



## دومین کنفرانس ملی مهندسی و فناوری ربات های پروازی

گلستان، موسسه آموزش عالی میرداماد گرگان، ۲۱ تیرماه ۱۳۹۷



# عملکرد رله های دیستانس در برابر اثرات ناشی از قرار گرفتن ادوات FACTS موازی در شبکه

رضا اسلامی<sup>۱\*</sup>، سید امیر حسینی<sup>۲</sup> و محمدحسین سویزی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

eslami@sut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان

hosseini.amir@gut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی برق، موسسه آموزش عالی اکباتان، قزوین

m.h.soveyzi@gmail.com

\*نویسنده مسئول

## چکیده

در این مقاله تاثیر جبران ساز موازی SVC و STATCOM در حفاظت خطوط انتقال بررسی شده است. با بررسیهای انجام شده در این مقاله، مشخص می شود که این تجهیزات در امیدانس دیده شده توسط رله، اختلال ایجاد می کنند. نسبت جریان تزریق شده توسط جبران ساز به جریان محل رله، محل وقوع خطا، مقدار مقاومت خطا و جریان عبوری از آن از جمله عواملی هستند که باعث اختلال در عملکرد رله می شوند. در این مقاله امیدانس دیده شده توسط رله در حضور جبران ساز موازی به ازای خطای تک فاز به زمین محاسبه شده و در نهایت در قسمت شبیه سازی، مطالب فوق بر روی یک سیستم ۴ ماشینه که در وسط یکی از خطوط یک SVC از نوع TSC-TCR قرار داده شده، مورد صحت سنجی قرار می گیرد.

## کلمات کلیدی

ادوات FACTS، رله دیستانس، حفاظت از راه دور، جبران ساز

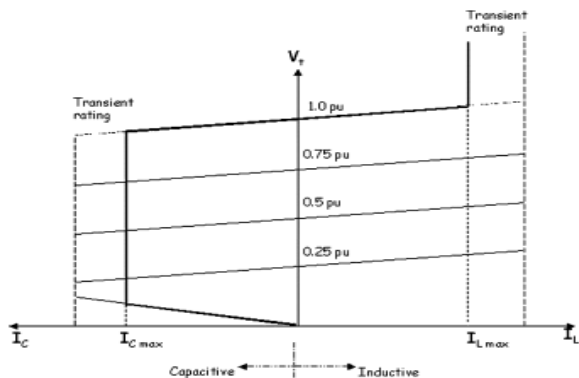
## ۱- مقدمه

شبکه های انتقال دارند [۹]. بنابراین احتمال زیادی وجود دارد که خطوی که از ادوات FACTS برای جبران سازی بهره می برند با رله های دیستانس حفاظت شوند. حال این سوال پیش می آید که "آیا رله های دیستانس در حضور ادوات FACTS درست عمل می کنند یا خیر؟" هدف این مقاله پیدا کردن جواب این سوال و بررسی مسائلی است که ممکن است در حضور ادوات FACTS برای رله ی دیستانس پیش بیاید [۴-۵]. از آنجائیکه ادوات FACTS موازی (SVC و STATCOM) زمان پاسخ سریعی دارند و این زمان کمتر از مدت زمان عملکرد رله است بسیار اهمیت

تلاش مداوم برای تبدیل سیستم قدرت به سیستمی با بازده بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر باعث افزایش استفاده از ادوات FACTS در خطوط انتقال شده است. بیشتر ادوات FACTS در خطوط انتقال به منظور بهبود عملکرد و افزایش ظرفیت خطوط نصب می شوند [۸-۱]. رله های دیستانس به خاطر سادگی تنظیم و هماهنگی و همچنین عدم نیاز این رله ها به تنظیم های مکرر که معمولاً برای رله های Over Current انجام می شود، کاربرد وسیعی در

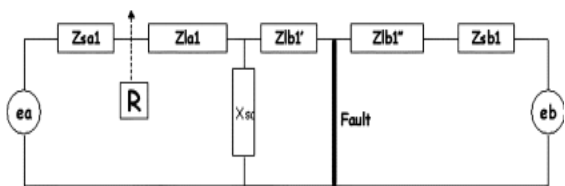
## ۲-۲- STATCOM

STATCOM می‌تواند جریان خروجی‌اش را به صورت مستقل از ولتاژ، از حالت خازنی تا القایی کنترل کند. بر خلاف SVC، STATCOM جریان ماکزیمم خازنی را می‌تواند به صورت مستقل از ولتاژ حفظ کند [۱-۳]. این یعنی که راکتانس خازنی STATCOM می‌تواند تا مقدار خیلی کوچک کاهش داده شود بدون اینکه جریان تغییر نماید. مشخصه STATCOM در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۳-۱۶].



