

## بررسی تأثیر حضور STATCOM و HSFCL بر عملکرد رله دیستانس در شبکه انتقال

زهرا مروج<sup>۱\*</sup>، علیرضا جدائی<sup>۲</sup>، محمد پازکی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹</p>	<p>در این مقاله، تأثیر نصب محدود کننده جریان ابررسانای هیبریدی HSFCL<sup>۱</sup> بر امیدانس ظاهری دیده شده، توسط رله دیستانس در سیستم‌های قدرت جبران سازی شده با STATCOM<sup>۲</sup> بررسی شده است. برای پاسخگویی به افزایش تقاضای برق و افزایش ظرفیت خط انتقال، STATCOM در سیستم قدرت نصب می‌شود. نصب STATCOM در سیستم قدرت باعث افزایش سطح جریان اتصال کوتاه می‌شود که برای کنترل این جریان، استفاده از HSFCL پیشنهاد می‌شود. نصب STATCOM و HSFCL باعث تغییر اندازه امیدانس محاسبه شده توسط رله دیستانس شده و بر عملکرد سیستم حفاظتی تأثیر می‌گذارد. محل نصب STATCOM می‌تواند قبل یا بعد از محل خطا باشد و باید محل و فاصله آن از رله مورد بررسی قرار گیرد، همچنین محل نصب HSFCL که می‌تواند قبل یا بعد از ترانسفورماتور ولتاژ باشد، عواملی می‌باشند که بر عملکرد سیستم حفاظتی تأثیر می‌گذارند. نوع خطا، محل وقوع خطا و مقاومت خطا پارامترهای دیگری هستند که در مطالعات شبیه سازی، در نظر گرفته شده و بررسی شده است. HSFCL دارای دو ساختار RHSFCL<sup>۳</sup> و LHSFCL<sup>۴</sup> می‌باشد که هر دو ساختار بررسی شده و دو حالت باهم مقایسه شده است. سیستم مورد نظر با تجهیزات ذکر شده در نرم افزار PSCAD / EMTDC مدل سازی شده و نتایج مورد بحث قرار گرفته است.</p>
<p><b>واژگان کلیدی:</b> رله دیستانس، خط انتقال، محدود کننده جریان خطای ابررسانای هیبریدی، STATCOM</p>	

### ۱- مقدمه

سیستم انرژی شده است. خطاهای اتصال کوتاه شایع‌ترین خرابی است که در سیستم‌های قدرت رخ می‌دهد و منجر به گرمای بیش از حد در تجهیزات سیستم برق از قبیل ژنراتورها، ترانسفورماتورها، هادی‌ها و غیره می‌شود. برای جلوگیری از نقص و خرابی، باید ظرفیتی اضافی در طراحی تجهیزات در نظر گرفته شود تا اتصال کوتاه به تجهیزات آسیب نرساند، که به سهم خود هزینه‌ها را به صورت چشمگیری افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، سهم برخی تجهیزات در حین وقوع خطای اتصال کوتاه باعث افزایش جریان خطا می‌شود [۴ و ۵]. این امر منجر به تأثیرات منفی مانند عملکرد ناموفق قطع کننده مدار و فشارهای

در سالهای اخیر صنعتی شدن و شیوه زندگی شهرنشینی باعث افزایش چشمگیر تقاضای برق شده است. با افزودن تجهیزات جدید مانند ادوات FACTS (سیستم انتقال انعطاف پذیر) می‌توان ظرفیت خط انتقال را افزایش داد [۱]. ادوات FACTS مانند STATCOM معمولاً به عنوان یک راه حل موثر برای پاسخ سریع به تغییرات ولتاژ و توان راکتیو در شرایط عادی و خطادار در نظر گرفته می‌شود [۲ و ۳]. نصب STATCOM در شبکه و همچنین تلاش برای پاسخگویی به رشد تقاضای برق و افزایش منابع تولید پراکنده منجر به بالا رفتن سطح جریان اتصال کوتاه در

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: zmoravej@semnan.ac.ir

۱. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۳. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان

اقتصادی نیز مناسب خواهد بود. در HSFCL، از المان ابرسانا<sup>۱۰</sup> (HTS) فقط برای شناسایی جریان خطا و به منظور جابجایی جریان خطا در سیم پیچ محرک استفاده می‌شود و از بخش محدود ساز جریان<sup>۱۱</sup> (CLP) برای کاهش جریان خطا استفاده می‌شود [۹]. بررسی‌های موجود در [۱۰] نشان می‌دهد که از محدود کننده جریان خطای هیبریدی می‌توان در سیستم‌های توزیع و انتقال استفاده کرد.

به کارگیری STATCOM و HSFCL در شبکه برق دارای مزایای می‌باشد که به آن اشاره شد اما استفاده این تجهیزات در شبکه برق بدون بررسی دقیق همه جوانب این تجهیزات امکان ایجاد تاثیرات منفی در شبکه برق را افزایش می‌دهد [۸].

در رابطه با این موضوع چندین مقاله منتشر شده است: در [۱۱] تاثیر نصب SFCL بر رله دیستانس بحث شده است. علاوه بر مشکل محل PT، بی‌توجهی به تاثیر مقاومت خطا در هنگام ارزیابی و عدم وجود مطالعات تحلیلی برای تایید آنالیز، از معایب این مقاله می‌باشد. اصل عملکرد HSFCL با SISFCL کاملا متفاوت است، اما در [۱۲] از نتایج به دست آمده در رابطه با تاثیر HSFCL بر روی رله دیستانس برای بررسی SISFCL استفاده شده است که روش مناسبی نمی‌باشد.

در [۱۳]، تاثیر SFCL از نوع پل دیودی بر عملکرد رله دیستانس با روش‌های تحلیلی و شبیه سازی ارزیابی شده است، اما از معایب این مقاله می‌توان به استفاده از روابط ریاضی پیچیده برای تجزیه و تحلیل و عدم بررسی موقعیت نصب SFCL اشاره کرد. نویسندگان در [۱۴] تاثیر نصب SISFCL بر رله دیستانس را بررسی کرده و یک راه حل برای بهبود اثرات جانبی آن ارائه می‌دهند. اما، علاوه بر مشکل محل نصب این محدود کننده جریان خطا، غفلت از تاثیر مقاومت خطا در هنگام ارزیابی، نقطه ضعف این مقاله می‌باشد. در [۱۵]، یک طرح تطبیقی برای بهبود دقت رله دیستانس در حضور HSFCL ارائه شده است. با این حال، روش پیشنهادی از اطلاعات عملکرد SFCL استفاده می‌کند و برای تصمیم گیری دقیق به سخت افزار اضافی احتیاج دارد. علاوه بر این، فقط یک مطالعه شبیه سازی در نظر گرفته شد که منجر به پنهان کردن مواردی مانند تاثیر پارامترهای HSFCL و نوع خطا می‌شود. در [۱۶]، یک طرح برای تغییر تنظیمات رله و تغییر ناحیه های حفاظتی

مکانیکی و الکتریکی بر روی تجهیزات سیستم قدرت می‌شود. برای کاهش جریان خطا، تاکنون رویکردهای مختلفی معرفی شده است. استفاده از فیوزهای قابلیت قطع بالا، ترانسفورماتور با امپدانس اتصال کوتاه بالا، راکتورهای سری و تغییر پیکربندی شبکه‌های برق از روش‌های معمول است. با این حال، رویکردهای فوق الذکر برای تحقق کلیه الزامات ناتوان است. برخی از آنها گران هستند و برخی دیگر از نظر فنی برای اعمال در ولتاژهای مختلف قابل توجه نیستند [۶]. تجهیز سیستم برق با محدود کننده‌های جریان خطا<sup>۵</sup> (FCL) یک راه‌حل جایگزین و موثر برای کاهش سطح اتصال کوتاه است. FCL در شرایط عادی افت ولتاژ کمی دارد، اما جریان خطا را در چند میلی ثانیه پس از بروز خطا در سیستم قدرت محدود می‌کند [۷و۶]. با قرار دادن FCL در مکان‌های مناسب، می‌توان هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی سیستم‌های قدرت دارای منابع تولید پراکنده را، بازگرداند. ساختارهای مختلفی برای توسعه FCL پیشنهاد شده است که می‌توان این ساختارها را به دو دسته: FCL ابرسانا<sup>۶</sup> (SFCL) و FCL غیر ابرسانا<sup>۷</sup> (NSFCL) تقسیم کرد.

