در عملکرد صحیح رله‌های حفاظتی را ایجاد می‌کند [۳]. در اثر بروز اتصال کوتاه نامتقارن ت فاز به زمین با وجود SVC، رله دیستانس در تشخیص محل خطا دچار خطا می‌شود [۴، ۵]. این مشکل حفاظت سیستم قدرت را دچار چالش بزرگی می‌کند؛ بنابراین، برطرف کردن این اشکال ضرورت پیدا می‌کند. در این زمینه، فعالیت‌هایی انجام شده‌اند که به‌اختصار بیان می‌شوند. یکی از این

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

نام نویسنده مسئول: سعید اباذری

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی

این مقاله ابتدا SVC و رله دیستانس عددی^۶ را معرفی می‌کند. سپس، نحوه محاسبه جریان توالی‌ها و محاسبه امپدانس توالی‌ها و روندنمای روش به‌کاررفته و در نهایت، نتایج شبیه‌سازی و آزمون عملی ارائه می‌شود.

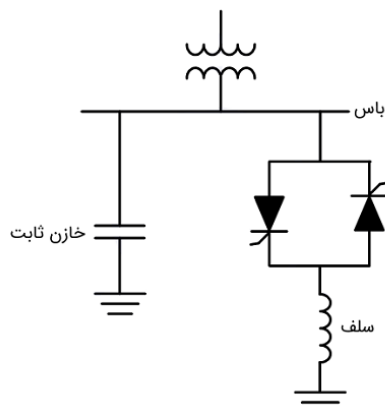
۲- معرفی SVC و رله دیستانس و بررسی

مشکلات کاربرد توأم این دو

در این بخش، ابتدا SVC و رله دیستانس عددی مدرن معرفی می‌شود. سپس عملکرد توأم این دو بررسی می‌شود.

۲-۱- جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو (SVC)

یکی از تجهیزات FACTS که می‌تواند در توان انتقالی خطوط مؤثر باشد SVC است. SVC به صورت یک بانک خازنی ثابت به طور موازی مطابق شکل (۱) با سلف کنترل‌شده با تریستور متصل می‌شود. زاویه آتش تریستور راکتور و در نتیجه، ولتاژ سلف را کنترل می‌کند. بنابراین، توان دریافت‌شده توسط سلف قابل کنترل است.



شکل (۱): جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو (SVC)

SVC برای بهبود ضریب توان، تنظیم ولتاژ و پایداری شبکه انتقال استفاده می‌شود. این تجهیز همچنین در صنایع برای کنترل توان راکتیو و بهبود کیفیت توان به کار می‌رود.

۲-۲- معرفی رله حفاظتی دیستانس عددی

رله دیستانس^۷ یکی از مهم‌ترین تجهیزات حفاظتی در شبکه‌های انتقال قدرت است که به طور ویژه برای حفاظت

روش‌ها بهره‌گیری از حفاظت تطبیقی است که تنظیمات رله را بر اساس شرایط واقعی سیستم و عملکرد SVC به صورت پویا تنظیم می‌کند. روش حفاظت تطبیقی، با وجود عملکرد مناسب، دارای هزینه زیاد است. به علاوه، نیاز به استفاده از سیستم مخابراتی در این روش باعث افزایش خطرات حمله سایبری می‌شود [۶]. راهکار دیگر، روش‌های مبتنی بر واحد اندازه‌گیری فاز (PMU^۳) است که در آن، از اندازه‌گیری‌های هم‌زمان چند نقطه‌ای بهره می‌گیرند تا دقت مکان‌یابی خطا را افزایش دهند و از عملکرد نادرست ناشی از SVC جلوگیری کنند [۷]. مزیت آن عملکرد خوب و بدون خطای رله دیستانس است و عیب آن هزینه زیاد PMU است. در مطالعه‌ای دیگر، از تکنیک‌هایی مانند بردارهای فضایی (SVM^۴) و الگوریتم ژنتیک (GA^۵) برای تشخیص دقیق ناحیه خطا و بهینه‌سازی تنظیمات رله در حضور SVC استفاده شده است [۸]. مزیت آن عملکرد خوب، ولی عیب آن دشواری در دست آوردن الگوریتم مناسب و ثابت است. یکی دیگر از روش‌ها، استفاده از رله اتصال زمین خروجی ترانسفورماتور تزویج SVC است که در موقع عبور جریان زمین از خروجی این ترانس، این رله عمل و SVC را از مدار خارج می‌کند که ایراد مهم این روش عدم هماهنگی بین رله‌ها هنگام بروز اتصال کوتاه تک‌فاز در خطوط دیگری است که می‌تواند از این محل هم تغذیه شوند [۹، ۱۰]. مطابق طرح حفاظتی و تحلیل و شبیه‌سازی ارائه‌شده در این مراجع، تأثیر SVC بر امپدانس محاسبه‌شده توسط رله فقط برای خطاهای تک‌فاز به زمین قابل استفاده است. این روش دارای کارایی خوب، ولی کاربرد آن همراه با تأخیر زمانی در عملکرد است.

در این مقاله، با محاسبه جریان‌های توالی‌ها در اثر اتصال کوتاه تک‌فاز با زمین با وجود SVC روشی ارائه می‌شود که بدون استفاده از سیستم‌های مخابراتی عملکرد صحیح رله دیستانس را تضمین و علاوه بر کاهش هزینه‌ها، سیستم قدرت را از حملات سایبری و نویز محافظت می‌کند. این روش به صورت عملی با مدارهای داخلی در پیکربندی رله دیستانس زیمنس 7SA522 اجرا می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمون عملی کارایی این روش را نشان می‌دهد.

۲-۳- مشکلات عملکرد رله دیستانس با وجود

SVC

در شکل (۱)، با توجه به اینکه معمولاً اتصال ترانسفورماتور تزویج^{۱۶} SVC دارای اتصال ستاره زمین شده در اولیه (فشار قوی) و اتصال مثلث در ثانویه (فشار ضعیف) است (Ynd)، در اتصال کوتاه تک فاز به زمین جریان های توالی صفر در سیم پیچ های مثلث می چرخند و از اتصال مثلث عبور نمی کنند [۹].

معمولاً SVC در نقاط میانی خط انتقال قرار می گیرد و این امر باعث می شود مسیرهای جریان خطا تغییر یابند و برای خطاهای بعد از محل SVC، تجهیز جریان راکتیو تزریق کند؛ بنابراین، امپدانس ملاحظه شده توسط رله های بالاتر دچار خطای محاسباتی می شود.

اگر محل خطا قبل از محل SVC باشد، تغییر چندانی در امپدانس اندازه گیری شده رله دیستانس و امپدانس واقعی وجود ندارد. همچنین، اگر SVC خارج از مدار باشد، در تمام حالات اتصال کوتاه امپدانس محاسبه شده توسط رله دیستانس برابر امپدانس واقعی است و رله خطایی در تشخیص محل خطا ندارد.

در شرایط عادی، SVC تأثیر کمی بر جریان توالی منفی دارد، زیرا هدف آن حفظ تعادل ولتاژ است. اما در شرایط خطا، به ویژه خطاهای نامتقارن، رفتار SVC می تواند بر جریان توالی منفی تأثیر بگذارد. SVC در پاسخ به تغییرات ولتاژ ناشی از خطا، جریان تزریق می کند. اگرچه SVC به طور مستقیم برای تولید جریان توالی منفی طراحی نشده است، به دلیل ماهیت پاسخ خود در شرایط نامتعادل، می تواند بر توزیع جریان های توالی منفی در شبکه تأثیر بگذارد. این تأثیر به محل SVC، نوع خطا و حالت عملکرد SVC (خازنی یا سلفی) بستگی دارد.

تغییر در جریان های توالی منفی و توالی صفر ناشی از حضور SVC، باعث می شود رله های دیستانس با توجه به اندازه گیری های ولتاژ و جریان، امپدانس محاسبه شده را زیاده تر از امپدانس واقعی نشان دهند که به آن کاهش برد می گویند. همچنین، رله، به جای تشخیص اتصالی در ناحیه اول، آن را به ناحیه دوم منتقل می کند و باعث می شود اتصالی، مدت زمانی برابر زمان تنظیمی ناحیه دوم رله