شکل (۲): مشخصه STATCOM

مدل ساده شده یک خط جبران شده در نقطه وسط در شکل (۳) نشان داده شده است. یک خطای سه فاز به زمین در نیمه دوم خط در نظر گرفته شده است.

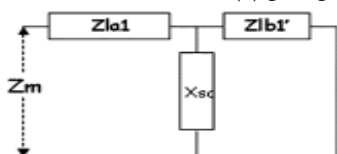


شکل (۳): مدل خط جبران شده

از روی مدار معادل فوق، امپدانس دیده شده توسط رله برای خط سه فاز به صورت زیر است [۱۷]:

$$Z_m = Z_{l1} + \frac{(Z_{l1}') \times X_{sc}}{(Z_{l1}') + X_{sc}} \quad (1)$$

$Z_m$  امپدانس معادل شکل (۴) است.



شکل (۴): مدار معادل امپدانس دیده شده توسط رله

$$\begin{aligned} Z_{l1}' &= m \times Z_{line} - Z_{l1} \\ Z_{line} &= 2 \times Z_{l1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z_{l1}' &= (2m - 1)Z_{l1} \\ Z_m &= Z_{l1} \left( 1 + \frac{(2m - 1) \times X_{sc}}{(2m - 1)Z_{l1} + X_{sc}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

در روابط فوق  $m$  از رابطه ی زیر بدست می‌آید:

دارد که عملکرد رله دیستانس را در حضور ادوات FACTS در حین خطا بررسی کنیم [۷].

SVC و STATCOM به طور وسیع در شبکه‌های قدرت استفاده می‌شوند. محل این تجهیزات بستگی به کاربرد آن‌ها در موقعیت‌های مختلف دارد به عنوان مثال این تجهیزات در انتهای خطوط انتقال به منظور بهبود پایداری سیستم و بهبود پروفیل ولتاژ و ... نصب می‌شوند و برای افزایش توان انتقالی خطوط خیلی بلند در وسط خط نصب می‌شوند [۹و۸].

در این مقاله مطالب به صورت زیر ارائه شده است: در بخش اول مقدمه‌ی کوتاهی راجع به SVC و STATCOM و مشخصه‌های آن‌ها آورده شده است. در بخش دوم خلاصه‌ای از تاثیر جبران‌سازهای موازی در عملکرد رله ارائه شده است. در بخش سوم امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله به ازای خطای تکفاز به زمین و خطایی که در امپدانس ایجاد می‌شود محاسبه می‌شود. در بخش چهارم برخی مشکلات اضافی که تجهیزات FACTS برای رله دیستانس ایجاد می‌کنند آورده شده و در قسمت آخر نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

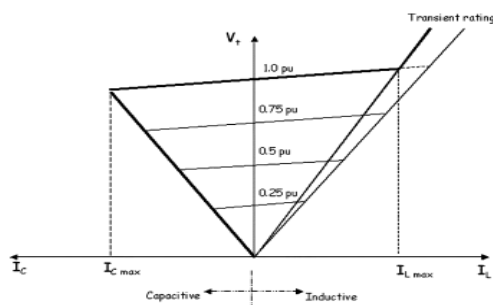
## ۲- تجهیزات FACTS

طی دهه‌ی گذشته تجهیزات FACTS کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند و برای حل بسیاری از مشکلات خطوط انتقال، استفاده می‌شوند. برخی از کاربردهای این تجهیزات به شرح زیر است:

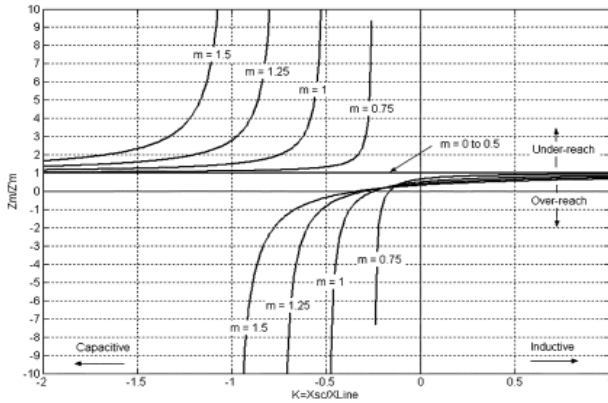
۱) افزایش ظرفیت توان قابل انتقال، ۲) بهبود حدود پایداری دینامیکی و حالت دائم، ۳) بهبود میرایی انواع نوسانات توان، ۴) بهبود پایداری ولتاژ، ۵) کاهش مشکل تشدید زیر سنکرون، ۶) بهبود عملکرد لینک HVDC [۸-۱۱].  
حال به بررسی مشخصه‌های جبران‌سازهای موازی (SVC و STATCOM) می‌پردازیم.

