بسم اللہ الرحمن ارحیم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی کاربرد محدود کننده جریان خطا در شبکه انتقال برق منطقه ای فارس

استاد راهنما:

دکتر مجتبی پیشوایی

دانشجو:

مجید سیف اللهی

بهمن ۱۳۸۹

تاریخ: ۱۳۸۹/۱۲/۰۲
شماره: ۶۵۴۹/۳۷۵۸
پیوست: .....

دانشگاه تفرش
مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی : مجید سیف الهی شماره دانشجویی : ۸۶۲۱۲۲۰۰۶ دانشکده : مهندسی برق
رشته تحصیلی/گرایش : مهندسی برق / قدرت

عنوان پروژه : بررسی کاربرد محدود کننده جریان خطا در شبکه انتقال برق منطقه ای فارس

تعداد واحد : ۶ تاریخ تصویب : ۸۸/۱۲/۱۰ تاریخ دفاع : ۸۹/۱۱/۳۰
نمره نهایی : به عدد : ۱۸/۵ به حروف : هجده و نیم

شماره داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	محل اشتغال	امضاء
استاد راهنما	دکتر مجتبی پیشوایی	استادیار	دانشگاه تفرش	
داور خارجی	دکتر علی اصغر قدیمی	استادیار	دانشگاه اراک	
داور داخلی	دکتر فرزاد رضوی	استادیار	دانشگاه تفرش	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر فرزاد رضوی	استادیار	دانشگاه تفرش	

دانشگاه تفرش
دانشکده مهندسی برق

رئیس دانشکده : دکتر علی مددی
امضاء :
تاریخ : ۸۹/۱۲/۱۸
مهر :

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر حمید رضا دهقانپور
امضاء :
تاریخ : ۸۹/۱۲/۱۸
مهر :

چکـــــیـــــده:

در سالهای اخیر، افزایش مصرف برق در کشور موجب گسترش شبکه برق و در نتیجه احداث نیروگاه ها ، پست های برق و خطوط انتقال شده است. توسعه شبکه برق باعث بالا رفتن قدرت اتصال کوتاه و در نتیجه کافی نبودن ظرفیت اتصال کوتاه کلیدهای قدرت می شود و حتی ممکن است سایر تجهیزات موجود در یک پست برق از جمله CTها، CVTها، ترانسفورماتورها و ... با مشکل اضافه جریان اتصال کوتاه مواجه شوند. این مسئله در سالهای آینده ممکن است موجب تعویض بسیاری از تجهیزات شبکه برق در سطح کشور و یا باعث اعمال تغییراتی در استانداردهای برق ایران گردد.

اما در حال حاضر در دنیا راه حل دیگری نیز برای حل این مشکل پیشنهاد می شود و آن استفاده از محدودکننده های جریان خطاست.

در این پایان نامه پس از ارائه چند راه حل مختلف برای مدیریت جریان خطا در شبکه های قدرت، دو نمونه عملی استفاده شده در کشورهای چین و آمریکا مورد بررسی قرار گرفته و سپس مزایای اقتصادی کاربرد محدودکننده های جریان خطا توضیح داده شده است.

در انتهای پایان نامه، شبکه انتقال برق منطقه ای فارس به عنوان نمونه ای از یک مورد مطالعاتی که در سالهای آتی با مشکل اضافه جریان اتصال کوتاه مواجه خواهد شد، بررسی گردیده و راه حل مناسبی برای کاهش جریان اتصال کوتاه در شبکه مذکور پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: محدود کننده جریان خطا، شبکه برق منطقه ای فارس، پایداری گذرا، پدیده نوسانات زیر سنکرون

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: روش های محدود کردن جریان خطا

۱-۱) مقدمه ۱
۱-۲) روش های محدود کردن جریان خطا ۲
۱-۲-۱) روش های سنتی ۲
۱-۲-۲) تکنولوژی های جدید ۶
۱-۲-۳) تکنولوژی های دیگر ۱۵
۱-۳) مقایسه کلی روش های محدود سازی جریان خطا و چشم انداز آینده ۱۸
۱-۴) مقدمه ۱۹
۱-۵) تاثیر SCCL در شبکه قدرت شرق کشور چین ۲۰
۱-۶) کاربرد SCCL در پست وینسنت ایالت کالیفرنیای آمریکا ۲۲