خطوط انتقال در برابر اتصال کوتاه و خطاهای الکتریکی استفاده می شود. مبنای عملکرد این رله مبتنی بر محاسبه امپدانس ظاهری خط است؛ به این صورت که در صورت کمترین بودن امپدانس اندازه گیری شده نسبت به مقدار تنظیمی، رله خطا را در محدوده حفاظتی تشخیص می دهد و فرمان قطع صادر می کند [۱۱]. ویژگی اصلی رله دیستانس این است که برخلاف رله های اضافه جریان، عملکرد آن وابسته به سطح جریان یا ولتاژ خط نیست و اساس آن طول خط انتقال است. این ویژگی باعث می شود حفاظت خطوط بلند با دقت و هماهنگی بهتری انجام شود [۱۲]. نواحی حفاظتی^۸ آن به این صورت است که ناحیه اول^۹ حدود ۸۰-۹۰ درصد طول خط را پوشش می دهد و دارای عملکرد آنی است. ناحیه دوم^{۱۰} باقی مانده خط و بخشی از خط بعدی با تأخیر زمانی و ناحیه سوم^{۱۱} حفاظت پشتیبان برای خطوط و تجهیزات مجاور با تأخیر بیشتر را پوشش می دهد. در نهایت، ناحیه چهارم^{۱۲} که در رله های عددی مدرن دارای قابلیت پیکربندی و دربرگیرنده جهت معکوس است، به عنوان پشتیبان برای خطاهای باس بار یا خطای معکوس بسیار نزدیک به شین به کار می رود [۱۳، ۱۴]. قابلیت پیکربندی و نوشتن منطق حفاظتی رله های عددی مدرن علاوه بر تنظیم پذیری گسترده، امکان برنامه نویسی منطق حفاظتی^{۱۳} را نیز فراهم می کند [۱۵]. این قابلیت باعث می شود مهندس حفاظت بتواند رفتار رله را متناسب با شرایط شبکه تغییر دهد. نمونه ای از این قابلیت ها تعریف شرط های ترکیبی بین سیگنال های حفاظتی، ایجاد قفل کننده ها^{۱۴} یا آزاد کننده ها^{۱۵} برای هماهنگی حفاظتی، طراحی طرح های مخابراتی مانند Permissive Trip یا Direct Transfer Trip، ترکیب عملکرد رله دیستانس با سایر حفاظت ها مانند زمین، ولتاژ کم یا قطع اضطراری و تبادل سیگنال های منطقی با سیستم SCADA و IEC61850 است. به این ترتیب، رله دیستانس مدرن فقط یک تجهیز سخت افزاری نیست، بلکه یک بستر نرم افزاری قابل برنامه ریزی است که می تواند حفاظت و کنترل شبکه را با انعطاف پذیری زیاد پشتیبانی کند [۱۶].

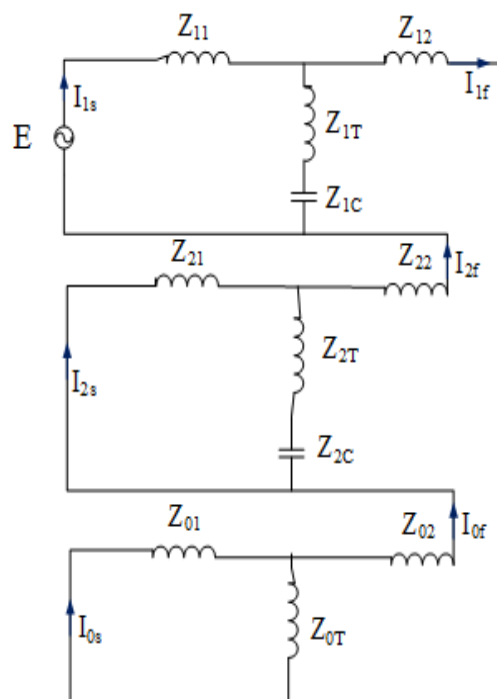
که در آن:

$$I_{phase} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, \quad I_{seq} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix},$$

$$A^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

به صورتی که $a = 1\angle 120^\circ$ و $a^2 = 1\angle 240^\circ$ به ازای طول خط، امپدانس توالی مثبت و منفی برابر و به صورت $X_1 = Z_1 = R_1 + jX_1$ است که در آن R_1 مقاومت و X_1 راکتانس توالی مثبت خط است. امپدانس توالی صفر $Z_0 = R_0 + jX_0$ برحسب مقاومت‌های زمین‌شدگی هادی‌ها و اندوکتانس فاز به زمین تعیین می‌شود. اکنون یک خط انتقال به همراه SVC در حین یک اتصال کوتاه تک‌فاز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مبانی سیستم قدرت برای محاسبات جریان‌ها و ولتاژ توالی‌ها، می‌توان سیستم را به صورت مدار معادل سری سه توالی مطابق شکل (۲) نمایش داد [۱۹].



شکل (۲): مدار شبکه مورد مطالعه برای اتصال تک‌فاز

دیستانس (400 msec) داشته باشد که این تأخیر زمانی می‌تواند باعث آسیب به تجهیزات و ناپایداری سیستم قدرت شود. در خطاهای فاز به فاز، انحرافات امپدانس بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر هستند [۱۷، ۱۸]. حال، هدف این است که با روش ارائه‌شده این خطای محاسباتی برطرف شود تا رله دیستانس بتواند عملکردی صحیح داشته باشد. برای این منظور، در ادامه مسئله به زبان ریاضی بیان می‌شود.

۳- روابط و محاسبات جریان و امپدانس

اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین

با بروز اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین، طبق قضیه فورسکیو، می‌توان سیستم سه‌فاز نامتعادل را به سه سیستم سه‌فاز متعادل تقسیم کرد. به عبارت دیگر، سیستم سه‌فاز a, b, c به سه سیستم توالی مثبت و منفی و صفر تبدیل می‌شود. بر این اساس، در روش مؤلفه‌های متقارن، بردارهای ولتاژ یا جریان فاز V_a, V_b, V_c و I_a, I_b, I_c به سه مؤلفه توالی صفر (V_0, I_0) ، توالی مثبت (V_1, I_1) و توالی منفی (V_2, I_2) تبدیل می‌شوند [۱۹]. توالی مثبت نشان‌دهنده جریان و ولتاژ متعادل در حالت عملکرد عادی سیستم است و توالی فازهای آن (ABC) مشابه توالی فازهای سیستم اصلی است. توالی منفی نشان‌دهنده عدم تعادل در سیستم است و توالی فازهای آن (CBA) برعکس توالی فازهای توالی مثبت است. توالی صفر در شرایطی که جریان یا ولتاژ در هر سه فاز دارای مقدار و زاویه فاز یکسان نباشند، وجود دارد و معمولاً در خطاهایی که شامل زمین هستند (مانند خطای تک‌فاز به زمین) ظاهر می‌شود. هنگامی که سیستم سه‌فاز در حالت متعادل کار می‌کند (مانند عملکرد عادی یک ژنراتور)، جریان توالی منفی در آن صفر است. اما با بروز عدم تعادل (مانند خطاهای نامتقارن، بارهای نامتعادل، یا ترانسپوزنشدن خط انتقال) جریان توالی منفی جالب توجهی در سیستم ظاهر می‌شود. بر این اساس، می‌توان روابط ماتریسی این تبدیلات را به صورت روابط (۱) و (۲) بیان کرد:

$$V_{phase} = A * V_{seq} \quad \text{و} \quad V_{seq} = A^{-1} * V_{phase} \quad (1)$$

$$I_{phase} = A * I_{seq} \quad \text{و} \quad I_{seq} = A^{-1} * I_{phase} \quad (2)$$

که در آن:

Z_{11} : امپدانس توالی مثبت نیمه اول خط انتقال،

Z_{12} : امپدانس توالی مثبت بخش دوم خط انتقال،

Z_{1T} : امپدانس مثبت ترانسفورماتور کوپلینگ SVC،

Z_{1C} : امپدانس مثبت خازن SVC،

Z_{21} : امپدانس توالی منفی نیمه اول خط انتقال،

Z_{22} : امپدانس توالی منفی بخش دوم خط انتقال،

Z_{2T} : امپدانس منفی ترانسفورماتور کوپلینگ SVC،

Z_{2C} : پدانس منفی خازن SVC،

Z_{01} : امپدانس توالی صفر نیمه اول خط انتقال،

Z_{02} : امپدانس توالی صفر بخش دوم خط انتقال،

Z_{0T} : امپدانس صفر ترانسفورماتور کوپلینگ SVC،

I_{1s}, I_{2s}, I_{0s} : جریان توالی‌های منبع (محل نصب رله

دیستانس)،

I_{1f}, I_{2f}, I_{0f} : جریان توالی‌های محل اتصال کوتاه تک‌فاز

به زمین،

Z_{11}, Z_{22}, Z_{00} : امپدانس توالی مثبت، منفی و صفر خط

انتقال و

X : فاصله پریونیت خطا از محل رله است.

با توجه به شکل ارائه شده، می‌توان روابط زیر را استخراج

کرد:

$$Z_{11}=Z_{21}=0.5*Z_1, Z_{01}=0.5*Z_0 \quad (3)$$

$$Z_{12}=Z_{22}=(X-0.5)*Z_1, Z_{02}=(X-0.5)* \quad (4)$$

$$Z_{series} = (Z_{1T} + Z_{1C}) \parallel \left\{ \frac{Z_{12}}{Z_{01} * \frac{Z_{0T}}{Z_{01} + Z_{0T}} + Z_{02}} + \frac{Z_{21} * (Z_{2T} + Z_{2C})}{Z_{21} + (Z_{2T} + Z_{2C})} + Z_{22} \right\} \quad (5)$$

$$I_{1s} = \frac{E}{Z_{11} + Z_{series}} \quad (6)$$

$$I_{0f} = I_{1f} = I_{2f} = I_{1s} * \left(\frac{Z_{1T} + Z_{1C}}{Z_{1T} + Z_{2C} + Z_{series}} \right) \quad (7)$$

$$I_{2s} = I_{1f} * \left(\frac{Z_{2T} + Z_{2C}}{Z_{21} + Z_{2T} + Z_{2C}} \right) \quad (8)$$

$$I_{0s} = I_{1f} * \left(\frac{Z_{0T}}{Z_{01} + Z_{0T}} \right) \quad (9)$$

مثبت و منفی ترانسفورماتور کوپلینگ SVC در شکل (۲)

وجود نخواهند داشت؛ بنابراین، جریان‌های توالی مثبت،

منفی و صفر برابر و نسبت جریان‌های توالی که رله

دیستانس اندازه‌گیری می‌کند برابر ۱ می‌شود؛ به عبارت

دیگر، $I_{0s}/I_{1s}=I_{2s}/I_{1s}=I_{2s}/I_{0s}=1$.