### ۲-۱- SVC

شکل (۱) مشخصه  $V-I$  یک SVC را نشان می‌دهد. راکتانس SVC، براساس نقطه‌ی کار آن تغییر می‌کند (در مشخصه شیب خطی که نقطه‌ی کار را به مبدا وصل می‌کند، راکتانس را نشان می‌دهد). وقتی که راکتانس SVC به ماکزیمم حد خازنی‌اش می‌رسد، SVC به صورت یک خازن ثابت عمل می‌کند در این شرایط ماکزیمم جریان قابل استحصال به صورت خطی کاهش می‌یابد و توان راکتیو تولیدی با مجذور ولتاژ کاهش می‌یابد [۱-۳]. بنابراین مینیمم مقدار راکتانس خازنی وقتی است که SVC به ماکزیمم حد خازنی‌اش می‌رسد. کاهش بیشتر ولتاژ فقط ولتاژ خروجی را کاهش می‌دهد تا راکتانس ثابت بماند [۱۲].



شکل (۱): مشخصه SVC



شکل (۵): امپدانس اندازه‌گیری شده برای خط سه فاز در حضور

### تجهیز FACTS

منحنی‌هایی که برای  $m > 1$  کشیده شده‌اند خطاهای بعد از خط حفاظت شده را نشان می‌دهند. محور عمودی شکل (۵) نسبت بین امپدانس اندازه‌گیری شده در حضور تجهیز FACTS ( $Z_m$ ) به امپدانس سیستم جبران نشده ( $Z_m'$ ) را نشان می‌دهد. این محور مستقیماً مقدار Underreach و Overreach شدن رله دیستانس را نشان می‌دهد. محور افقی مقدار جبران‌سازی  $X_{sc}$  را در واحد امپدانس خط  $X_{line}$  نشان می‌دهد. برای  $m \leq 0.5$  امپدانس اندازه‌گیری شده برابر سمت راست فرمول (۴) است و بنابراین  $\frac{Z_m}{Z_m'} = 1$  خواهد بود.

برای  $m > 0.5$  وجود راکتانس جبران‌ساز موازی روی امپدانس اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارد. بیشترین تأثیر جبران‌سازی در حوالی نقطه‌ای است که مقدار راکتانس جبران‌ساز برابر راکتانس خط بین تجهیز FACTS و محل خطا است. در این حالت بین راکتانس خازنی جبران‌ساز موازی و راکتانس القایی تشدید رخ می‌دهد.

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که نقطه‌ی تشدید بین ناحیه‌های Overreach و Underreach به صورت عمودی شکاف ایجاد کرده است.

تأثیر جبران‌ساز موازی با افزایش نسبت  $\frac{X_{sc}}{Z_{line}}$  کاهش می‌یابد. بعلاوه از روی شکل مشاهده می‌شود که هرچه فاصله محل خطا از جبران‌ساز موازی بیشتر باشد احتمال Overreach و Underreach شدن بیشتر می‌شود.

از روی این تحلیل‌ها می‌توان فهمید که یک مقدار بحرانی برای  $X_{sc}$  وجود دارد که در آن خطای اندازه‌گیری از Underreach شدن تا Overreach شدن تغییر می‌کند. یعنی اگر مقدار  $X_{sc}$  از مقدار بحرانی‌اش بیشتر باشد رله Underreach می‌شود و اگر کوچکتر از مقدار بحرانی باشد رله Overreach می‌شود.