فصل دوم: تحلیل اقتصادی و فنی راه حل های مدیریت جریان خطا

۲-۱) فواید محدود کردن جریان خطا ۳۵
۲-۲) تحلیل اقتصادی برای راه حل های سنتی ۳۷
۲-۲-۱) داده های هزینه ۳۹
۲-۳) مکان های نصب FCL ۴۲
۲-۳-۱) اتصال ژنراتور ۴۳
۲-۳-۲) ارتباط بین دو شبکه ۴۴
۲-۳-۳) باس کوپلر ۴۵
۲-۳-۴) فیدر ترانسفورماتور ۴۶
۲-۳-۵)واحد تولید پراکنده ۴۶
۲-۴) تحلیل اقتصادی تجهیزات خاص ۴۷
۲-۴-۱) ترانسفورماتورهای قدرت ۴۷
۲-۴-۲) بریکرها ۴۹
۲-۵) تحلیل اقتصادی برای FCLها ۴۹
۲-۵-۱) FCLهای حالت جامد ۴۹
۲-۵-۲) FCLهای ابر رسانا ۵۲

فصل سوم: بررسی امکان نصب FCL در شبکه انتقال برق منطقه ای فارس

۳-۱) مقدمه ۵۹
۳-۲) مقایسه انواع FCLهای مبتنی بر ادوات FACTS ۶۰
۳-۲-۱) راکتور کنترل شونده با تریستور (TCR) ۶۱
۳-۲-۲) کنترل کننده توان میان- فاز (IPC) ۶۱
۳-۲-۳) ادوات FACTS مبتنی بر VSC ۶۱
۳-۲-۴) محدود کننده نوع هیبرید با قابلیت جبرانسازی سری ۶۲
۳-۲-۵) FCL رزونانسی سری ۶۲
۳-۳) ساختار ، شرح و شبیه سازی FCL رزونانسی سری ۶۲

۳-۳-۱) اساس عملکرد SCCL ۶۳
۳-۳-۲) شبیه سازی و نتایج ۶۷
۳-۴) مقادیر اتصال کوتاه در شبکه برق منطقه ای فارس ۷۰
۳-۵) مقایسه اقتصادی نصب FCL رزونانسی سری با روش سنتی تعویض تجهیزات شبکه ۷۰
۳-۶) نتیجه گیری اقتصادی ۷۴
۳-۷) اثر محدود کننده رزونانسی در پایداری سیستم ۷۴
۳-۷-۱) بررسی پایداری گذرا در شبکه برق فارس در صورت نصب FCL رزونانسی سری ۷۵
۳-۸) بررسی پدیده نوسانات زیر سنکرون در شبکه در صورت نصب FCL رزونانسی سری ۷۸
۳-۸-۱) پدیده SSR در شبکه برق منطقه ای فارس در صورت نصب FCL رزونانسی سری ۷۹
۳-۸-۲) نتیجه گیری جهت پدیده SSR ۸۳
فصل چهارم: بحث، نتیجه گیری و پیشنهادها ۸۴
۴-۱) بحث ۸۴
۴-۲) نتیجه گیری ۸۵
۴-۳) پیشنهادها ۸۵
منابع و مراجع ۸۷

پیش گفتار

امروزه افزایش مصرف برق یکی از شاخص های پیشرفت و توسعه در جهان محسوب می شود. این موضوع باعث افزایش تولید و به هم پیوستگی شبکه های برق در جهان شده است. پیامد طبیعی این امر، افزایش قدرت اتصال کوتاه شبکه خواهد بود تا حدی که ممکن است مقادیر نامی ظرفیت اتصال کوتاه در شبکه، دیگر پاسخگوی سطح اتصال کوتاه شبکه نباشد.