در حالتی که خطای تک‌فاز به زمین در نیمه دوم خط

انتقال با حضور SVC باشد که در میانه خط نصب شده

است، نسبت‌های جریان‌های توالی که رله دیستانس

اندازه‌گیری می‌کنند به شرح زیر هستند: I_{0s}/I_{1s} (نسبت

جریان توالی صفر به مثبت) کمتر از ۱ (در حدود ۰/۵ الی

۰/۹) است؛ زیرا SVC باعث کاهش جریان توالی صفر در

محل رله می‌شود. همچنین، I_{2s}/I_{1s} (نسبت جریان توالی

منفی به مثبت) بیشتر از ۱ (در حدود ۱/۲۵ الی ۳) خواهد

بود؛ زیرا واکنش SVC در تنظیم توان راکتیو و ولتاژ موجب

افزایش جریان توالی منفی می‌شود. به علاوه، در این حالت،

I_{2s}/I_{0s} (نسبت جریان توالی منفی به صفر) باعث کاهش I_0

و افزایش I_2 می‌شود و این نسبت را بیشتر از یک می‌گرداند.

هر دو جریان توالی منفی و صفر و نسبت آنها را می‌توان از

مقادیر اندازه‌گیری شده یا شبیه‌سازی شده محاسبه کرد [۱۸،

۲۰].

حال در این بخش محاسبات امپدانس فازها بررسی

می‌شود. محاسبه امپدانس اتصال کوتاه‌های مختلف توسط

شش واحد اندازه‌گیری امپدانس انجام می‌شود که سه واحد

به صورت تک‌فاز به زمین و سه واحد به صورت دو فاز به

یکدیگر هستند که مطابق روابط (۱۰) تا (۱۵) بیان می‌شوند.

روابط (۱۰) تا (۱۲) معرف امپدانس فازهای a، b، c و زمین

هستند. روابط (۱۴) تا (۱۶) نیز امپدانس بین دو فاز را بیان

می‌کنند:

$$Z_a = \frac{Va}{Ia + k0 * I0} \quad (10)$$

$$Z_b = \frac{Vb}{Ib + k0 * I0} \quad (11)$$

$$Z_c = \frac{Vc}{Ic + k0 * I0} \quad (12)$$

k_0 ضریب جبران‌ساز جریان توالی صفر است که به

صورت رابطه (۱۳) بیان می‌شود:

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad (13)$$

در صورتی که SVC در شبکه وجود نداشته باشد،

امپدانس‌های مثبت و منفی SVC و امپدانس‌های صفر،

منطق اجرا شده به موازات فانکشن های رله عمل می کند و هیچ گونه تداخلی با عملکرد آنها ندارد و در صورت مهیا بودن شرایط، باعث حذف زمان ناحیه دوم رله دیستانس در اثر کاهش برد با توجه به وجود SVC می شود.

$$Z_{ab} = \frac{Va - Vb}{Ia - Ib} \quad (14)$$

$$Z_{bc} = \frac{Vb - Vc}{Ib - Ic} \quad (15)$$

$$Z_{ca} = \frac{Vc - Va}{Ic - Ia} \quad (16)$$

رابطه (۱۶) معرف k_0 ضریب جبران ساز جریان توالی

صفر است.

با توجه به روابط بیان شده، روش پیشنهادی برای عملکرد صحیح رله دیستانس در اثر اتصال کوتاه تک فاز به زمین مطابق قدم های زیر خلاصه می شود:

۱- اعمال اتصال کوتاه تک فاز به سیستم؛

۲- محاسبه جریان توالی ها و امپدانس فازها و بین فازها مطابق روابط (۶) تا (۱۶)؛

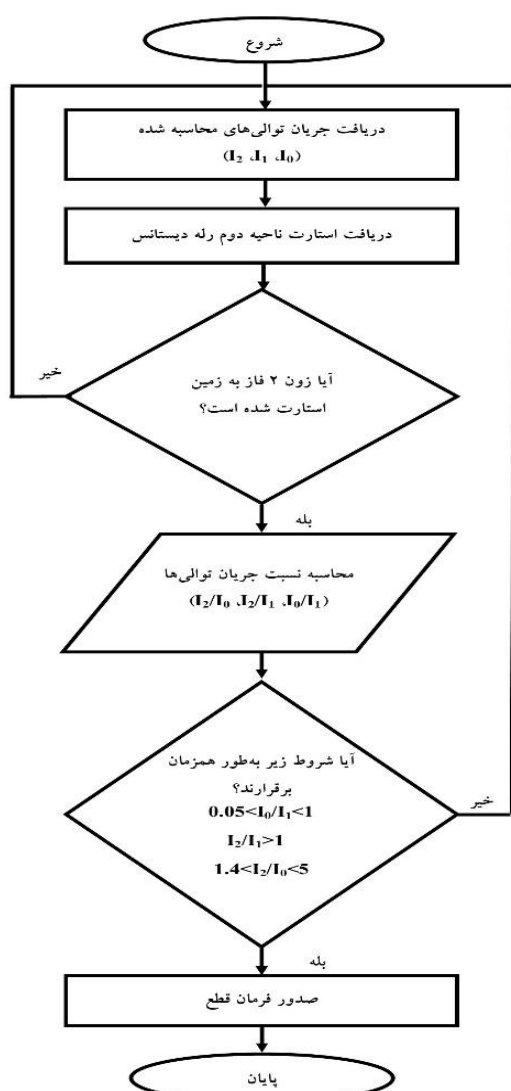
۳- محاسبه نسبت ها و برقراری هم زمان روابط زیر و استارت ناحیه دوم تک فاز به زمین.

$$0.04 < I_{0s}/I_{1s} < 1 \text{ و } 1 < I_{2s}/I_{1s} < 5 \text{ و } 1.4 < I_{2s}/I_{0s} < 5$$

حداقل جریان قابل تشخیص برای محاسبات رله های

حفاظتی بسیار مهم است؛ زیرا رله ها باید بتوانند جریان های غیرعادی و خطاهای کوچک را به سرعت و با دقت تشخیص دهند تا حفاظت مؤثر و جلوگیری از آسیب بیشتر به تجهیزات و شبکه قدرت انجام شود [۲۱، ۲۲]. این

حداقل جریان نشان دهنده حساسیت رله است و تعیین می کند رله از چه مقدار جریان به بالا باید فعال شود تا مدار معیوب را قطع کند. اگر حداقل جریان قابل تشخیص بسیار زیاد باشد، احتمال تشخیص خطاهای کوچک کمتر می شود و حفاظت ناکافی خواهد بود، و اگر بسیار کم باشد، ممکن است رله به جریان های ناپایدار یا نویز پاسخ دهد و باعث قطعی های ناخواسته شود. بنابراین، انتخاب یک حداقل جریان معقول ۵۰ میلی آمپر تعادلی بین حساسیت حفاظت و پایداری عملکرد رله را فراهم می کند تا هم خطاها به موقع تشخیص داده شوند و هم از قطع های بی دلیل جلوگیری شود [۱۵]. بر این اساس، روند نمای منطق اجرا شده مطابق شکل (۳) ارائه می شود.

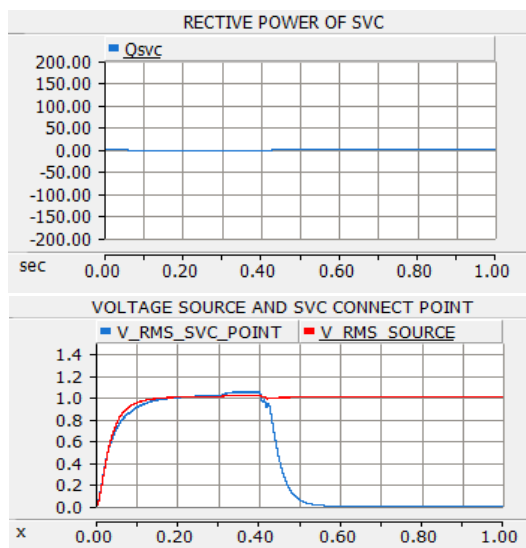


شکل (۳): روند نمای منطق اجرا شده

۴- شبیه سازی

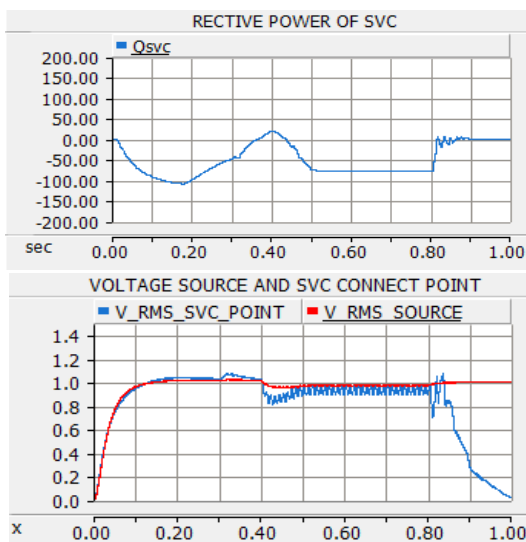
این بخش در سه قسمت تنظیم شده است: در بخش نخست، سیستم مورد مطالعه معرفی می شود؛ در بخش دوم، نتایج شبیه سازی ارائه می شود و در نهایت، نتایج عملی بررسی می شود.