## ۳- محاسبه امپدانس دیده شده توسط رله

### دیستانس در حضور SVC به ازای خطای تک‌فاز به

#### زمین

مدل ساده شده یک خط جبران شده در نقطه وسط در شکل (۶) نشان داده شده است. یک خطای تک‌فاز به زمین در نیمه دوم خط در نظر گرفته شده است.

$$Z_m = Z_{l1} + \frac{(Z_{l1}') \times X_{sc}}{(Z_{l1}') + X_{sc}} \quad (4)$$

پارامترهای روابط فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند:  
 $Z_m$  امپدانس دیده شده توسط رله،  $Z_{l1}$  امپدانس توالی مثبت خط انتقال قبل از تجهیز FACTS،  $Z_{l1}'$  امپدانس توالی مثبت خط انتقال بعد از تجهیز FACTS،  $Z_{line}$  امپدانس کل خط،  $X_{sc}$  راکتانس توالی مثبت تجهیز FACTS و  $m$  مکان وقوع خطا بر حسب واحد طول خط می‌باشد. وقتی که تجهیز FACTS وجود ندارد و یا در مدار قرار نگرفته است مقدار  $X_{sc}$  بی نهایت می‌شود و بنابراین داریم:

$$Z_m = Z_{l1} + Z_{l1}' = mZ_{line} = Z_m' \quad (5)$$

می‌دانیم که وقتی خطا روی خط رخ می‌دهد، ولتاژ سیستم به شدت کاهش می‌یابد و جبران‌ساز FACTS بلافاصله سعی می‌کند که توان راکتیو را برای بهبود ولتاژ تزریق کند. بنابراین راکتانس تجهیز موازی در حالت خطا همواره خازنی است و مقدار آن بستگی به مقدار توان راکتیو تزریقی دارد. هرچه توان راکتیو تزریقی بیشتر باشد مقدار  $X_{sc}$  بیشتر خواهد بود.

از فرمول (۱) نتیجه می‌شود که وقتی مقدار  $X_{sc}$  نسبت به  $Z_{l1}'$  کاهش می‌یابد، تأثیر بیشتری روی امپدانس اندازه‌گیری شده می‌گذارد. بعلاوه از آنجایی که راکتانس موازی خازنی است و راکتانس خط انتقال القایی است، امپدانس اندازه‌گیری شده یک رابطه‌ی غیر خطی با موقعیت خطا خواهد داشت، که این پدیده در شکل (۵) نشان داده شده است.

امپدانس اندازه‌گیری شده بدون جبران‌ساز موازی (شکل (۵)، مبنای مقایسه امپدانس اندازه‌گیری شده با حضور جبران‌ساز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با تقسیم فرمول (۲) بر فرمول (۴) داریم:

$$\frac{Z_m}{Z_m'} = \left(\frac{1}{2m}\right) \times \left(1 + \frac{(2m-1) \times 2k}{(2m-1) + 2k}\right) \quad (6)$$

که در آن  $k = \frac{X_{sc}}{Z_{line}} = \frac{X_{sc}}{X_{line}}$  برای خط بدون تلف است.

فرمول (۶) فقط برای  $m > 0.5$  قابل قبول است. یعنی تجهیز FACTS فقط در خط‌هایی که بعد از محل جبران‌سازی رخ می‌دهند تأثیر می‌گذارد و برای  $m \leq 0.5$  هیچ تأثیری در عملکرد رله دیستانس نخواهد داشت.

از آنجائیکه مقاومت خط در مقایسه با راکتانس آن خیلی کوچک است می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. ضریب  $k$  برای خط بدون تلفات بدون بعد است. این ضریب برای جبران‌سازی القایی مثبت و برای جبران‌سازی خازنی منفی است. نمودار امپدانس اندازه‌گیری شده با فرمول (۵) برای موقعیت‌های مختلف خطا ( $m$  های مختلف) و ضرایب جبران‌سازی  $k$  مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۸].

با توجه به فرمول (۱۲) مشاهده می شود که خطای ایجاد شده در امپدانس به سه عامل بستگی دارد. جمله اول نشان می دهد که میزان نسبت جریان تجهیز موزی به جریان رله  $(\frac{I_{sh}}{I_R})$  و محل وقوع خطا  $(m)$  در خطای ایجاد شده موثر هستند. جمله دوم نشان می دهد که این خطا به میزان جریان اتصال کوتاه که از مقاومت خطا  $R_f$  عبور می کند نیز وابسته است. میزان جریان اتصال کوتاه، خود به عوامل متعددی مثل قدرت شبکه، نوع اتصال کوتاه، امپدانس ترانسفورماتورهای سیستم و... وابسته است.