در این شرایط، اولین راه حلی که به ذهن می رسد، جایگزینی تجهیزات شبکه با تجهیزاتی است که تحمل مقادیر اتصال کوتاه بالاتر را دارند. اما این کار، بسیار زمان بر است و علاوه بر این منجر به صرف هزینه های فراوان خواهد شد. اگر بتوان جریان های اتصال کوتاه در شبکه را به مقادیر کمتری در حد تحمل ظرفیت اتصال کوتاه تجهیزات موجود کاهش داد، دیگر نیازی به تعویض این تجهیزات نخواهد بود. یکی از روش های کاهش جریان خطا، استفاده از محدود کننده های جریان خطا (FCL) در شبکه قدرت است. عملکرد محدود کننده های جریان خطا، وارد کردن یک امپدانس بزرگ به صورت سری در حین خطا و در نتیجه کاهش جریانهای اتصال کوتاه می باشد در حالی که در شرایط کارکرد عادی شبکه، FCL ها امپدانس بسیار کوچکی از خود نشان می دهند و تاثیر چندانی بر روی کارکرد عادی شبکه ندارند.

در سال های اخیر، پیشرفت در زمینه های تجهیزات ابررسانا و همچنین ادوات الکترونیک قدرت، موجب ارایه FCLهایی با سرعت عملکرد بالا در حین خطا و در عین حال قیمت های مناسب شده است.

تا کنون استفاده از FCLهای ابررسانا در سطح ولتاژهای انتقال به دلیل هزینه های بالای آن ، کاربرد عملی نداشته و به نظر می رسد استفاده از این نوع FCL در سطح ولتاژهای بالاتر از ۲۰ کیلوولت با محدودیتهای اقتصادی مواجه است.البته اخیرا چند شرکت آمریکایی جهت نصب آزمایشی چند دستگاه FCL ابررسانا در سطح ولتاژ ۱۳۸ کیلوولت به توافق رسیده اند که این FCLها در سال ۲۰۱۲ در ایالت

های کالیفرنیا و اوهایوی آمریکا نصب خواهد شد. شرکت Zenergy نیز از نصب آزمایشی یک دستگاه FCL ابررسانا در سال جاری (۲۰۱۱) خبر داده است.

رشد سریع ادوات الکترونیک قدرت موجب پیشرفت FCLهای حالت جامد و کاربرد آن ها در سطح ولتاژهای انتقال شده است. در واقع استفاده از FCLهای حالت جامد در سطح ولتاژهای بالاتر از ۶۶ کیلوولت سابقه بیشتری نسبت به FCLهای ابررسانا دارد. از جمله این موارد، نصب FCL هیبرید با قابلیت جبرانسازی سری در سطح ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت در ایالت کالیفرنیای آمریکا و همچنین استفاده از FCL رزونانسی سری در شبکه ۵۰۰ کیلوولت شرق کشور چین است که هر دوی این موارد در این پایان نامه شرح داده شده است.

این پایان نامه، در فصل اول به بررسی روش های سنتی و جدید مقابله با افزایش جریان های اتصال کوتاه می پردازد.

در فصل دوم، دو نمونه عملی کاربرد موفق FCLهای حالت جامد در کشورهای چین و آمریکا در سطح ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت بررسی شده است.

فصل سوم، مزایای اقتصادی کاربرد FCL و مقایسه آن با روش های دیگر مدیریت جریان خطا را بیان می کند.

در فصل چهارم، شبکه انتقال برق منطقه ای فارس به عنوان یک مورد مطالعاتی که در سال های آینده با مشکل اضافه جریان اتصال کوتاه مواجه خواهد شد، بررسی و FCL رزونانسی سری جهت حل این مشکل پیشنهاد شده است. پس از بررسی مزایای اقتصادی نصب این نوع FCL در شبکه مورد اشاره، تاثیر آن در افزایش پایداری گذرای سیستم و همچنین امکان بروز و نحوه مقابله با پدیده نوسانات زیر سنکرون به اجمال بررسی شده است.

فصل پنجم نیز شامل خلاصه ای از نتایج بدست آمده در این پایان نامه به همراه پیشنهاد هایی جهت ادامه این پروژه و سایر پروژه های مشابه است.