دارند و همچنین مشاهده می‌شود جریان‌های خروجی SVC دارای اختلاف فازی بسیار کمتر از ۱۲۰ درجه می‌شوند.



شکل (۵): توان راکتیو، ولتاژ SVC و ولتاژ باس تولید در

حالت اتصال کوتاه فاز به زمین بدون SVC

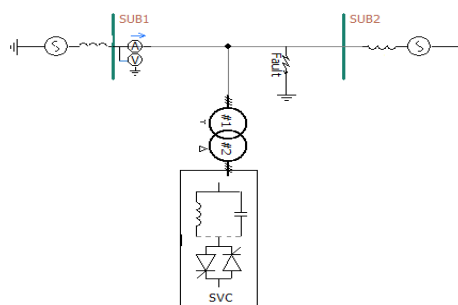


شکل (۶): توان راکتیو، ولتاژ SVC و ولتاژ باس تولید در

حالت اتصال کوتاه فاز به زمین با SVC

۱-۴- معرفی سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه مطابق شکل (۴) است که اطلاعات لازم در بخش ضمیمه ارائه شده است. این شبکه از یک خط انتقال و یک SVC تشکیل شده است که محل قرارگیری SVC در وسط خط است و این تجهیز با محل نصب رله ۱۲۵ کیلومتر فاصله دارد.



شکل (۴): نمودار تک‌خطی سیستم به کاررفته در شبیه‌سازی

۲-۴- نتایج شبیه‌سازی

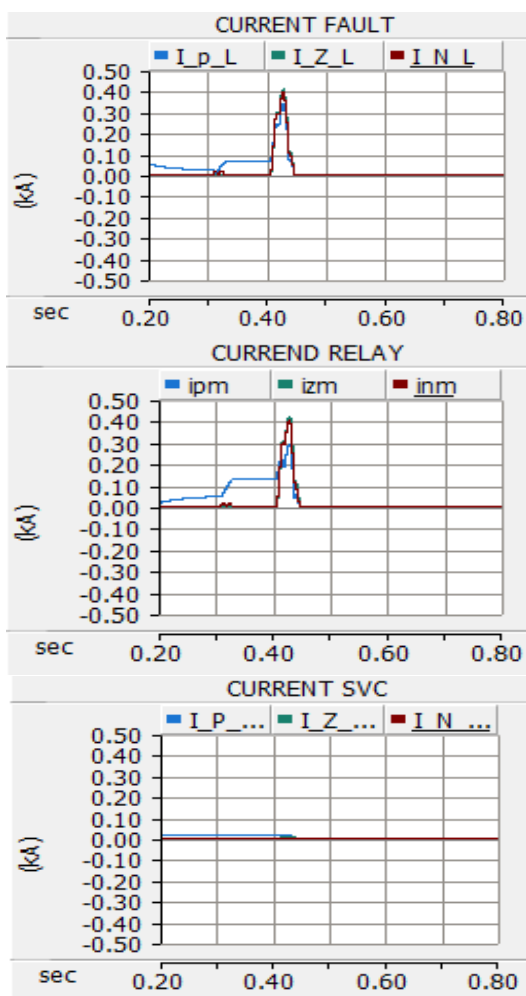
در شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه از نرم‌افزار PSCAD به همراه کدنویسی استفاده شده است. در مطالعه اول، اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین A-G در فاصله ۱۹۰ km از رله در زمان ۰/۴ ثانیه از یک ثانیه زمان شبیه‌سازی رخ می‌دهد؛ بنابراین، اختلال بعد از محل نصب SVC است.

با توجه به شکل (۵)، مشاهده می‌شود هنگامی که SVC در مدار نباشد، هیچ‌گونه تزریق توان راکتیو و تثبیت ولتاژی انجام نمی‌شود.

اما زمانی که SVC هنگام بروز خطا در شبکه باشد، مطابق شکل (۶)، مشاهده می‌شود هنگام بروز خطا خازن برای جبران توان راکتیو وارد مدار می‌شود و این امر باعث جلوگیری از کاهش شدید ولتاژ می‌شود.

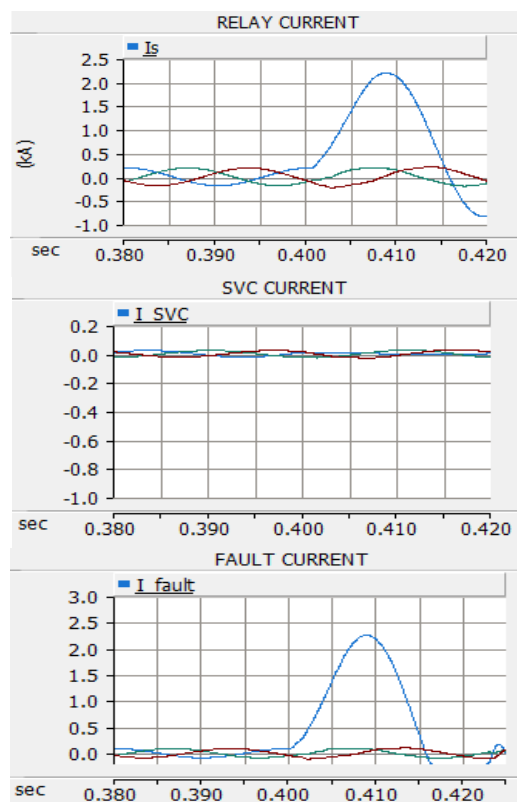
شکل (۷) جریان‌های سه فاز رله، SVC و جریان محل اتصال را نشان می‌دهد و شکل (۸) همین جریان‌ها را با وجود SVC نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود وقتی SVC در مدار نباشد، مقدار جریان‌های سمت رله و مقدار اتصال کوتاه هر دو تقریباً با هم برابر هستند، ولی وقتی SVC در مدار باشد، مقدار جریان محل اختلال و رله اختلاف زیادی

در شکل (۹)، جریان توالی‌ها بدون حضور SVC نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود جریان‌های توالی‌های مثبت، زمین و منفی هنگام اتصال کوتاه فاز به زمین در رله دیستانس و محل اتصال کوتاه و SVC مشابه هم هستند.

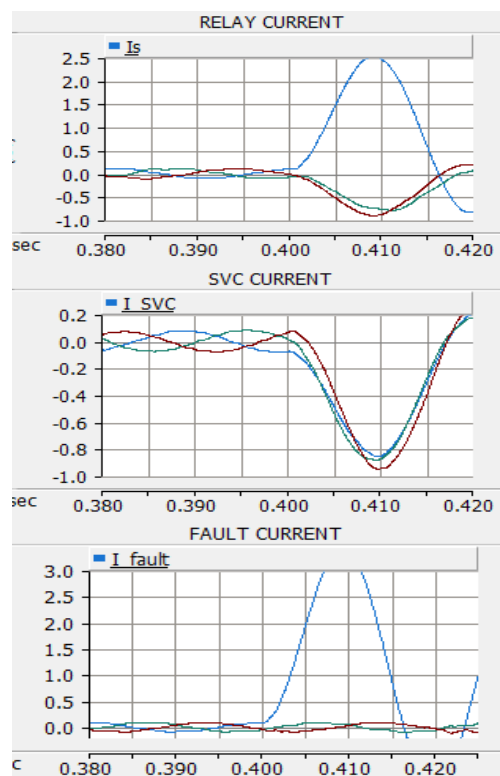


شکل (۹): نمودار جریان توالی‌های محل اتصال کوتاه فاز به زمین، رله دیستانس و SVC بدون مدار بودن SVC

با توجه به شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود در صورتی که SVC در مدار باشد، میزان تغییرات توالی‌های مثبت، منفی و صفر هنگام بروز اتصال کوتاه فاز به زمین در رله‌های دیستانس و محل اختلال، تفاوت زیادی با هم دارند. در محل اختلال، هر سه توالی جریان برابر هستند و در رله به ترتیب توالی منفی بیشتر از توالی مثبت و توالی مثبت بیشتر از توالی منفی جریان‌هاست. SVC توالی صفر بیشتر از

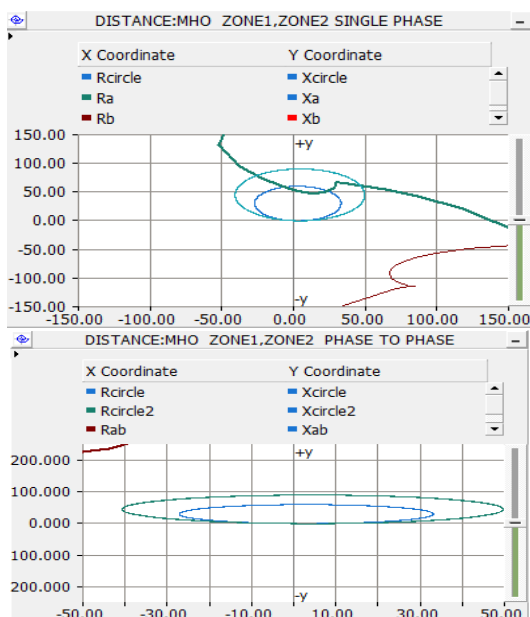


شکل (۷): نمودار جریان فازهای رله دیستانس، SVC و محل اتصال کوتاه فاز به زمین بدون SVC