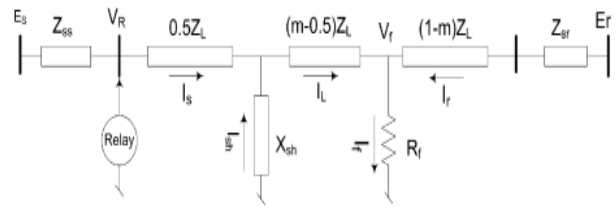
اگر نسبت جریان  $(\frac{I_{sh}}{I_R})$  مثبت باشد، یعنی جبران ساز، جریان به شبکه تزریق می کند که این باعث افزایش امپدانس دیده شده توسط رله و در نتیجه Underreach شدن آن می شود. بنابراین چون میزان جبران سازی STATCOM در ولتاژهای پایین بیشتر از SVC است انتظار می رود که STATCOM تاثیر بیشتری در Undereach شدن رله داشته باشد. از طرف دیگر، اگر این نسبت منفی باشد نشان دهنده این است که جبران ساز جریان می کشد و بنابراین امپدانس دیده شده توسط رله کاهش می یابد و باعث Overreach شدن رله می شود [۱۹].

#### ۴- برخی از مشکلات اضافی تجهیزات FACTS

از آنجایی که هم SVC و هم STATCOM برای کنترل ولتاژ استفاده می شوند، از سوئیچینگ سه فاز با زاویه آتش متعادل استفاده می کنیم. بنابراین برای خطاهای نامتعادل، فازی که در آن خطا اتفاق افتاده نسبت به فازهای سالم افت ولتاژ شدید پیدا می کند و جبران ساز اگر STATCOM باشد حداکثر توان خازنی خود را برای سه فاز ایجاد می کند که در نتیجه آن ولتاژ در فازهای سالم بالا می رود و ولتاژ معادل دیده شده توسط رله تغییر خواهد کرد و رله نمی تواند تشخیص درستی از فازی که خطا در آن رخ داده است بدهد. علاوه بر این، جبران سازی اضافی در فازهای سالم باعث افزایش جریان راکتیو در این فاز خواهد شد که این امر بخصوص در مواقعی که رله انتخاب فاز را بر مبنای جریان انجام می دهد، باعث اشتباه رله در تشخیص فازی که خطا در آن رخ داده خواهد شد.

یکی دیگر از مشکلات اضافی که جبران سازی موزی برای رله های دیستانس بوجود می آورد، پدیده تشدید است که عموماً در مواقعی که خطا سه فاز رخ می دهد اتفاق می افتد. در خطاهای سه فاز یک محدوده از خط وجود دارد که امپدانس دیده شده توسط رله بی نهایت خواهد شد اگر خطا سه فاز در این محدوده اتفاق بیافتد و بلافاصله برطرف شود، لحظه ای وجود خواهد داشت که رله مقدار ولتاژ و جریان خطا را شدیداً زیاد خواهد دید که باعث عملکرد خود رله دیستانس نخواهد شد بلکه واحد نوسان توان POWER SWING رله دیستانس به اشتباه عمل خواهد کرد بنابراین جبران سازی موزی با ادوات FACTS فقط بر روی عملکرد رله های دیستانس تاثیر منفی نمی گذارد بلکه ممکن است رله های OverCurrent و حتی رله های نوسان توان نیز به اشتباه عمل کنند.

نوع بار و نوع خطا هم در تصمیم گیری رله دیستانس در خطوط جبران سازی شده تاثیر می گذارد. مقدار بار قبل از خطا فقط در خطاهای نامتعادل روی خطای اندازه گیری تاثیر می گذارد که این امر بخاطر پاسخ متعادل جبران ساز در



شکل (۶): مدل خط جبران شده

از روی مدار معادل فوق، امپدانس اندازه گیری شده توسط رله برای خطای تکفاز به زمین به صورت زیر محاسبه می شود [۱۹].

$$V_{Rx} = 0.5Z_{Lx}I_{s_x} + (m-0.5)Z_{Lx}(I_{shx} + I_{s_x}) + I_{fx}R_f \quad (7)$$

در فرمول (۷):

$x$ ، ۱ یا ۰ است که مولفه های توالی را مشخص می کند.  $V_{Rx}$  ولتاژ توالی در محل رله،  $m$  نسبت مکان وقوع خطا از محل رله تا نقطه خطا به کل طول خط،  $I_{shx}$  جریان توالی تجهیز موزی،  $I_{s_x}$  جریان توالی محل رله،  $I_{fx}$  جریان توالی در مقاومت خطا،  $R_f$  مقاومت خطا و  $Z_{Lx}$  مولفه های توالی امپدانس خط می باشند. ولتاژ در محل رله با اضافه کردن توالی های مثبت، منفی و صفر  $V_R$  در فرمول (۷) بدست می آید که بعد از ساده سازی به صورت زیر در می آید:

$$V_R = mZ_{L1}[I_s + kI_{s0}] + (m-0.5)Z_{L1}[I_{sh} + kI_{s0}] + R_f I_f \quad (8)$$