فصل اول

روش های محدود کردن جریان خطا

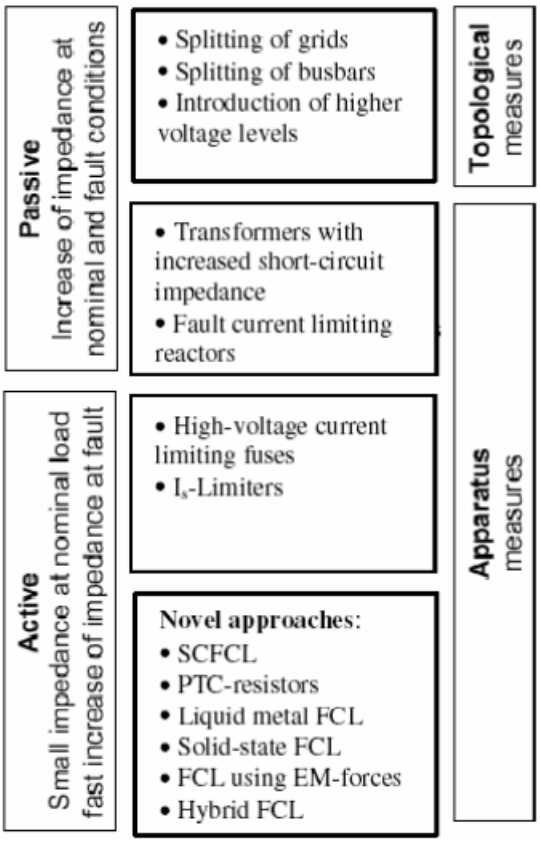
۱-۱) مقدمه

در سالهای اخیر افزایش تولید در شبکه های پربار از یک طرف و ارتباط بین سیستمها (ایجاد شبکه های رینگ) از طرف دیگر موجب افزایش قدرت اتصال کوتاه شده است. اگر مقادیر نامی جریان اتصال کوتاه تجهیزات به خصوص در شبکه های فشار قوی جوابگوی قدرت اتصال کوتاه نباشد، بسیاری از تجهیزات مانند ترانسفورماتورها، بریکرها، کلیدها، CTها، CVTها، باسبارها، مقره ها و حتی سیستم زمین می بایست جایگزین یا آپگرید شوند که این کارها بسیار هزینه بر و در عین حال زمان بر هستند.

در هرحال، خطا در شبکه های قدرت اجتناب ناپذیر است. جدای از آسیبهای ناشی از خطا برای مثال در اثر جرقه های الکتریکی، جریانهای خطای گذرنده از منبع تا محل خطا منجر به فشارهای مکانیکی و گرمایی در تجهیزاتی که در مسیر قرار دارند می شود.

۱-۲) روش های محدود کردن جریان خطا

خلاصه ای از روش های محدود کردن جریان خطا در شکل ۱-۱ آورده شده است. روش های پسیو استفاده از امپدانس بالا را در همه حالتها چه در شرایط خطا و چه در حالت کار عادی شبکه به کار می گیرد در حالی که روش های اکتیو، امپدانس بالا را تنها در شرایط خطا فعال می کند. همین طور می توان روش ها را به دو صورت تغییر آرایش شبکه یا تعویض تجهیزات تقسیم بندی کرد. علاوه بر این می توان روش ها را به دو صورت سنتی و جدید تقسیم بندی نمود. [۱]



شکل ۱-۱ خلاصه ای از روش های محدودسازی جریان خطا

۱-۲-۱) روش های سنتی

برخی از راه حل های سنتی به صورت زیر آورده شده است [۱]: (روش های سنتی معمولاً هزینه بر هستند)

- تقسیم بندی و چند تکه کردن شین: این روش مستلزم جداسازی منابعی است که می تواند جریان خطا را توسط باز شدن یک باس کوپلر در حالت عادی بسته تغذیه کند یا جداسازی شین های موجود، این روش

به طور مؤثری تعداد منابعی که خطا را تغذیه می کند کاهش می دهد اما به همین میزان تعداد منابعی که بار را در حال عادی یا در شرایط ویژه تغذیه می کنند را هم کم می کند. این روش ممکن است نیازمند تغییرات اضافی در فلسفه عملکرد یا روش کنترل باشد.