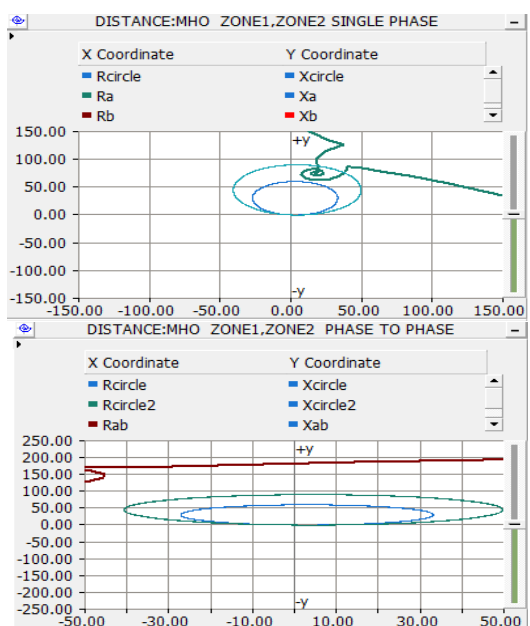


شکل (۸): نمودار جریان فازهای رله دیستانس، SVC و محل اتصال کوتاه فاز به زمین با SVC

توالی مثبت و توالی مثبت بیشتر از توالی منفی جریان‌ها را تزریق می‌کند.

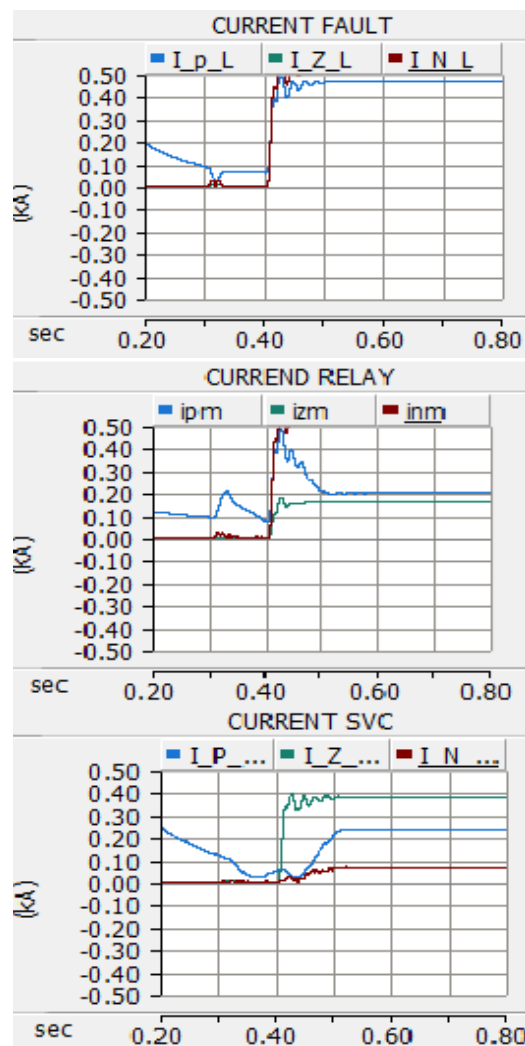


شکل (۱۱): خط سیر امپدانس رله دیستانس در حالت اتصال کوتاه فاز به زمین بدون SVC



شکل (۱۲): خط سیر امپدانس رله دیستانس در حالت اتصال کوتاه فاز به زمین با SVC بدون اعمال روش پیشنهادی

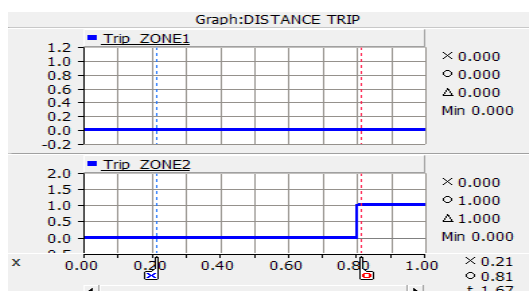
در شکل (۱۳)، مشاهده می‌شود با اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین با وجود SVC اعمال روش پیشنهادی با توجه به اینکه امپدانس اتصال کوتاه وارد ناحیه دوم می‌شود، تقریباً به



شکل (۱۰): نمودار جریان توالی‌های محل اتصال کوتاه فاز به زمین، رله دیستانس و SVC با در مدار بودن SVC

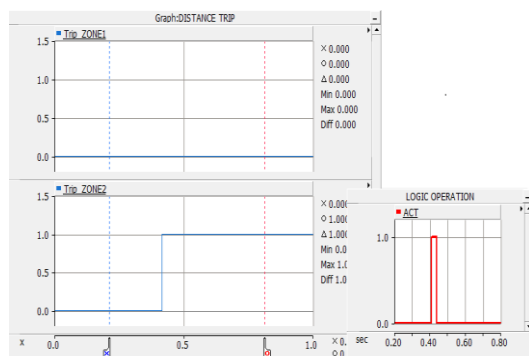
در همین حالت، عملکرد رله دیستانس با اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین، در حالتی که SVC در مدار نباشد، بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، رله دیستانس در ناحیه اول بدون تأخیر فرمان قطع می‌دهد. در شکل (۱۲)، مشاهده می‌شود اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین با وجود SVC، در حالتی که روش پیشنهادی اعمال نشود، به دلیل کاهش جریان توالی صفر، باعث می‌شود امپدانس اتصال کوتاه تک‌فاز به جای ناحیه اول وارد ناحیه دوم شود، یعنی رله کاهش برد می‌یابد و در این حالت، با

زمین با وجود SVC، در حالتی که روش پیشنهادی اعمال نشود، باعث می‌شود رله به جای اینکه در ناحیه اول عمل کند، در ناحیه دوم عمل کند؛ یعنی رله کاهش برد می‌یابد و در این حالت، با زمان ۴۰۰ میلی‌ثانیه بعد از وقوع اتصال کوتاه، فرمان قطع صادر می‌کند. (زمان وقوع اتصال کوتاه در زمان ۰/۸ ثانیه از یک ثانیه زمان شبیه‌سازی شده است، یعنی ۰/۴ ثانیه بعد از وقوع اتصال کوتاه فرمان قطع صادر شده است).



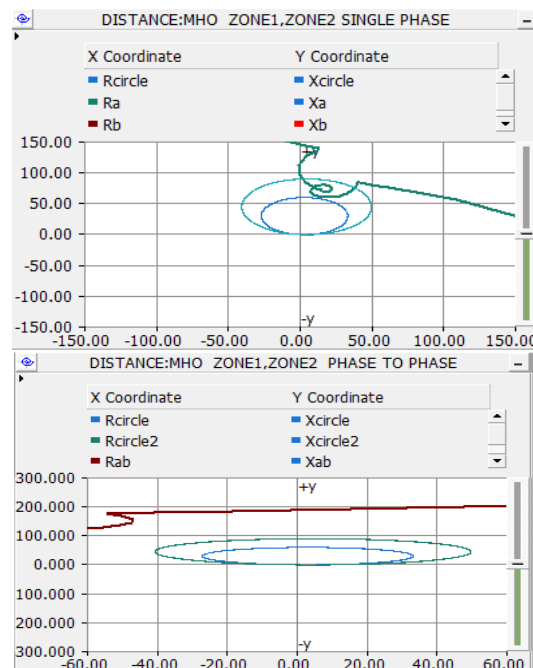
شکل (۱۵): فرمان قطع رله دیستانس برای نواحی اول و دوم در حالت اتصال کوتاه فاز به زمین با وجود SVC بدون اعمال روش پیشنهادی

در شکل (۱۶)، مشاهده می‌شود با اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین ب اوجود SVC، در حالتی که روش پیشنهادی اعمال شود، در زمان ۰/۴ ثانیه از یک ثانیه منطق اعمالی عملکرد دارد. رله در ناحیه اول به علت افزایش برد، عملکرد ندارد که این امر باعث می‌شود در ناحیه دوم با زمان آنی عمل کند؛ یعنی در این حالت، به جای سپری کردن زمان ۴۰۰ میلی‌ثانیه بعد از وقوع خطا، بلافاصله فرمان قطع صادر می‌کند.



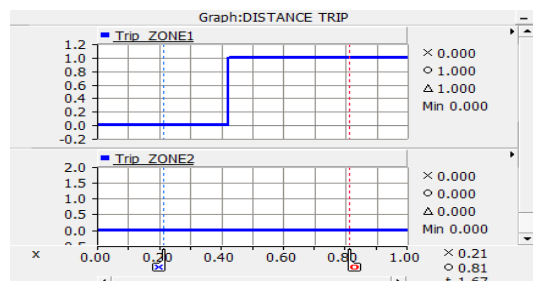
شکل (۱۶): نحوه فرمان قطع رله دیستانس برای نواحی اول و دوم و عملکرد منطق اجرا شده

صورت آنی فرمان قطع صادر می‌کند؛ به عبارت دیگر، زمان ناحیه دوم که ۴۰۰ میلی‌ثانیه است طی نمی‌شود.