در فرمول (۸)  $I_f = I_s + I_r + I_{sh}$  و  $k = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}$  و امپدانس های توالی مثبت و منفی با هم برابرند. امپدانس اندازه گیری شده توسط رله برابر است با:

$$Z_{relay} = \frac{V_{relay}}{I_{relay}} = \frac{V_R}{I_R} \quad (9)$$

در معادله فوق  $I_R = I_s + kI_{s0}$ .

با استفاده از دو فرمول (۸) و (۹) امپدانس اندازه گیری شده توسط رله به صورت زیر در می آید.

$$Z_{relay} = mZ_{L1} + (m-0.5)Z_{L1} \left( \frac{I_{sh} + kI_{sh0}}{I_R} \right) + R_f \left( \frac{I_f}{I_R} \right) \quad (10)$$

جریان توالی صفر تجهیز موزی که در معادله ی فوق با  $I_{sh0}$  نشان داده شده است، می تواند با اتصال مثلث در یک سمت ترانسفورماتور کوپله صفر شود و در واقع تزریق جریان توالی صفر تجهیز توسط ترانسفورماتور کوپله کننده صفر شود. بنابراین داریم:

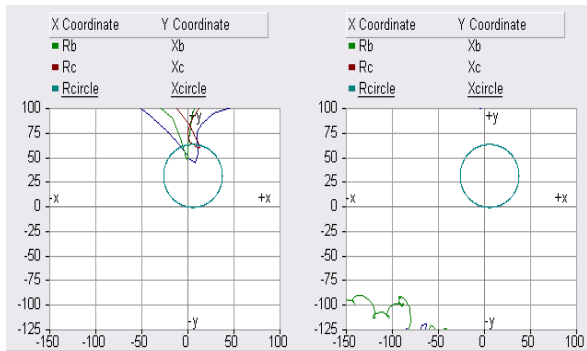
$$Z_{relay} = mZ_{L1} + (m-0.5)Z_{L1} \left( \frac{I_{sh}}{I_R} \right) + R_f \left( \frac{I_f}{I_R} \right) \quad (11)$$

خطای امپدانس ظاهری:

در فرمول (۱۱) جمله ی اول  $(mZ_{L1})$  امپدانس خط را تا محل وقوع خطا برای خط جبران سازی نشده نشان می دهد. بنابراین بقیه جملاتی که در فرمول (۱۱) وجود دارند، میزان خطایی هستند که در حضور جبران ساز موزی ایجاد شده است.

$$Z_{error} = (m-0.5)Z_{L1} \left( \frac{I_{sh}}{I_R} \right) + R_f \left( \frac{I_f}{I_R} \right) \quad (12)$$

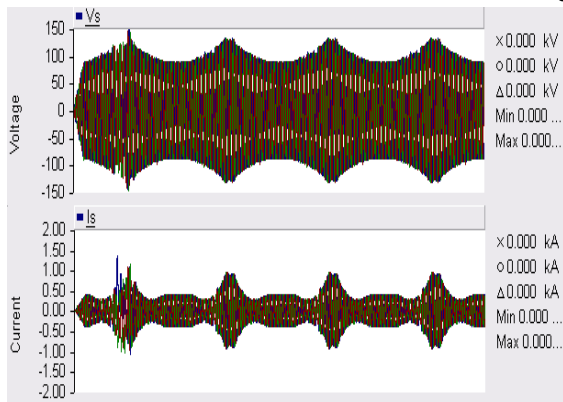
شکل (۹): مشخصه های ولتاژ و جریان رله در خط جبران نشده  
 حال از یک SVC که از دو واحد TSC و یک واحد TCR با قدرت نامی ۲۰۰ MVAR تشکیل شده است در وسط خط استفاده می کنیم. مشخصه امپدانس رله در این حالت در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): مشخصه امپدانس رله برای خط جبران شده به ازای الف) خطای تکفاز به زمین ب) خطای سه فاز به زمین

در شکل فوق مشاهده می شود که رله برای خطای تکفاز به زمین در سیستم جبران سازی شده عمل نمی کند. اما برای خطای سه فاز به زمین عمل خواهد کرد. بنابراین نتیجه می شود که در حالت جبران سازی با SVC، خطا تکفاز به زمین خطای بیشتری نسبت به خطا سه فاز به زمین در امپدانس اندازه گیری شده توسط رله، ایجاد می کند.