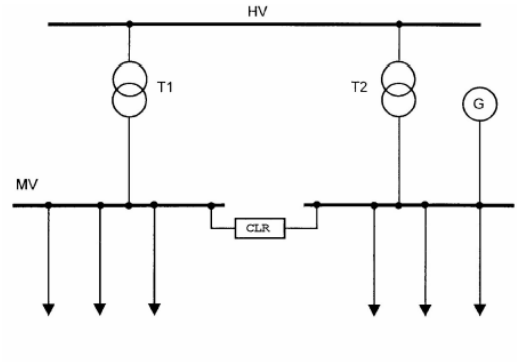
- تقسیم بندی و جداسازی به چند زیر شبکه: این روش بستگی به این دارد که یک شبکه (با یک سطح ولتاژ متداول) تقسیم به چند بخش کوچکتر شود که هرکدام از بخش ها به طور جداگانه از یک سطح سطح ولتاژ بالاتر تغذیه شوند. جداسازی، سطح جریان خطا را در هر یک از زیر شبکه ها به یک سطح مجاز کاهش می دهد.

- افزایش سطح جریان خطای بریکرها: زمانی که مشکل جریان خطا ایجاد می شود، معمولاً بیش از یک بریکر تحت تأثیر قرار می گیرد. افزایش سطح این بریکرها نسبت به تغییر یا جایگزینی تمام تجهیزات یک سوئیچ گیر در یک پست یک مزیت به حساب می آید.

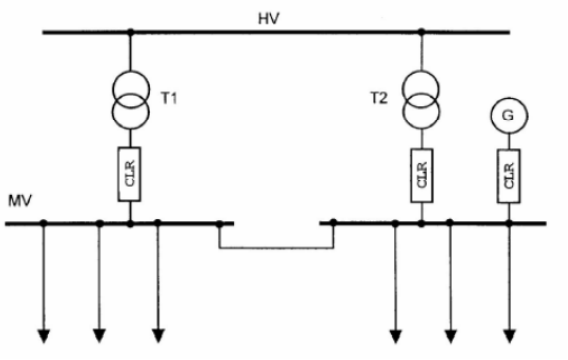
- راکتورهای محدود کننده جریان (CLR)[1] و ترانس های امپدانس بالا: CLRها جریان خطا را به دلیل کاهش شدید ولتاژ در ترمینالهایشان محدود می کنند. اما CLRها موجب کاهش ولتاژ در شرایط عادی عملکرد می شوند و یک تلفات ثابت را ایجاد می کنند. CLRها همچنین می توانند با المان های دیگر شبکه کنش و واکنش داشته باشند و موجب ناپایداری گردند. در شکل های (۱-۲) ، (۱-۳) و (۱-۴) سه مکان نصب CLR در یک ایستگاه نشان داده شده است.

- امپدانس زمین شونده: زمانی که جریانهای خطای بالا، جریان خطای زمین هستند، سیستمهایی مانند مقاومت کوچک زمین شونده، سلفهای زمین شونده یا مقاومت بزرگ زمین شونده می تواند به کار گرفته شود.

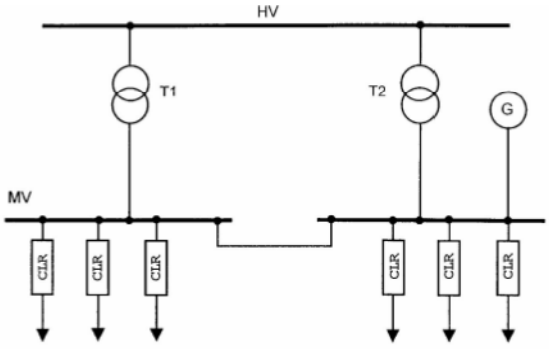
[1] *Current Limiter Reactor*



شکل (۱-۲) CLR به عنوان باس کوپلر



شکل (۱-۳) CLR به صورت سری در فیدرهای ورودی



شکل (۱-۴) CLR به صورت سری در فیدرهای خروجی

- کلید زنی مرحله ای بریکرها: کلید زنی مرحله ای بریکرها روش خاصی است که به طور مناسب در ایستگاهها برای مدیریت جریان های خطای بسیار بالا بدون جایگزینی تمام بریکرها استفاده می شود. یک کلید زنی مرحله ای ، بریکرها را از مواجه شدن با قطع جریانهای بسیار بالا در امان نگه می دارد. اگر خطایی تشخیص داده شود، بریکری که در بالا دست منبع جریان خطاست در ابتدا باز می شود. این کار موجب کاهش جریان خطای دیده شونده توسط بریکر در ناحیه تحت حفاظت می گردد. سپس این بریکر

می تواند در حالت مطمئن باز شود. یک عیب این روش آنست که موجب تأخیر در باز شدن بریکر و طولانی شدن زمان خطا می شود.