با این حال، پیشرفت‌های اخیر در مواد ابرسانا، SFCL را به عنوان یک وسیله امیدوارکننده برای محدود کردن جریان خطا مطرح کرده است. علاوه بر این، عملکرد فنی SFCL قبلا با آزمایش میدانی تأیید شده است. به طور کلی، الزامات محدود کننده‌های جریان خطای ایده‌آل به شرح زیر است: اتلاف توان کم در حالت عادی، افت ولتاژ کم در طول شرایط عادی، توانایی محدود کردن جریان خطا، به صورت مناسب، امکان مقاومت در برابر جریان خطا، عملکرد تجهیزات حفاظتی به صورت مناسب، زمان پاسخ سریع، زمان بازبازی کوتاه، قابلیت انجام عملیات چندگانه بدون مداخله انسانی و ... [۶]. تاکنون ایده‌های مختلفی برای توسعه SFCL ارائه شده است. با این حال، به دلایل فنی و اقتصادی، سرمایه گذاران فناوری بیشتر بر روی نوع SFCL مقاومتی<sup>۸</sup> (RSFCL)، SFCL هیبریدی و SFCL هسته آهن اشباع<sup>۹</sup> (SISFCL) متمرکز شده‌اند. در میان محدود کننده‌های جریان خطا ابرسانا مختلف، نوع هیبریدی کاربرد بیشتری دارد. در نوع هیبریدی اندازه مواد ابرسانا نسبت به نوع مقاومتی، کمتر می‌باشد، بنابراین زمان بازبازی عنصر ابرسانا اندک خواهد بود و می‌تواند به صورت سریع آماده عملکرد دوباره شود. علاوه بر این، از نظر

عوامل دیگری می‌باشد که بر عملکرد رله دیستانس تاثیرگذار بوده و در این مقاله بحث شده است. مقاومت خطا و نوع خطا نیز پارامترهایی هستند که بر عملکرد رله دیستانس در حضور STATCOM و HSFCL تاثیر می‌گذارند و در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

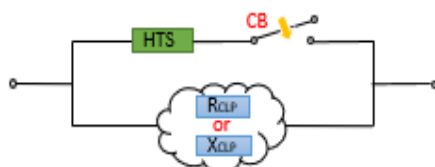
## ۲- ساختار و عملکرد HSFCL و STATCOM

در این بخش ابتدا ساختار HSFCL و رفتار آن هنگام وقوع خطا بررسی شده، سپس ساختار و عملکرد STATCOM مورد بحث قرار گرفته است [۲۳ و ۲۴].

### ۲-۱- HSFCL

همه ی محدود کننده‌های جریان خطا دارای یک وظیفه مشترک هستند و باید جریان خطا را به محض ظاهر شدن در سیستم قدرت، محدود کنند اما هر یک از محدود کننده‌های جریان دارای ساختار و اجزای مختلفی می‌باشد [۱۰ و ۲۵]. در این قسمت ساختار HSFCL به صورت کامل شرح داده می‌شود.

شکل (۱) ساختار ساده HSFCL را نشان می‌دهد [۱۰]. المان ابررسانا، بخش محدودساز جریان و کلید قدرت (CB) بخش‌های اصلی آن را تشکیل می‌دهد. در شرایط عادی اگر سیستم ایده‌آل در نظر گرفته شود، المان ابررسانا مقاومت ناچیزی در مقابل عبور جریان بار دارد و با سری شدن با کلید قدرت مسیر بدون محدودیتی برای عبور جریان بار فراهم می‌کند و هیچ جریانی از شاخه موازی عبور نمی‌کند، اما در عمل بخش کوچکی از جریان بار از شاخه موازی عبور می‌کند. هنگامی که خطایی در سیستم قدرت رخ می‌دهد، المان ابررسانا خاموش می‌شود و مقاومتش به سرعت شروع به افزایش می‌کند. این وضعیت تا زمان عملکرد کلید ادامه پیدا می‌کند، سپس جریان خطا به طور کامل به شاخه موازی منتقل می‌شود و ابررسانا وارد مرحله بازیابی می‌شود [۲۶ و ۲۷].



شکل ۱- مدل مداری HSFCL

همچنین رفتار مقاومتی المان ابررسانا ثابت نبوده و در زمان‌های مختلف دارای مقدار مختلفی می‌باشد که در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد [۱۰].

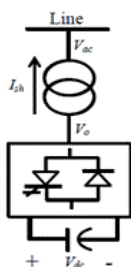
بر اساس وضعیت SFCL پیشنهاد شده است، در این مقاله با در نظر گرفتن شرایط دستور قطع آنی و دستور قطع با تاخیر، از روش تنظیمات گروهی<sup>۲</sup> (GSS) ناحیه‌های حفاظتی استفاده شده است. در [۱۷] عملکرد رله دیستانس را در خطوط انتقال جبران شده توسط ادوات FACTS مطالعه شده است. در [۱۸] مطالعه اثر STATCOM بر رله دیستانس یک سیستم قدرت با تجزیه و تحلیل فرکانسی ارائه شده و ثابت شده است که توان راکتیو تزریق شده توسط STATCOM، امیدانس ظاهری دیده شده توسط رله را تحت تاثیر قرار می‌دهد. یک طرح حفاظت دیستانس تطبیقی در [۱۹] برای بهبود عملکرد طرح حفاظت دیستانس مرسوم برای خطوط جبران سازی شده با خطاهای مقاومت بالا ارائه شده است. در [۲۰] اینورتر استفاده شده در سیستم فتوولتائیک به عنوان جبران کننده STATCOM نیز مورد استفاده قرار گرفته و تاثیر این موضوع بر عملکرد حفاظت دیستانس بررسی شده است. در [۲۱] تجزیه و تحلیل یک تکنیک هماهنگی محدود کننده جریان خطا ابررسانای نوع مقاومتی (RSFCL) و جبران کننده STATCOM را برای بهبود پایداری گذرا سیستم قدرت ارائه می‌کند. نقش اصلی این مدل ترکیبی محدود کردن جریان خطا با استفاده از فناوری ابررسانا و پشتیبانی موثر توان راکتیو با استفاده از STATCOM است. در [۲۲] یک مشخصه تطبیقی برای از بین بردن اثرات نامطلوب مقاومت خطا و جبران کننده STATCOM بر عملکرد رله دیستانس در خط انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. نصب STATCOM در سیستم باعث افزایش سطح جریان خطا می‌شود که با نصب HSFCL می‌توان تا حدودی این افزایش سطح جریان را کنترل کرد. اما نصب STATCOM و HSFCL بر عملکرد رله دیستانس تاثیر می‌گذارد و باید مورد توجه قرار گیرد.