در شکل زیر نمودار ولتاژ و جریان محل رله به ازای خطا تکفاز به زمین در محلی که نزدیک به محدوده تشدید است (که در بخش دوم توضیح داده شد) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): مشخصه ولتاژ و جریان دیده شده توسط رله برای خطا نزدیک محدوده تشدید

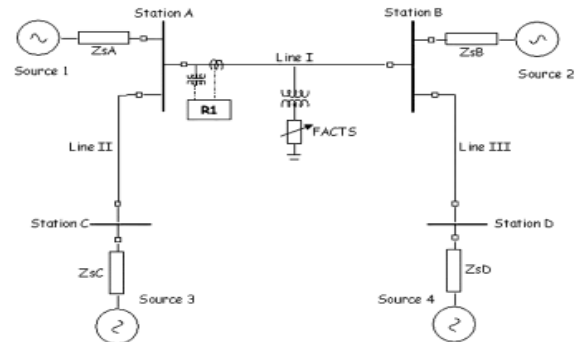
## ۶- نتیجه گیری

از روی مطالعات انجام شده می توان نتیجه گرفت که حفاظت دیستانس برای خطوط جبران سازی شده توسط ادوات FACTS بهترین حفاظت محسوب نمی شود. در حالت کلی حفاظت دیستانس بدون Pilot در خطوط جبران سازی شده موازی به هیچ وجه توصیه نمی شود. راهکارهایی که برای جبران اثر خطای اندازه گیری، ارائه شده اند در این مقاله بررسی نشده اند اما به عنوان مثال برای حفاظت این خطوط می توان از روش های مقایسه فاز استفاده کرد که فاز جریان ابتدا و انتهای خط را مقایسه می کنند و خطا را تشخیص می دهند و یا می توان از روش های حفاظت Pilot مانند روش DUTT، POTT و PUTT استفاده کرد. با این حال اگر چه استفاده از کانال مخابراتی

خطاهای نامتعادل است. برای SVC ماکزیمم خطا در خطای تکفاز به زمین رخ می دهد و برای STATCOM خطای سه فاز بیشترین خطا را ایجاد می کند [۱۹و۱۲].

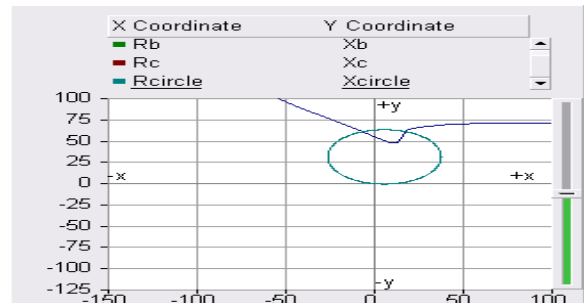
## ۵- شبیه سازی

برای بررسی تاثیر جبران ساز موازی در عملکرد رله دیستانس از یک سیستم ۴ باسه و ۴ ماشینه که در شکل (۷) نشان داده شده است استفاده کرده ایم. یک SVC از نوع TSC-TCR در وسط خط بین باس A و B قرار داده شده است. رله دیستانس نیز در نقطه ی A قرار داده شده است.

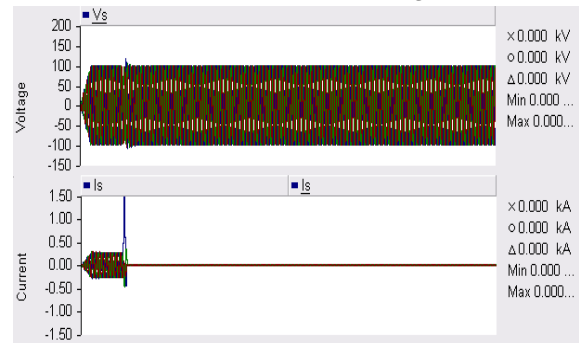


شکل (۷): سیستم شبیه سازی شده

یک خطا در نیمه ی دوم خط ۱ در نظر گرفته شده است. هنگامی که SVC خارج از مدار است یا بعبارت دیگر خط جبران سازی نشده است، رله دیستانس خطا را تشخیص داده و به درستی عمل می کند. منحنی های ولتاژ و جریان و مشخصه امپدانس رله در خط جبران نشده با خطا تکفاز به زمین در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): مشخصه امپدانس رله دیستانس برای خط جبران نشده در شکل (۸) مشاهده می شود که امپدانس دیده شده توسط رله وارد ناحیه حفاظتی آن شده و بنابراین رله به درستی فرمان تریپ را صادر می کند. در شکل زیر مشخصه های ولتاژ و جریان رله، به ازای خطای تکفاز به زمین در لحظه ۰/۲ ثانیه نشان داده شده اند.



presence of series connected FACTS devices, in Proc. IEEE Power Engineering Soc. Winter Meeting, vol. 3, Jan. 23–27, 2000, pp. 1967–1972.