- فیوزهای فشار قوی: یک فیوز فشار قوی وسیله ای است که جریان خطا را مستقیماً از طریق یک المان ذوب شونده عبور می دهد. طراحی این وسیله، پیچیده تر از فیوزهای فشار ضعیف است. در عین حال، اصول عملکرد در هر دو یکی است. فیوزهای فشار قوی به طور گسترده برای حفاظت فیدرها و تجهیزات مانند ترانسفورماتورها در ولتاژ فشار متوسط سیستمهای توزیع و موتورها در شبکه های صنعتی استفاده می شوند.

- Is- Limiters: به دلیل عدم امکان استفاده از فیوزها در ولتاژها و جریانهای بالا شرکت ABB درساله ۱۹۸۰ این محدود کننده را طراحی کرد. ساختار کلی یک Is-limiter درشکل (۱-۵) نشان داده شده است.

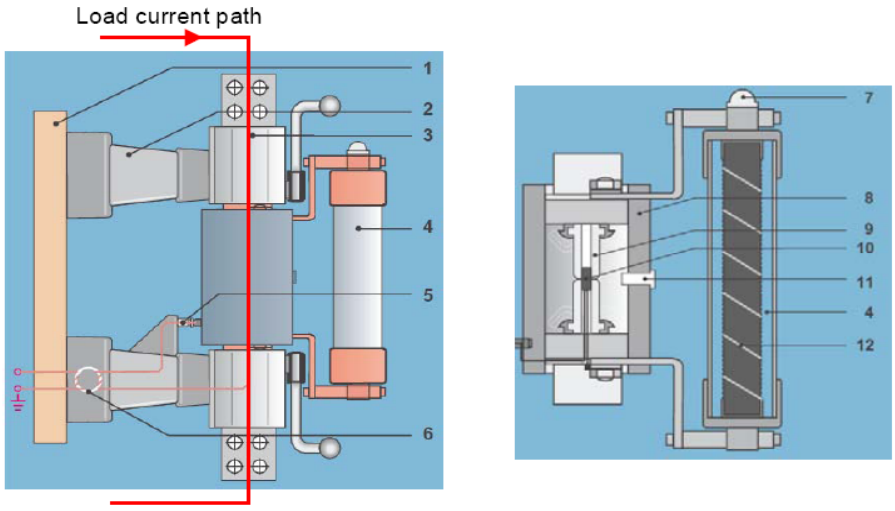
این محدود کننده از دو بخش هدایت کننده موازی تشکیل شده است.

۱. کنتاکتور اصلی
۲. فیوز موازی با کنتاکتور اصلی

در کار عادی سیستم قدرت جریان شبکه از داخل کنتاکتور اصلی عبور می کند. در زمان اتصال کوتاه کنتاکتور اصلی باز شده و جریان از طریق فیوز موازی هدایت می شود. به این ترتیب جریان اتصال کوتاه حداکثر در نیم سیکل اول محدود می شود. این محدود کننده معمولاً درمسیر اتصال دو سیستمی استفاده می شود که در صورت اتصال مستقیم جریان عیب آنها از مقادیر نامی تجهیزات بالاتر می رود.این محدود کننده قادر است قبل از اینکه جریانهای بالا به تجهیزات شبکه آسیبی برسانند، عمل کند.