در این مقاله ساختار STATCOM و HSFCL، عملکرد هر یک و تاثیر نصب این دو بر عملکرد رله دیستانس بررسی شده و شرایط مختلف مورد بحث قرار گرفته است. RHSFCL و LHSFCL ساختارهای مختلفی از HSFCL می‌باشد که عملکرد هر یک در محدود کننده جریانی خطا بررسی شده است. HSFCL را می‌توان قبل یا بعد از PT نصب کرد که هر دو حالت بر عملکرد رله دیستانس تاثیر دارد. فاصله بین STATCOM و محل وقوع خطا، محل نصب STATCOM و تنظیمات آن،

$$V_{HSFCL} = Z_{HSFCL} I \quad (۳)$$

### STATCOM-۲-۲

STATCOM نوعی از ادوات FACTS است که به صورت موازی به سیستم وصل می‌شود. STATCOM ولتاژ ورودی ( $V_{dc}$ ) را به ولتاژ خروجی سه فاز با دامنه، فرکانس و فاز مورد نظر تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر، ولتاژ خروجی اینورتر باید در شرایط همگام با ولتاژ سیستم تحت هر شرایطی باشد. شماتیک کلی STATCOM در شکل (۳) نشان داده شده است. در STATCOM وقتی دامنه ولتاژ خروجی ( $V_o$ ) از ولتاژ سیستم ( $V_{ac}$ ) بیشتر می‌باشد جریان ( $I_{sh}$ ) از مبدل به سیستم AC تزریق می‌شود و STATCOM توان راکتیو تولید می‌کند، اگر دامنه ولتاژ خروجی ( $V_o$ ) از ولتاژ سیستم ( $V_{ac}$ ) کمتر باشد جریان ( $I_{sh}$ ) از سیستم AC به مبدل تزریق می‌شود و STATCOM مصرف کننده توان راکتیو است، اگر دامنه ولتاژ خروجی با ولتاژ سیستم برابر باشد، مقدار تولید یا مصرف توان راکتیو صفر خواهد بود [۲۸ و ۲۹].



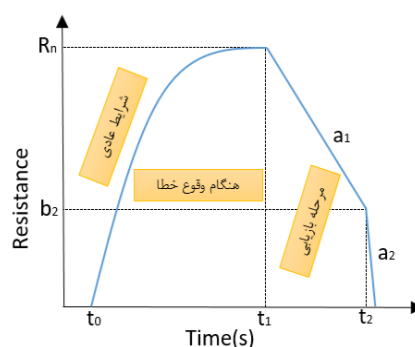
شکل ۳- STATCOM به صورت منبع ولتاژ [۲۸]

### ۳-تاثیر HSFCL و STATCOM بر رله دیستانس

محل نصب HSFCL و STATCOM عاملی است که بر امپدانس اندازه گیری شده توسط رله دیستانس تاثیر می‌گذارد. دو مکان ممکن برای نصب HSFCL و دو حالت ممکن برای نصب STATCOM امکان پذیر می‌باشد که در شکل (۴-الف) قابل مشاهده می‌باشد. مکان نصب HSFCL را می‌توان قبل و بعد از PT در نظر گرفت، همچنین مکان ممکن برای نصب STATCOM می‌توان بین محل خط و رله دیستانس یا محل خط و باس دور باشد.

رابطه (۴) به ترتیب روند محاسبه امپدانس دیده شده توسط رله‌های دیستانس را بیان می‌کند [۱۰].

رابطه (۱) مشخصه رفتار المان ابرسانا در زمان‌های مختلف را نمایش می‌دهد که این مشخصه به صورت تجربی به دست آمده است:



شکل ۲- مقادیر مختلف HTS در زمان‌های مختلف

$$R_{HTS}(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ R_n [1 - \exp(-(t - t_0)/T_F)]^{1/2} & t_0 \leq t < t_1 \\ a_1(t - t_1) + b_1 & t_1 \leq t < t_2 \\ a_2(t - t_2) + b_2 & t \geq t_2 \end{cases} \quad (۱)$$

که در آن  $t_0$ ،  $t_1$  و  $t_2$  به ترتیب لحظه خاموش شدن HTS، زمان حذف شدن خط از بخش HTS یا زمان شروع اولین مرحله بازیابی HTS و زمان شروع دومین مرحله بازیابی HTS می‌باشند،  $R_n$  حداکثر مقاومت HTS بعد از خاموش شدن،  $T_F$  ثابت زمانی HTS،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  ضرایب مقدار شیب منفی کاهش مقاومت در دو مرحله بازیابی و  $b_1$ ،  $b_2$  ضرایب برابر مقاومت ابرسانا در لحظه  $t_1$ ،  $t_2$  می‌باشند.

رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۲) بازنویسی کرد تا مقدار امپدانس کل HSFCL به دست آید:

$$Z_{HSFCL} = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ R_{HTS}(t) P Z_{CLP} & t_0 \leq t < t_{CB} \\ Z_{CLP} (R_{CLP} \text{ or } X_{CLP}) & t \geq t_{CB} \end{cases} \quad (۲)$$

همانطور که از رابطه (۲) مشخص است محدود ساز جریان دارای امپدانس مشخصی نمی‌باشد و بر اساس زمان متغیر می‌باشد. امپدانس شاخه محدودساز جریان را می‌توان به صورت مقاومتی ( $R_{CLP}$ ) یا به صورت اندوکتانسی ( $X_{CLP}$ ) پیاده سازی کرد که در این مقاله هر دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است. اصول عملکرد FCL مبتنی بر وارد کردن یک امپدانس هنگام وقوع خطا می‌باشد، بنابراین می‌توان بیان کرد که افت ولتاژ دو سر FCL با جریان عبوری از آن رابطه مستقیم دارد که با در نظر گرفتن این امر می‌توان رابطه (۳) را بیان کرد:

$$\frac{V_i^{(1)} - \alpha V_i^{(2)}}{I_j^{(1)} - \alpha I_j^{(2)}} = \frac{V_i^{(A)} - V_i^{(B)}}{I_j^{(A)} - I_j^{(B)}} \quad (10)$$

$$\frac{I_i^{(1)} - \alpha I_i^{(2)}}{I_j^{(1)} - \alpha I_j^{(2)}} = \frac{I_i^{(A)} - I_i^{(B)}}{I_j^{(A)} - I_j^{(B)}}$$

$$\alpha = 1R120^\circ$$

همچنین با جمع بندی روابط و با توجه به شکل (۴-ج) می توان مقدار  $Z_{M(A-B)}$  به صورت رابطه (۱۱) به دست آورد:

$$Z_{M(A-B)} = xZ_{L}^{(1)} + R_F \frac{I_F^A - I_F^B}{I_M^A - I_M^B} + \frac{V_{HSFCL}^{(A)} - V_{HSFCL}^{(B)}}{I_{sh}^A - I_{sh}^B} + x d Z_L^{(1)} \frac{I_{sh}^A - I_{sh}^B}{I_M^A - I_M^B} \quad (11)$$

مقدار متناسب متغیر  $d$  در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. روابط (۹) و (۱۱) نشان دهنده امپدانس اندازه گیری شده توسط رله دیستانس برای خطاهای مختلف در حضور HSFCL و STATCOM می باشند. این امپدانس ها دارای چهار مولفه به شرح زیر می باشند:

اولین مولفه ( $\Delta Z_{Actual}$ ) مربوط به مقدار امپدانس توالی مثبت خط انتقال از نقطه نصب رله تا محل وقوع خطا می باشد. این مولفه تاثیر پذیر از امپدانس خط بوده و از تجهیزات HSFCL و STATCOM تاثیر نمی گیرد، بنابراین حضور این تجهیزات یا مکان نصب این تجهیزات تاثیری بر مقدار این مولفه ندارد.