شکل (۱۳): خط سیر امپدانس رله دیستانس در حالت اتصال کوتاه فاز به زمین با وجود SVC با اعمال روش پیشنهادی

در ادامه، زمان عملکرد رله بررسی می‌شود. در شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود با اتصال کوتاه فاز به زمین در ۱۹۰ کیلومتری خط و بدون SVC که اتصال کوتاه در زمان ۰/۴ ثانیه از یک ثانیه زمان شبیه‌سازی اتفاق می‌افتد، رله به‌درستی در ناحیه اول به صورت آنی فرمان قطع صادر می‌کند.



شکل (۱۴): فرمان قطع رله دیستانس برای نواحی اول و دوم در حالت اتصال کوتاه فاز به زمین بدون حضور SVC

در شکل (۱۵)، مشاهده می‌شود اتصال کوتاه تک‌فاز به

۳-۴- نتایج عملی اجرای روش پیشنهادی و

ارائه منطق پیشنهادی

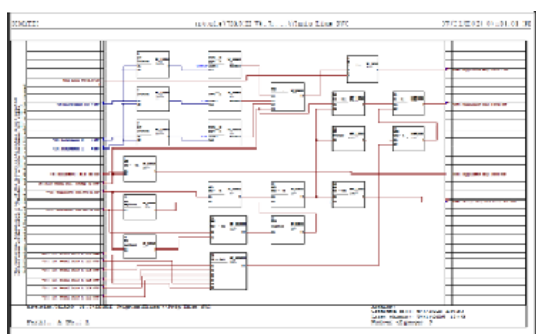
در این بخش، ابتدا در شکل (۱۷) تصویر عملی سیستم نمایش داده می‌شود. رله دیستانس استفاده شده برند زیمنس از نوع 7SA522 است که با دستگاه تست رله‌های حفاظتی وبکو تست شد. برای این منظور، ابتدا در نرم‌افزار شبیه‌سازی PSCAD شکل موج جریان و ولتاژ در مدت یک ثانیه شبیه‌سازی، از قالب COMTRADE Recorder با فرمت comtrade99، در قالب فایل‌هایی با پسوند dat و cfg ذخیره می‌شوند. سپس، این فایل‌ها در نرم‌افزار دستگاهی به نام Vebko AMProTest در قسمت AMT Sequencer و بعد از آن در قسمت State Type بخش Transient انتخاب می‌شوند و سپس از قسمت Comtrade file، فایل ایجاد شده توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی import می‌شود. بعد از تزریق جریان و ولت توسط دستگاه وبکو به رله، به منظور اتصال به رله و تنظیم و برداشت اطلاعات آن، از نرم‌افزار DIGSI که مربوط به تنظیمات و پیکربندی رله‌های زیمنس است استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار، از منوی oscillographic Records فایل‌های comtrade رله برداشت می‌شود. سپس، در نرم‌افزار SIGRA که مربوط به مشاهده فایل‌های ثبت خطا و وقایع (با پسوند dat و cfg) است، شکل موج ولت و جریان و عملکردهای رله قابل مشاهده است [۲۳، ۲۴].



شکل (۱۷): تصویر تست‌های عملی رله دیستانس

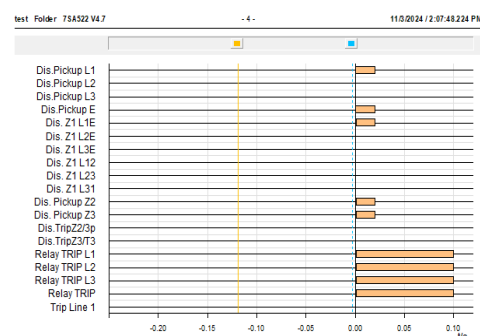
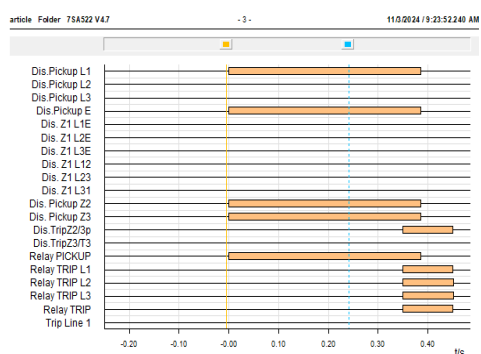
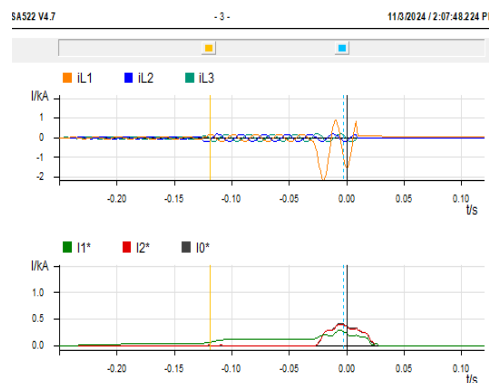
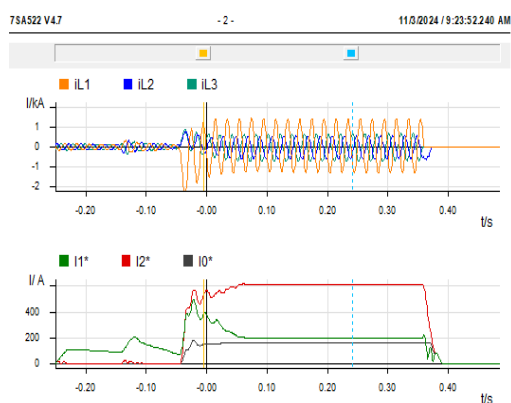
در شکل (۱۸)، اجرای منطق اعمالی به رله دیستانس مدل زیمنس نمایش داده می‌شود. در رله‌های حفاظتی زیمنس، زبان برنامه‌نویسی گرافیکی (CFC)^۱ استفاده

می‌شود که انواعی مختلف دارند و برای تعریف منطق سفارشی در رله، برنامه‌ریزی عملکردهای حفاظتی، کنترل و مانیتورینگ به کار می‌رود. این زبان به کاربر امکان می‌دهد ورودی‌ها، خروجی‌ها و توابع حفاظت را ترکیب و تنظیم کند تا به بهترین عملکرد حفاظتی دست یابد. اما از آنجا که در سطح نرم‌افزاری و افزوده بر فانکشن‌های اصلی اجرا می‌شوند، معمولاً زمان اجرای این توابع حفاظتی کمی بیشتر است. با این حال، زمان عملکرد برنامه‌های CFC همچنان در حد میلی‌ثانیه و برای بسیاری از کاربردها مناسب است، ولی عموماً کمی کندتر از فانکشن‌های حفاظتی استاندارد هستند [۲۵].



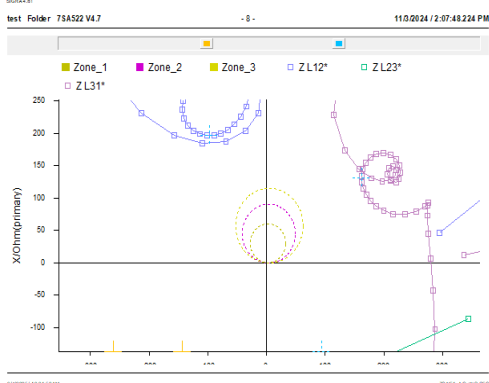
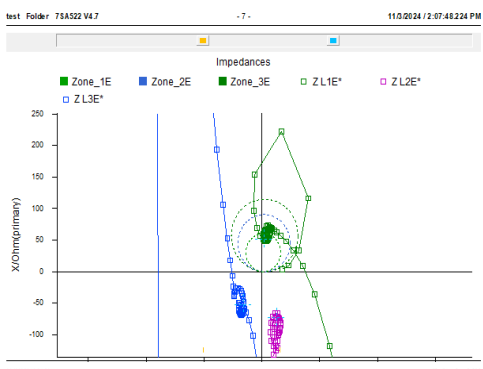
شکل (۱۸): منطق اجرا شده در CFC رله دیستانس 7SA522 شرکت زیمنس

شکل (۱۹) نمودار جریان‌های فازها و توالی‌ها همچنین ثبت وقایع رله دیستانس و زمان عملکرد رله دیستانس بدون وجود SVC در تست عملی در نرم‌افزار SIGRA را نشان می‌دهد که در آن، جریان توالی‌ها با هم برابر هستند و رله دیستانس فاز L1,E شروع به عملکرد می‌کند و ناحیه‌های دوم و سوم استارت می‌شوند و ناحیه اول فاز L1,E به صورت آنی فرمان قطع هر سه فاز را صادر کرده است که منطبق بر نتایج شبیه‌سازی است.