- [18] M. Khederzadeh, *The impact of FACTS device on digital multifunctional protective relays*, in Proc. Transmission Distribution Conf. Exh. Asia Pacific. IEEE/Power Eng. Soc., vol. 3, Oct. 6–10, 2002, pp. 2043–2048.
- [19] K. El-Arroudi, G. Joos, and D. T. McGillis, *Operation of impedance protection relays with the STATCOM*, IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 2, pp. 381–387, Apr. 2002.

بین پست‌هایی که در دوطرف خط جبران شده قرار دارد، در بسیاری از موارد مشکلات را حل می‌کند ولی برای STATCOM وقتی که خط Overreach می‌شود کانال مخابراتی هم سودمند نخواهد بود.

## ۷- مراجع

- [1] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts & Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York: Wiley, Nov. 1999.
- [2] R. K. Varma and R. M. Mathur, *Thyristor-Based FACTS Controller for Electrical Transmission Systems*, Wiley/IEEE Press, Feb. 2002.
- [3] L. Gyugyi, *Converter-based FACTS controllers*, in Inst. Elect. Eng. Colloq. Flexible AC Transmission Systems—The FACTS, pp. 1/1–1/111, Nov. 23, 1998.
- [4] P. Moore and P. Ashmole, *Flexible AC transmission systems*, Inst. Elect. Eng. Power Engineering J., vol. 9, no. 6, pp. 282–286, Dec. 1995.
- [5] Tarlochan Singh Sidhu, Rajiv K. Varma, *Performance of Distance Relays on Shunt—FACTS Compensated Transmission Lines*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005
- [6] Fadhel A. Albasri, Tarlochan Singh Sidhu, *Performance Comparison of Distance Protection Schemes for Shunt-FACTS Compensated Transmission Lines*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 22, No. 4, October 2007
- [7] F. A. Albasri, T. S. Sidhu, and R. K. Varma, *Impact of shunt-FACTS on distance protection of transmission lines*, in Proc. Power Systems Conf., Clemson, SC, Mar. 14–17, 2006.
- [8] A. Kazemi, S. Jamali, H. Shateri, *Measured Impedance by Distance Relay in Presence of SVC on Transmission Line*, IEEE, 2006.
- [9] A. Ghorbani, S.Y. Ebrahim, M. Ghorbani, *Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators*, Protection and Control of Modern Power Systems, Vol. 2, 2017.
- [10] Fadhel A. Albasri, *Mitigation of Adverse Effects of Midpoint Shunt-FACTS Compensated Transmission Lines on Distance Protection Schemes*, IEEE, 2007.
- [11] K. Satyanarayana, B.K.V. Prasad, K. Saikrishna, *Effect of series FACTS devices on distance protection*, International Conference on sustainable Energy and Intelligent Systems, 2011.
- [12] E. Abedi, H. Askarian Abyaneh, *Analysis of the SVC Impact on Distance Relays Performance*, International Conference on Power System Technology, 2010.
- [13] *IEEE Guide for a Detailed Functional Specification and Application of Static VAR Compensators*, IEEE Std. 1031-1991, Mar. 26, 1992.
- [14] K. Sujita Kumar Achary, P. Raja, *Adaptive design of distance relay for series compensated transmission line*, Energy Procedia, Vol. 117, pp. 527-534, 2017.
- [15] D. Novosel, A. Phadke, M. M. Saha, and S. Lindahl, *Problems and solutions for microprocessor protection of series compensated lines*, Proc. Inst. Elect. Eng. Conf. Developments Power System Protection, pp. 18–23, Mar. 25–27, 1997.
- [16] H.V. Gururaja Rao, R.C. Mala, *Effect of STATCOM – ES on Distance Relay Operation in a Series Compensated System*, Procedia Technology, Vol. 21, pp. 196-203, 2017.
- [17] P. K. Dash, A. K. Pradhan, G. Panda, and A. C. Liew, *Digital protection of power transmission lines in the*