دومین مولفه ( $\Delta Z_{RF}$ ) تغییرات امپدانس ایجاد شده ناشی از مقاومت خطا را نشان می دهد. علاوه بر مقدار مقاومت خطا، جریان باس های دور و نزدیک، بر این مولفه اثر می گذارند. همچنین در شرایط یکسان میزان امپدانس اضافه شده ناشی از این مولفه قبل و بعد از نصب تجهیزات HSFCL و STATCOM یکسان نیست زیرا با نصب این تجهیزات جریان عبوری از مقاومت خطا تغییر می کند که نتیجه آن تغییر افت ولتاژ دو سر مقاومت خطا و در نتیجه تغییر امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله دیستانس می باشد. سومین مولفه ( $\Delta Z_{HSFCL}$ ) اثر مستقیم HSFCL بر امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله دیستانس را نشان می دهد. مقدار این امپدانس به ولتاژ دو سر محدود کننده در فازی که خطا رخ داده، وابسته است.

$$Z_{m(Q-G)} = \frac{V_{Relay}}{I_{Relay}} = \frac{V_Q}{I_Q + KI_0}$$

$$Z_{m(Q-Q)} = \frac{V_{Relay}}{I_{Relay}} = \frac{V_{Q-Q}}{I_{Q-Q}} \quad (4)$$

$$K = \frac{Z_L^{(0)} - Z_L^{(1)}}{Z_L^{(1)}}$$

که در آن  $Q$  نشان دهنده فازهای  $a, b, c$ ،  $I_0$  جریان توالی صفر،  $Z_L^{(0)}, Z_L^{(1)}$  به ترتیب امپدانس توالی مثبت و صفر،  $K$  ضریب جبران سازی توالی صفر و  $V_{Relay}, I_{Relay}$  ولتاژ و جریان مناسب برای تحریک رله می باشد [۳۰]. فرض می شود که HSFCL بعد از PT و STATCOM بین خطا و رله به سیستم متصل شده باشد. در رابطه (۴) از توالی مثبت و صفر استفاده شده است، برای به دست آوردن این توالی ها در شکل (۴-ب) قانون KVL اعمال می شود، که در نهایت رابطه (۵) حاصل می شود.

$$V_M^{(1)} = V_{HSFCL}^{(1)} + Z_{L1}^{(1)} I_L^{(1)} + Z_{L2}^{(1)} (I_L^{(1)} + I_{sh}^{(1)}) + R_f I_f^{(1)}$$

$$V_M^{(0)} = V_{HSFCL}^{(0)} + Z_{L1}^{(0)} I_L^{(0)} + Z_{L2}^{(0)} (I_L^{(0)} + I_{sh}^{(0)}) + R_f I_f^{(0)} \quad (5)$$

$$V_M^{(2)} = V_{HSFCL}^{(2)} + Z_{L1}^{(2)} I_L^{(2)} + Z_{L2}^{(2)} (I_L^{(2)} + I_{sh}^{(2)}) + R_f I_f^{(2)}$$

همچنین روابط (۶)، (۷) و (۸) در [۹] اثبات شده است.

$$V_M^A = V_M^{(1)} + V_M^{(2)} + V_M^{(0)}$$

$$V_{HSFCL}^A = V_{HSFCL}^{(1)} + V_{HSFCL}^{(2)} + V_{HSFCL}^{(0)} \quad (6)$$

$$I_M^A = I_M^{(1)} + I_M^{(2)} + I_M^{(0)}$$

$$I_F^A = I_F^{(1)} + I_F^{(2)} + I_F^{(0)} = 3I_F^{(1)} \quad (7)$$

$$Z_L^{(1)} = Z_L^{(2)}$$

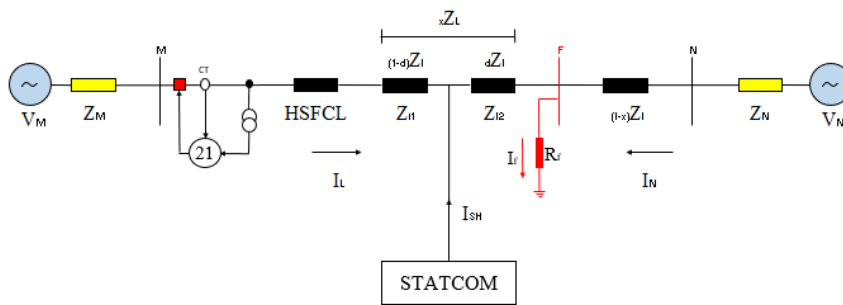
$$Z_{L1} = x(1-d)Z_L$$

$$Z_{L2} = x d Z_L \quad (8)$$

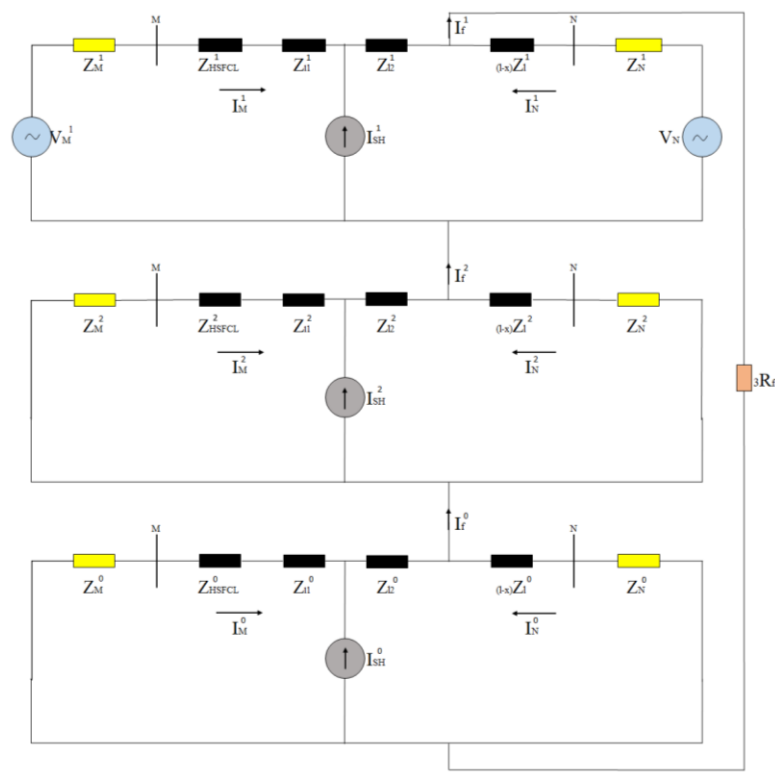
با جمع بندی روابط (۴) تا (۸)، برای  $Z_{M(A-G)}$  رابطه (۹) به دست می آید.

$$Z_{M(A-G)} = xZ_L^{(1)} + \frac{R_F I_F}{I_M^A + KI_M^0} + \frac{V_{HSFCL}^{(A)}}{I_M^A + KI_M^0} + dx \left( \frac{Z_L^{(1)} I_{sh}^A + (Z_L^0 - Z_L^1) I_{sh}^0}{I_M^A + KI_M^0} \right) \quad (9)$$