شکل (۲۰): نمودار جریان‌های فازها و توالی‌ها و عملکرد رله دیستانس در اتصال تک‌فاز به زمین با SVC در تست عملی

شکل (۱۹): نمودار جریان فازها و توالی‌ها و عملکرد رله دیستانس در اتصال تک‌فاز به زمین بدون حضور SVC در تست عملی

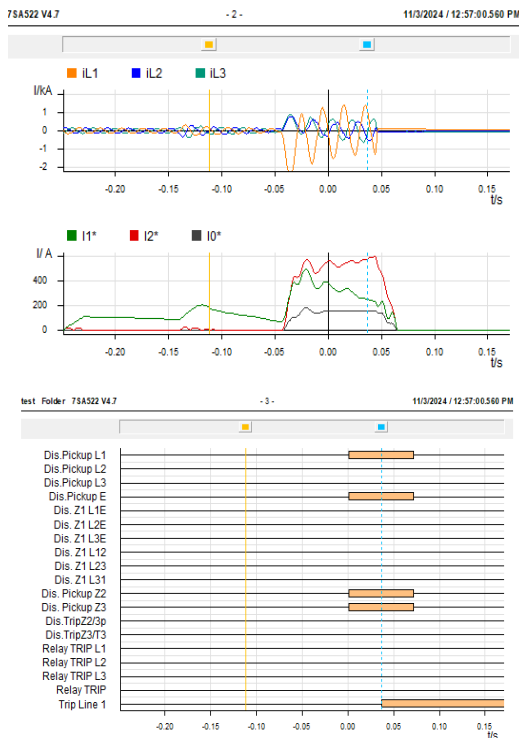


شکل (۲۱): خط سیر امپدانس رله دیستانس در اتصال کوتاه فاز به زمین بدون حضور SVC در تست عملی

شکل (۲۰) نمودار جریان‌های فازها و توالی‌ها و همچنین ثبت وقایع رله دیستانس و زمان عملکرد رله دیستانس با وجود SVC در تست عملی در نرم‌افزار SIGRA را نشان می‌دهد که در آن، جریان توالی منفی بیشتر از جریان توالی مثبت و جریان توالی صفر از همه کمتر است و رله دیستانس فاز L1,E شروع به عملکرد می‌کند و ناحیه‌های دوم و سوم استارت می‌شوند و ناحیه دوم فاز L1,E با زمان ۴۰۰ میلی‌ثانیه فرمان قطع هر سه فاز را صادر کرده است که منطبق بر نتایج شبیه‌سازی است.

شکل (۲۱) خط سیر امپدانس رله دیستانس در اتصال کوتاه فاز به زمین بدون وجود SVC در تست عملی در نرم‌افزار SIGRA را نشان می‌دهد که امپدانس فاز زمین (L1,E) وارد ناحیه اول شده است و امپدانس بقیه فازها و همچنین امپدانس‌های فاز به فاز داخل ناحیه‌های رله دیستانس نشده‌اند که منطبق بر نتایج شبیه‌سازی است.

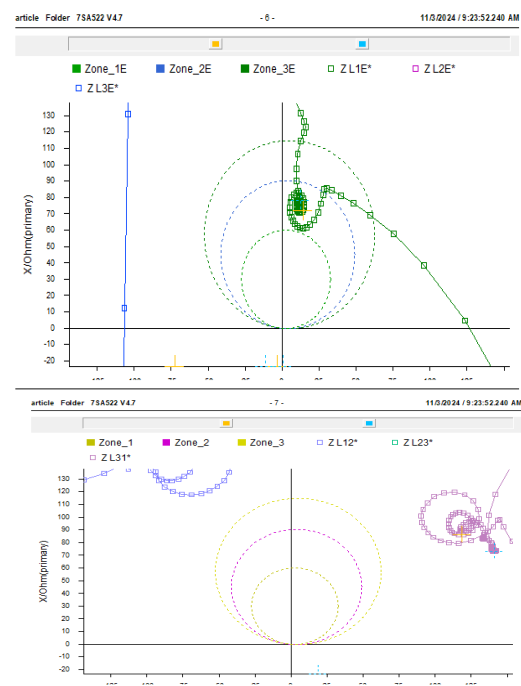
CFC است که عموماً کمی کندتر از فانکشن‌های حفاظتی استاندارد هستند. بنابراین، با این منطق، حدود ۳۶۰ میلی‌ثانیه زمان عملکرد رله دیستانس کمتر می‌شود؛ زیرا بدون منطق رله دیستانس، با زمان ناحیه دوم که ۴۰۰ میلی‌ثانیه است فرمان قطع صادر می‌شد.



شکل (۲۳): چگونگی فرمان قطع رله دیستانس توسط عملکرد منطق اجراشده درست عملی

شکل (۲۴) خط سیر امپدانس رله دیستانس در اتصال کوتاه فاز به زمین با حضور SVC و عملکرد منطق پیشنهادی در تست عملی در نرم‌افزار SIGRA را نشان می‌دهد که امپدانس فاز زمین (L1E) وارد ناحیه اول نشده و داخل ناحیه دوم است که نشان‌دهنده کاهش برد رله دیستانس در حضور SVC است.

شکل (۲۲) خط سیر امپدانس رله دیستانس در اتصال کوتاه فاز به زمین با حضور SVC در تست عملی در نرم‌افزار SIGRA را نشان می‌دهد که امپدانس فاز زمین (L1E) وارد ناحیه اول نشده و داخل ناحیه دوم است که نشان‌دهنده کاهش برد رله دیستانس در حضور SVC است و امپدانس بقیه فازها و همچنین امپدانس‌های فاز به فاز داخل ناحیه‌های رله دیستانس نشده‌اند که منطبق بر نتایج شبیه‌سازی است.

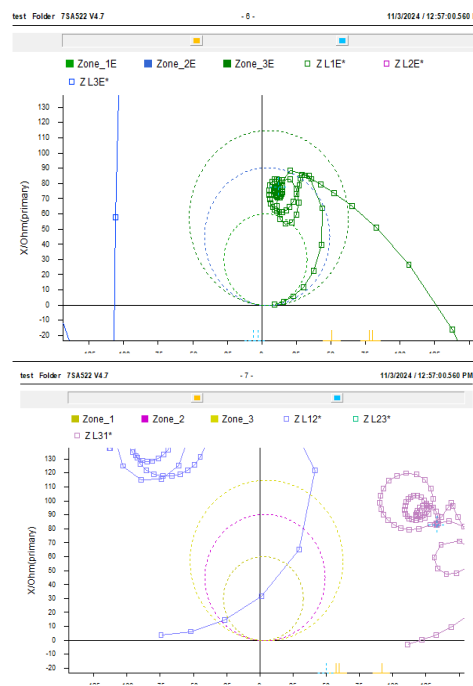


شکل (۲۲): خط سیر امپدانس رله دیستانس در اتصال کوتاه فاز به زمین با حضور SVC در تست عملی

شکل (۲۳) نمودار جریان‌های فازها و توالی‌ها و همچنین ثبت وقایع رله دیستانس و زمان عملکرد رله دیستانس با حضور SVC و عملکرد منطق پیشنهادی در تست عملی در نرم‌افزار SIGRA را نشان می‌دهد که جریان توالی منفی بیشتر از جریان توالی مثبت و جریان توالی از همه کمتر است و رله دیستانس فاز L1,E شروع به عملکرد می‌کند و ناحیه‌های دوم و سوم استارت می‌شوند و منطق پیشنهادی (Trip line1) فرمان قطع را در حدود ۴۰ میلی‌ثانیه صادر کرده است که منطبق بر نتایج شبیه‌سازی است. زمان ۴۰ میلی‌ثانیه مربوط به زمان عملکرد برنامه‌های

جبران‌کننده قادر به تولید جریان‌های فازها به صورت مستقل نیست.

این تغییرات در توالی جریان‌ها به طور مستقیم بر امپدانس ظاهری که توسط رله دیستانس اندازه‌گیری می‌شود، تأثیر می‌گذارد و باعث کاهش برد رله دیستانس می‌شود. این رویکرد باعث عملکرد غیردقیق رله دیستانس و در نتیجه، منجر به قطع‌های نادرست می‌شود. با بهره‌گیری از نسبت‌های جریان توالی صفر به مثبت، جریان توالی منفی به مثبت و جریان توالی منفی به صفر به همراه عملکرد دیستانس، توانایی تشخیص وجود SVC هنگام خطا را دارد. این ترکیب به رله کمک می‌کند تا اثر تزریق جریان‌های راکتیو SVC را جبران کند. در نتیجه، دقت حفاظت کل سیستم افزایش می‌یابد. این رویکرد موجب عملکرد حفاظت دقیق و سریع و افزایش قابلیت اطمینان سیستم در برابر خطاهای تک‌فاز می‌شود و همچنین روش پیشنهادی در پیکربندی مداری رله دیستانس به راحتی قابل اجراست و نتایج عملی صحت روش پیشنهادی را تأیید کرد و به این ترتیب، از آسیب‌رسیدن به سیستم قدرت به دلیل تأخیر در عملکرد رله جلوگیری می‌کند و این روش بدون نیاز به سیستم‌های مخابراتی مرسوم و از بین رفتن خطرات حملات سایبری انجام می‌شود و دارای پیچیدگی نیست.