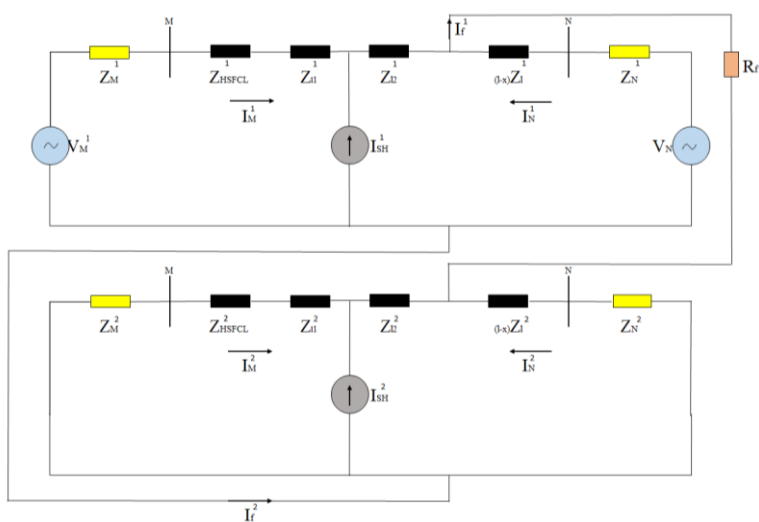
با توجه به مبانی مولفه های متقارن رابطه (۱۰) هم معتبر می باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-الف: سیستم مورد مطالعه متصل به HSFCL و STATCOM، ب: دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه برای خطای تکفاز، ج: دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه برای خطای دوفاز

#### ۴- نتایج شبیه سازی

سیستم شکل (۴) در PSCAD / EMTDC شبیه سازی شده و حالت‌های مختلف از نظر مکان قرار گیری المان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات شبکه شبیه سازی شده در جدول ۱ ذکر شده است [۱۰].

#### ۴-۱- تاثیر STATCOM و HSFCL بر اندازه جریان خطا

شکل (۵) جریان عبوری از رله هنگامی که خطای تکفاز در سیستم رخ می‌دهد را برای حالت‌های ممکن ساخت HSFCL و تاثیر نصب STATCOM نشان می‌دهد. در این شکل اگر امپدانس شاخه محدود کننده جریان خطا به صورت مقاومتی پیاده سازی شود RHSFCL نام‌گذاری شده و در صورتی که این شاخه به صورت اندوکتانسی پیاده سازی شود، LHSFCL نام‌گذاری می‌شود.

از شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که تجهیز سیستم به STATCOM باعث افزایش سطح جریان اتصال کوتاه می‌شود که با خط بنفش در این شکل نشان داده شده است. همچنین عملکرد دو نوع محدود کننده در حالت ماندگار یکسان می‌باشد، اما در سیکل‌های اولیه عملکرد RHSFCL بهتر بوده و جریان خطا را بهتر محدود می‌کند. در واقع محدود کننده جریان خطای مقاومتی مولفه DC را به طور موثرتری محدود می‌کند از طرفی با توجه به LHSFCL خاصیت سلفی دارد، بنابراین با باز شدن کلید و انتقال جریان به شاخه ی موازی، سلف با تغییرات جریان مخالفت کرده و باعث ایجاد اضافه ولتاژی در دو سر محدود کننده می‌شود. در نتیجه باعث کاهش جریان و بروز اغتشاشات می‌شود. در ادامه مقاله حالت RHSFCL را در نظر گرفته و شرایط مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲- تاثیر مکان نصب HSFCL بر محاسبه امپدانس اندازه گیری شده توسط رله دیستانس

شکل (۶) تاثیر نصب HSFCL را قبل و بعد از PT در حضور STATCOM به نمایش می‌گذارد. در شکل (۶) نصب HSFCL بعد از PT با خط قرمز و نصب HSFCL قبل از PT با خط زرد، برای خطای تک فاز با شرایط نصب STATCOM در ۴۰ km خط و وقوع خطا در ۶۰ km خط، نمایش داده شده است. قابل مشاهده است که با نصب HSFCL بعد از PT مقدار امپدانس دیده شده افزایش می‌یابد و سیر خط امپدانس به سمت بالا انتقال داده

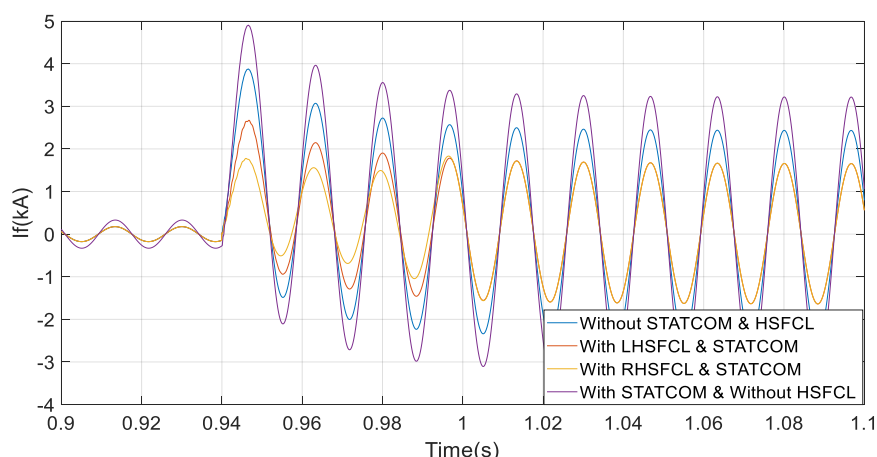
با در نظر گرفتن (۳) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار این مولفه به امپدانس HSFCL وابسته است، امپدانس HSFCL هم وابسته به تکنولوژی ساخت محدود کننده جریان می‌باشد. اما موضوع دیگری که باید مورد نظر قرار گیرد مکان نصب HSFCL می‌باشد. زمانی که HSFCL قبل از PT نصب می‌شود، افت ولتاژ دو سر HSFCL بر رله دیستانس تاثیر نمی‌گذارد و این مولفه از مقدار امپدانس اندازه گیری شده توسط رله حذف می‌شود.

چهارمین مولفه این رابطه ( $\Delta Z_{STATCOM}$ ) اثر مستقیم STATCOM بر امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله دیستانس را به نمایش می‌گذارد. مقدار این مولفه به جریان تزریقی توسط جبران‌ساز و همچنین محل نصب STATCOM مرتبط است. با تغییر محل نصب STATCOM که منجر به تغییر پارامتر  $d$  می‌شود مقدار این مولفه تغییر پیدا می‌کند. اما اگر نصب STATCOM بین محل خطا و باس دور باشد در این شرایط در حلقه بین رله دیستانس و خطا قرار نمی‌گیرد که در نتیجه مقدار این مولفه صفر خواهد بود و تاثیری مستقیم بر امپدانس اندازه گیری شده نخواهد داشت، در این شرایط STATCOM تاثیر غیر مستقیم بر مقدار جریان  $I_N$  خواهد داشت که با توجه به تاثیر کم این مولفه در محاسبه امپدانس مورد نظر، این مقدار قابل چشم پوشی می‌باشد.

جدول (۱): اطلاعات سیستم پیاده سازی شده

$E_M$	$230kV \angle 10^\circ$
$E_N$	$230kV \angle 0^\circ$
طول خط	$100km$
فرکانس	$60Hz$
امپدانس $E_M$	$Z_{11} = 0/238 + j5/72\Omega$ $Z_{10} = 2/738 + j10\Omega$
امپدانس $E_N$	$Z_{11} = 0/238 + j6/19\Omega$ $Z_{10} = 0/833 + j5/12\Omega$
امپدانس خط	$R_0 = 0/275\Omega, L_0 = 3/725mH$ $R_1 = 0/0275\Omega, L_1 = 1/345mH$ $C_1 = 9/483nF, C_0 = 6/711nF$
مقدار المان ابرسانا	$T_F = 0/01s, a_1 = -80s^{-1},$ $a_2 = -160s^{-1}$ $R_n = b_1 = 2*b_2 = 10\Omega,$ $X_{CLP} = 8/6\Omega, R_{CLP} = 13/5\Omega$
STATCOM	$100MVAR$

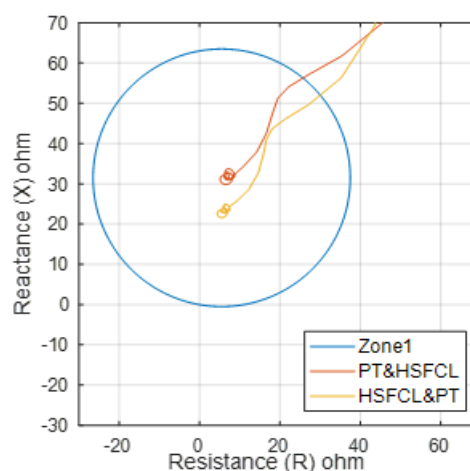
می‌شود. این شرایط با توجه با رابطه (۹) و توضیحات سومین مولفه آن اثبات می‌شود.



شکل ۵- جریان اتصال کوتاه عبوری برای سه حالت: قبل از نصب HSFCL، بعد از نصب RHSFCL و LHSFCL

و خطا در ۵۰ km باس M رخ دهد. شکل (۹) حالتی را نشان می‌دهد که STATCOM در ۲۰ km باس M نصب شود و خطا در ۳۰ km باس M رخ دهد. در شبیه سازی شکل‌های (۷) تا (۹) مقاومت خطا بسیار ناچیز و نزدیک به صفر فرض شده است. شکل (۱۰) مقادیر مختلف مقاومت خطا را برای حالتی که STATCOM و HSFCL در شبکه نصب باشند را به نمایش می‌گذارد. در این حالت با افزایش مقدار مقاومت خطا سیر خط امیدانس به بالا انتقال داده می‌شود که در نهایت وقوع خطا در مقدار مقاومت ۴۵ اهم را سیستم حفاظتی تشخیص نداده است. دلیل جابه‌جایی عمودی سیر خط امیدانسی، نصب STATCOM می‌باشد که راکتانس امیدانس محاسبه شده را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکل (۱۲) خطای دو فاز AB را برای حالتی که STATCOM در ۳۰ km از باس M نصب شده و خطا در ۶۰ km از باس M رخ دهد، به نمایش گذاشته است. در این شکل قابل مشاهده است که با افزایش فاصله نصب STATCOM و افزایش فاصله محل خطا مقدار امیدانس محاسبه شده، افزایش یافته است.

با مقایسه شکل‌های (۷) تا (۱۰) برای خطای تک‌فاز و شکل‌های (۱۱) و (۱۲) برای خطای دو فاز تاثیر نصب HSFCL و STATCOM بر شبکه قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که در معادلات (۹) و (۱۱) نمایش داده شده است، اضافه کردن این تجهیزات باعث اضافه شدن مقدار امیدانس محاسبه شده می‌شود که مقدار این امیدانس وابسته به محل خطا و محل نصب STATCOM می‌باشد که در حالت‌ها و مکان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



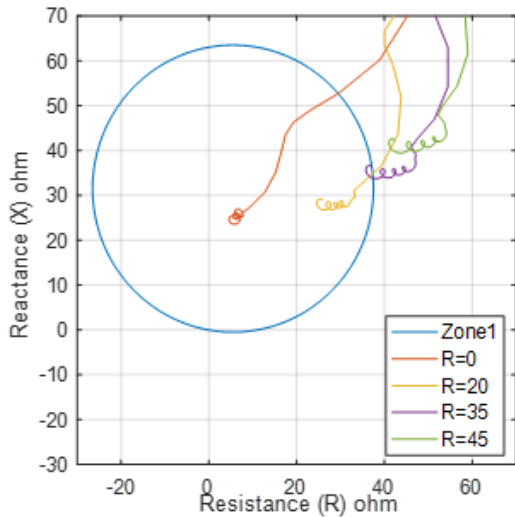
شکل ۶- تاثیر مکان HSFCL بر سیر خط امیدانسی

۴-۳ امیدانس اندازه گیری شده توسط رله دیستانس در شرایط مختلف

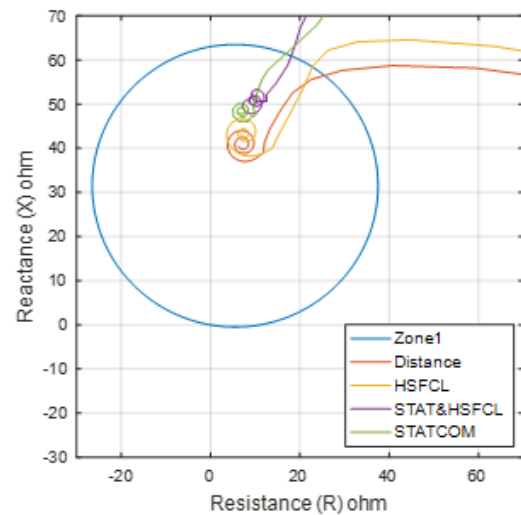
شکل‌های (۷) تا (۱۲) نتایج شبیه سازی را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل‌ها خط بنفش حالتی را نشان می‌دهد که در سیستم STATCOM و HSFCL نصب باشند. خط زرد حالتی را نشان می‌دهد که فقط HSFCL در سیستم نصب شود و STATCOM نصب نشود. خط سبز حالتی را نشان می‌دهد که STATCOM در سیستم نصب شده و از HSFCL استفاده نشود. خط قرمز نشان دهنده عملکرد رله دیستانس بدون حضور STATCOM و HSFCL می‌باشد.

در شکل (۷) نتیجه حالتی را به نمایش می‌گذارد که STATCOM در ۴۰ km باس M نصب شده و خطا در ۸۰ km باس M رخ داده است. شکل (۸) حالتی را نشان می‌دهد که STATCOM در ۴۰ km باس M نصب شود

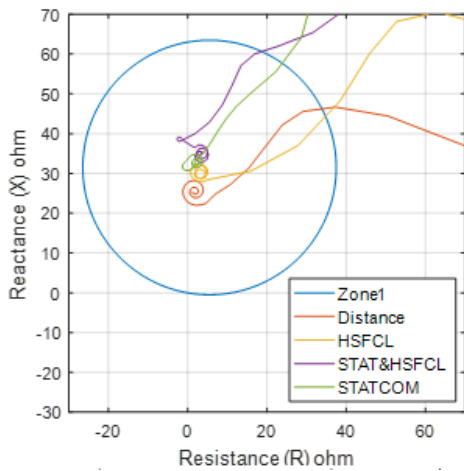




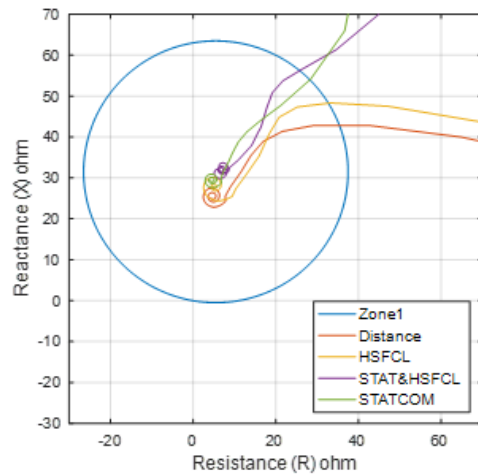
شکل (۱۰): فاصله نصب STATCOM از رله ۲۰ km و فاصله وقوع خطا از رله ۵۰ km