شکل (۲۴): خط سیر امپدانس رله دیستانس، اتصال کوتاه فاز به زمین با وجود SVC و با منطق اجراشده در تست عملی

۵- نتیجه‌گیری

حضور SVC در خط انتقال در موقع بروز خطای تک‌فاز به زمین به طرز جالب توجه میزان جریان‌های توالی‌ها را تغییر می‌دهد، به ویژه، افزایش قابل ملاحظه در میزان جریان توالی صفر به دلیل تزریق جریان راکتیو خازنی توسط جبران‌کننده با زاویه فاز یکسان می‌شود؛ به ویژه که

جدول (۱): مقایسه روش‌ها

روش	نیاز به رله‌های دور دست	نیاز به تجهیزات کنترلی دور دست	نیاز به سیستم‌های مخابراتی	تأثیر بر عملکرد	آزمایش عملکرد	مدت زمان اجرا	هزینه	پیچیدگی	عملکرد های پیشنهادی
حفاظت تطبیقی	دارد	دارد	دارد	زیاد	دشوار	زیاد	زیاد	زیاد	ندارد
استفاده از PMU	ندارد	دارد	دارد	زیاد	دشوار	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	ندارد
الگوریتم ژنتیک	دارد	دارد	ندارد	زیاد	تقریباً دشوار	کم	کم	کم	دارد
رله اتصال زمین خروجی ترانسفورماتور توزیع	دارد	ندارد	ندارد	زیاد	آسان	کم	کم	کم	دارد
منطق پیشنهادی	ندارد	ندارد	ندارد	زیاد	آسان	کم	خیلی کم	خیلی کم	ندارد

ضمایم

در این پیوست، اطلاعات خط انتقال در **جدول (۲)** و مشخصات تنظیمات رله در **جدول (۳)** و اطلاعات ژنراتور در **جدول (۴)** و در **جدول (۵)** پارامترهای SVC آمده است.

جدول (۲): مشخصات خط انتقال

$V_n(\text{kV})$	$Z_1(\Omega/\text{Km})$	$Z_2(\Omega/\text{Km})$	$Z_0(\Omega/\text{Km})$	$L(\text{Km})$	$X_{1c}(\text{k}\Omega/\text{km})$	$X_{2c}(\text{k}\Omega/\text{km})$
230	$0.03 + 0.3j$	$0.03 + 0.3j$	$0.3 + 1.1j$	250	280.1	4.61

جدول (۳): تنظیمات رله دیستانس نرم افزار و زیمنس

	Zone1		Zone2		K0	
	Amplitude(Ω)	Phase	Amplitude(Ω)	Phase	Amplitude(Ω)	Phase
PSCAD (Primary)	60.2993	1.4711 rad	90.4489	1.4711 rad	2.8005	-0.2258 rad
Siemens (secondary) CTR:1200/1,PTR:230/0.1 kv	31.4605	84.28 deg	47.1907	84.28 deg	0.9335	-12.9389 deg

جدول (۴): مشخصات سیستم تولید

Name	$V_n(\text{kV})$	$Z_1(\Omega)$	$Z_0(\Omega)$	$S_n(\text{MVA})$
Source 1 (Bus1)	230	$0.96+18.81j$	$3.9+27.94j$	100
Source 2 (Bus2)	230	0.01	-	1

جدول (۵): مشخصات اصلی SVC

مشخصات TCR	40MVAR
مشخصات TSC	2*50MVAR
مشخصات Coupling Transformer	125MVA , $X_t=13\%$, 12.65/230Kv , Ynd

MATLAB", J. Inst. Eng. India, Ser. B, Vol. 102, No. 2, pp. 345–352, 2021.

<https://doi.org/10.18311/jmmf/2025/48052>

- [5] B. Mallikarjuna, A. Saggurthi, M. J. B. Reddy, D. K. Mohanta, "PMU-based distance protection methodology to avert malfunction due to FACTS controllers", in Proc. Nat. Power Syst. Conf. (NPSC), 2018. <https://doi.org/10.1109/npsc.2018.8771751>
- [6] A. Jalilian, G. B. Gharehpetian, H. Torkaman, "An enhanced adaptive algorithm to mitigate mis-coordination problem of the third zone of distance relays", J. Appl. Res. Technol., Vol. 13, No. 1, pp. 1–10, 2015. [https://doi.org/10.1016/s1665-6423\(15\)30007-9](https://doi.org/10.1016/s1665-6423(15)30007-9)
- [7] H. T. Nguyen, H. V. Nguyen, H. T. Le, "A study of SVC's impact simulation and analysis for distance protection relay on transmission lines", Int. J. Electr. Comput. Eng. (IJECE), Vol. 7, No. 4, pp. 1686–1695, 2017. <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i4.pp1686-1695>
- [8] M. Zellagui, A. Chaghi, "Impact of SVC devices

مراجع

- [1] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", New York, NY, USA: Wiley, 1999. <https://doi.org/10.1109/9780470546802>
- [2] M. P. Thakre, V. S. Kale, "An adaptive approach for three zone operation of digital distance relay with Static Var Compensator using PMU", International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 73, No. 1, pp. 327–336, May 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.049>
- [3] D. Liu, Q. Hong, A. Dyśko, D. Tzelepis, G. Yang, C. Booth, et al., "Evaluation of HVDC system's impact and quantification of synchronous compensation for distance protection", IET Renewable Power Generation, Vol. 16, No. 7, pp. 1234–1245, 2022. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12460>
- [4] R. Bansal, S. Singh, S. Kumari, "Analysis of impact of STATCOM on distance relay using

- [20] Z. M. T. Salleh, A. N. B. Alsammak, H. A. Mohammed, "A review on enhancing power system transient stability using static VAR compensator-based intelligent control," *J. Robot Control (JRC)*, Vol. 6, No. 1, pp. 396–410, 2024, <https://doi.org/10.18196/jrc.v6i1.24626>
- [21] International Electrotechnical Commission (IEC), "Measuring Relays and Protection Equipment – Part 151: Functional Requirements for Over/Under Current Protection", IEC 60255-151, 2009. <https://doi.org/10.3403/30168459u>
- [22] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations", IEEE Std C37.2, 1996. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2008.4639522>
- [23] Vebko Amirkabir Company, "AMT105 Protective Relay Test Device Manual", [Online]. Available: <https://vebko.org>. [Accessed: Sep. 12, 2025].
- [24] Iran Grid Management Company, "Periodic Testing Regulation for Protective Relays in Iran Transmission Network", updated 2021.
- [25] A. G. Siemens, "SIPROTEC 7SA522 Distance Protection Relay Manual", Release 4.30.03. [Online]. Available: https://www.automation-berlin.com/downloads/siemens/energy_ptd/7SA522x_Manual_A3_v04300. [Accessed: Sep. 12, 2025].
- on distance protection setting zones in 400 kV transmission line", *Sci. Bull. Electr. Eng.*, Vol. 74, No. 2, pp. 253–260, 2012. <https://doi.org/10.5772/54257>
- [9] A. Ghorbani, M. Khederzadeh, B. Mozafari, "Impact of SVC on the protection of transmission lines", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 43, No. 1, pp. 1031–1040, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.029>
- [10] Hitachi Energy, "Static Var Compensators (SVC)", [Online]. Available: <https://www.hitachienergy.com>. [Accessed: Jun. 2025].
- [11] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, "Power System Relaying", 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014. <https://doi.org/10.1002/9780470758786>
- [12] J. D. Blackburn, T. Domin, "Protective Relaying: Principles and Applications", 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/b16518>
- [13] CIGRÉ Study Committee B5, "Distance Protection Application Guide", CIGRÉ Technical Brochure 343, 2008.
- [14] Iran Grid Management Company, Planning and Network Security Supervision Deputy, "Relay and Protection System Regulation of Iran's Transmission Network", 6th ed., revised May 5, 2023 (originally 2014).
- [15] Iran Grid Management Company, "Planning and Network Security Supervision Deputy", Procurement Guide for Microprocessor Relays and Protective Settings Manual, Internal Document, 2020.
- [16] W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski, "Digital Signal Processing in Power System Protection and Control", Springer, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-802-7>
- [17] M. Khederzadeh, A. Ghorbani, "STATCOM modelling impacts on performance evaluation of distance protection of transmission lines", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 31, No. 4, pp. 2063–2079, 2011. <https://doi.org/10.1002/etep.541>
- [18] M. Khederzadeh, "The impact of FACTS device on digital multifunctional protective relays", in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf. Exhibit Asia Pacific*, Vol. 3, pp. 2043–2048, Oct. 2002. <https://doi.org/10.1109/tdc.2002.1177775>
- [19] C. Werstiuk, "The Relay Testing Handbook: Principles and Practice", Valence Electrical Training Services, 2022.

یادداشت‌ها

- ¹ Flexible AC Transmission System
- ² Static VAR Compensator
- ³ Phasor Measurement Unit
- ⁴ Support Vector Machine
- ⁵ Genetic Algorithm
- ⁶ Numerical Distance Relay
- ⁷ Distance Relay
- ⁸ Zone
- ⁹ Zone 1
- ¹⁰ Zone 2
- ¹¹ Zone 3
- ¹² Zone 4 or Zone 3R
- ¹³ Programmable Logic
- ¹⁴ Blocking
- ¹⁵ Unblocking
- ¹⁶ Coupling Transformer
- ¹⁷ Zero Sequence
- ¹⁸ Positive Sequence
- ¹⁹ Negative Sequence

¹ Continuous Function Chart