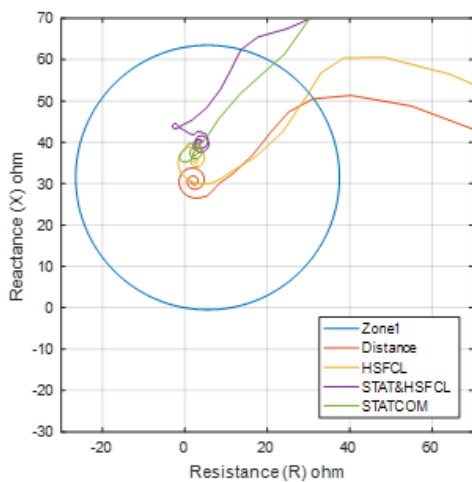
شکل ۷- فاصله نصب STATCOM از رله ۴۰ km و فاصله وقوع خطا از رله ۸۰ km



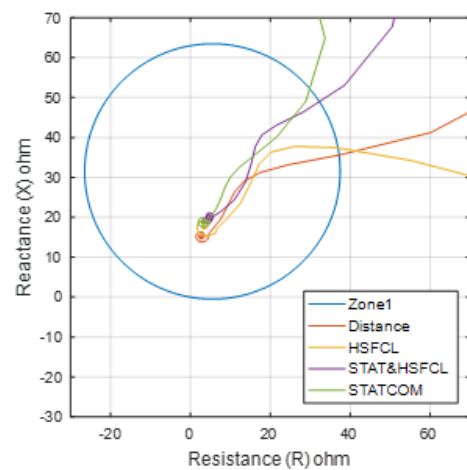
شکل (۱۱): فاصله نصب STATCOM از رله ۲۰ km و فاصله وقوع خطا از رله ۶۰ km



شکل ۸- فاصله نصب STATCOM از رله ۴۰ km و فاصله وقوع خطا از رله ۵۰ km



شکل ۱۲- فاصله نصب STATCOM از رله ۳۰ km و فاصله وقوع خطا از رله ۶۰ km



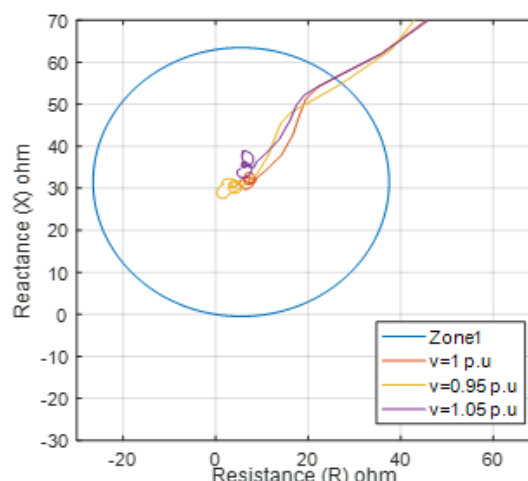
شکل ۹- فاصله نصب STATCOM از رله ۲۰ km و فاصله وقوع خطا از رله ۳۰ km

جریان  $I_{sh}$  تزریق می‌کند بنابراین مقدار مولفه چهارم معادلات (۹) و (۱۱) مثبت خواهد بود که باعث اضافه شدن مقدار امپدانس محاسبه رله دیستانس می‌شود که این حالت با خط بنفش در شکل (۱۳) نمایش داده شده است، اما زمانی که  $V_{ref} = 0.95$  می‌باشد STATCOM از شبکه جریان می‌کشد (جهت جریان بر عکس شده)، یا به عبارت دیگر مقدار مولفه چهارم معادلات (۹) و (۱۱) منفی می‌باشد که باعث کم شدن مقدار امپدانس محاسبه رله دیستانس می‌شود که این حالت با خط زرد در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.

جدول ۲ امپدانس نهایی اندازه‌گیری شده توسط رله دیستانس در شرایط مختلف و درصد تغییرات امپدانس اندازه‌گیری شده با نصب HSFCL و STATCOM را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۲ قابل مشاهده است نصب STATCOM و HSFCL باعث افزایش مقدار امپدانس محاسبه شده می‌شود. مقدار تغییرات امپدانس محاسبه شده، به محل نصب STATCOM و HSFCL مرتبط بوده و با افزایش فاصله بین محل نصب STATCOM و محل وقوع خطا، درصد افزایش امپدانس محاسبه شده نیز افزایش می‌یابد.

#### ۴-۴ امپدانس اندازه‌گیری شده در مدهای کاری مختلف STATCOM

در شکل (۱۳) حالت‌های مختلف تنظیم STATCOM و تاثیر این تنظیمات بر روی رله دیستانس قابل مشاهده هست در این شکل  $V_{ref} = 1.05$  حالت خازنی STATCOM را نشان می‌دهد و  $V_{ref} = 0.95$  حالت سلفی STATCOM را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۳- تنظیمات مختلف STATCOM

زمانی که  $V_{ref} = 1.05$  می‌باشد STATCOM به شبکه

جدول (۲): امپدانس نهایی اندازه‌گیری شده توسط رله دیستانس در شرایط مختلف

امپدانس محاسبه شده در شبکه دارای STATCOM و HSFCL (درصد افزایش)	امپدانس محاسبه شده در شبکه دارای HSFCL (درصد افزایش)	امپدانس محاسبه شده در شبکه دارای STATCOM (درصد افزایش)	امپدانس محاسبه شده در شبکه بدون STATCOM و HSFCL	محل نصب STATCOM (km)	محل خطا (km)	نوع خطا
$10 + j 50$ (25/8%)	$9 + j 45$ (14/3%)	$9 + j 48$ (17/4%)	$8 + j 40$	۴۰	۸۰	AG
$7 + j 31$ (26/8%)	$4 + j 27$ (15/3%)	$5 + j 29$ (17/2%)	$4 + j 24$	۴۰	۵۰	AG
$4 + j 21$ (31/9%)	$3 + j 18$ (15/1%)	$3 + j 19$ (19/2%)	$2 + j 16$	۲۰	۳۰	AG
$4 + j 35$ (30%)	$3 + j 28$ (19/8%)	$3 + j 31$ (24%)	$2 + j 25$	۲۰	۶۰	ABG
$4 + j 39$ (29/6%)	$3 + j 35$ (17%)	$3 + j 37$ (23/6%)	$2 + j 30$	۳۰	۶۰	ABG
$9 + j 48$ (37.1%)	$8 + j 39$ (11.8%)	$8.5 + j 41$ (17.6%)	$6.5 + j 35$	۴۰	۸۰	ABCG
$8 + j 36$ (21.2%)	$7.5 + j 33$ (11.2%)	$8 + j 34$ (14.8%)	$5 + j 30$	۳۰	۶۰	ABCG

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر استفاده از STATCOM و HSFCL بر روی عملکرد حفاظت دیستانس شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این مقاله، تاثیر مواردی مانند: محل نصب و تنظیمات STATCOM، محل نصب و ساختار HSFCL را بر امیدانس اندازه گیری شده، نشان می دهد. از نتایج به دست آمده این مقاله قابل مشاهده است که، استفاده از این تجهیزات باعث تغییر مقدار امیدانس محاسبه شده توسط رله دیستانس شده است. نتیجه افزایش امیدانس محاسبه شده توسط رله دیستانس برهم خوردن تنظیمات سیستم حفاظتی و افزایش امکان عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی خط را همراه خواهد داشت.

استفاده از STATCOM در کنار مزایای که به آن اشاره شد، دارای معایبی نیز می باشد که از مهمترین آنها افزایش سطح جریان اتصال کوتاه می باشد که از نتایج این مقاله قابل مشاهده می باشد. این افزایش سطح جریان باعث عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی می شود. از سوی دیگر استفاده از محدود کننده جریان علاوه بر اینکه از آسیب رسیدن به تجهیزات هنگام وقوع خطا جلوگیری می کند، بر عملکرد صحیح سیستم حفاظتی نیز تاثیر می گذارد. استفاده از این تجهیزات بدون بررسی شرایط و تاثیرات آنها، احتمال عملکرد نادرست سیستم حفاظتی را به همراه خواهد داشت.

## مراجع

- [1] SR. Hosseini, M. Karrari, H. Askarian Abyaneh, "Impedance-based out-of-step protection of generator in the presence of Statcom", Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 15, Issue. 4, December 2019, pp. 524-535.
- [2] Y. Liang, C. O. Nwankpa, "A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM", IEEE transactions on industry applications, Vol. 35, Issue. 5, 1999, pp. 1118-1123.
- [3] P. Rao, M. L. Crow, Z. Yang, "STATCOM control for power system voltage control applications", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 15, Issue. 4, 2000, pp. 1311-1317.
- [4] R. Guan, Y. Xue, XP. Zhang, "Advanced RTDS-based studies of the impact of STATCOM on feeder distance protection", The Journal of Engineering, Vol. 15, October 2018, pp. 1038-1042.
- [5] A. Safaei, M. Zolfaghari, M. Gilvanejad, G. B. Gharehpetian, "A survey on fault current limiters: Development and technical aspects", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 118, June 2020, pp. 105729.
- [6] MR. Barzegar-Bafrooei, A. Akbari Foroud, JD. Ashkezari, M. Niasati, "On the advance of SFCL: a comprehensive review", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, Issue. 17, May 2019, pp. 3745-3759.
- [7] احسان خوب، مهدی قاضی زاده احسائی، مهرداد زندی دره غریبی، "بکارگیری محدودساز جریان خطا برای کاهش زمان عملکرد رله‌ها" نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۷۱-۱۸۱
- [8] MR. Barzegar-Bafrooei, A. Akbari Foroud, "Investigation of the performance of distance relay in the presence of saturated iron core SFCL and diode bridge type SFCL", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 29, Issue. 2, February 2019, pp. 2736.
- [9] M. Ehsanipour, JS. Moghani, SH. Hosseinian, M. Saberi, "The Impact of Superconducting Fault Current Limiter Locations on Voltage Sag in Power Distribution System", AUT Journal of Electrical Engineering. Vol. 42, Issue. 2, November 2015, pp. 49-60.
- [10] MR. Barzegar-Bafrooei, A. Akbari Foroud, "Performance evaluation of distance relay in the presence of hybrid SFCL", IET Science, Measurement & Technology. Vol. 12, Issue. 5, February 2018, pp. 581-593.
- [11] J. Yang, L. Zhang, X. Wang, L. Chen, Y. Chen, "The impact of SFCL and SMES integration on the distance relay", Physica C: Superconductivity and its Applications, Vol. 530, 2016, pp. 151-159.
- [12] S. Lee, J. Lee, S. Song, J. Yoon, B. Lee, "Novel adaptive distance relay algorithm considering the operation of 154 kV SFCL in Korean power transmission system", Physica C: Superconductivity and its Applications, 2015, PP. 134-139.

- [13] M. Firouzi, G. B. Gharehpetian, B. Mozafari, "Bridge-type superconducting fault current limiter effect on distance relay characteristics", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol. 68, 2015, pp. 115–122.
- [14] B. Li, L. Chao, G. Fengrui, "Application studies on the active SISFCL in electric transmission system and its impact on line distance protection", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. Vol. 25, Issue. 2, 2015, pp. 1–9.
- [15] S. Lee, J. Lee, S. Song, et al, "Novel adaptive distance relay algorithm considering the operation of 154 kV SFCL in Korean power transmission system", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 518, 2015, pp. 134–139.
- [16] S. R. Lee, J. J. Lee, J. Yoon, et al, "Protection scheme of a 154 kV SFCL test transmission line at the KEPCO power testing center *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 27, Issue. 4, 2017, pp. 1–5.
- [17] A. Albehadili, A. O. Ikhlas, "Analysis of distance relay performance on shunt FACTS compensated transmission lines", *IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, 2015, pp. 188-193.
- [18] X. Y. Zhou, H. F. Wang, R. K. Aggarwal, P. Beaumont, "The impact of STATCOM on distance relay", 15th PSCC, Liege, Session 19, Paper 4,2005.
- [19] R. Dubey, S. R. Samantaray, B. K. Panigrahi, "Adaptive distance protection scheme for shunt-FACTS compensated line connecting wind farm", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, Issue. 1, 2016, pp. 247–256.
- [20] R. R. Mishra, P. Tripathi. "Effect of PV-STATCOM on Distance Protection", In 2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), December 2020, pp. 1-6.
- [21] E. A. Mohamed, Y. S. Qudaih, Y. Mitani, "Power system stability improvement using STATCOM and RSFCL during grid faults", 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016, pp. 1-6.
- [22] J. Barati, S. G. Seifossadat, M. Joorabian, "A new adaptive coordination scheme of distance relays in DFIG-based wind farm collector lines and transmission line compensated by STATCOM", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 31, Issue. 12, 2021, pp. 13205.
- [23] R. S. Thute, H. J. Bahirat, S. A. Khaparde, P. Lubicki, S. Kodle, V. Dabeer, "Line distance protection in the presence of SCFCL", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 13, Issue. 10, 2019, pp. 1960-1969.
- [24] M. Zellagui, A. Chaghi, "Effects of shunt FACTS devices on MHO distance protection setting in 400 kV transmission line", *Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 2, Issue. 3, 2012, pp. 164-169.
- [۲۵] مسعود اسماعیلی، مصطفی صدیقی زاده، حسام یارمحمدی، " کنترل یکپارچه ژنراتور القایی، محدودکننده جریان خط و ذخیره‌ساز انرژی در مزارع بادی"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۸۷-۱۰۰
- [26] M. R. Barzegar-Bafrooei, J. Dehghani-Ashkezari, A. Akbari Foroud, H. Haes Alhelou. "The Classification of FCL: In Fault Current Limiters", Springer, Singapore, 2022, pp. 11-43.
- [27] A. K. Singh, N. Singh, A. N. Singh, "Superconducting and non-superconducting fault current limiters: the developmental journey and upcoming prospects". *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2022, pp. 1-17.
- [28] Alsammak, A. Nasser, S. Janderma, "Enhancement Effects of the STATCOM on the Distance Relay Protection", *International Journal of Computer Applications*, Vol 975, 2019, pp. 8887.
- [29] M. Mbae, N. Nwulu, "Impact of hybrid FACTS devices on the stability of the Kenyan power system", *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, Vol. 12, no. 1, 2022.
- [۳۰] زهرا مروج، مجتبی قرجه لو، کاظم مظلومی، " هماهنگی بهینه رله‌های دیستانس و اضافه جریان جهت با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۲۰۱-۲۱۶.