از مزایای این محدود کننده در مورد زیر است:

۱) عملکرد سریع در نیم سیکل اول اتصال کوتاه
۲) تقریباً بدون اتلاف توان در کار عادی سیستم قدرت



I_s-limiter insert holder with insert for 12 kV, 2000 A

1 Base plate
2 Insulator
3 Pole head with clamping device
4 Fuse
5 Telescopic contact
6 Insulator with pulse transformer

I_s-limiter insert

4 Fuse
7 Fuse indicator
8 Insulating tube
9 Bursting bridge
10 Charge
11 Main conductor indicator
12 Fuse element

شکل (۱-۵) ساختار کلی Is-limiter

۳) استفاده از خواص سودمند فیوزها در زمان خط

از معایب این محدود کننده ها:

۱) قیمت بالا

۲) نیاز به تعویض کنتاکتور و فیوز بعد از هر اتصال کوتاه

۳) حساسیت بیش از حد و افزایش جریان

۱-۲-۲) تکنولوژی های جدید

در این بخش چند روش محدودسازی جریان خطا که مبتنی بر استفاده از محدود کننده های جریان خطا (FCL[1]ها) می باشد، توضیح داده خواهد شد. مزیت استفاده از FCLها، پایین آوردن هزینه ها در عین سرعت عمل زیاد است. یک محدود کننده جریان خطا (FCL) می تواند جریان خطای عبوری از خود را در همان نیم سیکل اول محدود کند.

[1] *Fault Current Limiter*

مشخصات لازم برای یک FCL مناسب: چند ویژگی لازم جهت یک FCL مناسب را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:[۱و۲]

- امپدانس پایین در حالت عملکرد عادی
- تلفات پایین
- محدود کردن جریان خطا به طور دقیق به صورتی که قبل از آنکه جریان خطا به پیک خود برسد، آنرا محدود نماید.
- برگشت سریع و خودکار به حالت اولیه پس از رفع خطا
- توانایی مقابله در برابر نیروهای مغناطیسی و مکانیکی
- سازگاری با آرایش های حفاظتی موجود و طراحی شونده در آینده
- تغییر نکردن مشخصات محدود کردن خطا در طول عمر
- قابلیت اطمینان بالا
- نیاز به تعمیرات پایین
- بدون خطر بودن برای اپراتورها
- تأثیر کم روی ترانسفورماتورها
- وزن پایین و اندازه کوچک
- نیاز نداشتن به یک جانشین یا یک Backup
- هزینه کم

۱-۲-۲-۱) محدود کننده جریان حالت جامد [1](SSCL):

کاربرد ادوات قدرت حالت جامد بر مبنای کاهش قیمت آنها در حال افزایش است. هدف استفاده از این وسایل با توجه به آرایشهای بهینه مداری، کاربردی شدن و به صرفه شدن اقتصادی آنهاست. محدود کننده جریان حالت جامد (SSCL) راه حل پایداری برای مشکل سیستمهای انتقال و توزیع خواهد بود. به دلیل سرعت عملکرد سریع، SSCL خطرات جریان خطا را چه برای تجهیزات بالادست چه تجهیزات پایین

[1] *Solid-State Current Limiter*

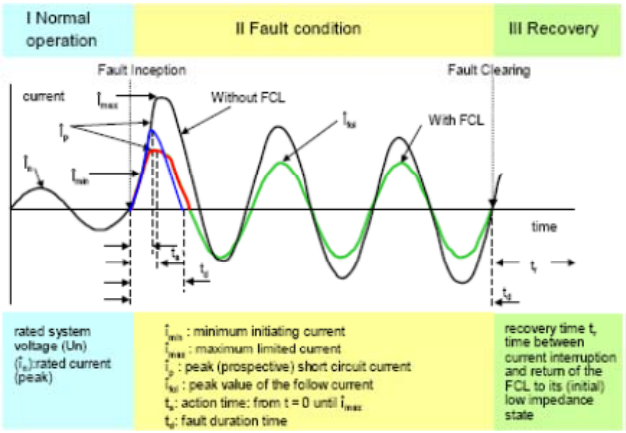
دست کم می کند. برای قطع جریان، SSCL می بایست سریعاً المانهای رسانای خود را خاموش کند و مقاومتی برای جذب انرژی به مدار اضافه نماید تا بتواند جریان خطا را کم کند. مزایای SSCLها به شرح زیر خواهد بود:

- محدود کردن جریان خطا
- محدود کردن جریان هجومی (حتی برای بارهای خازنی)
- تعداد عملکرد زیاد بدون نیاز به تعویض

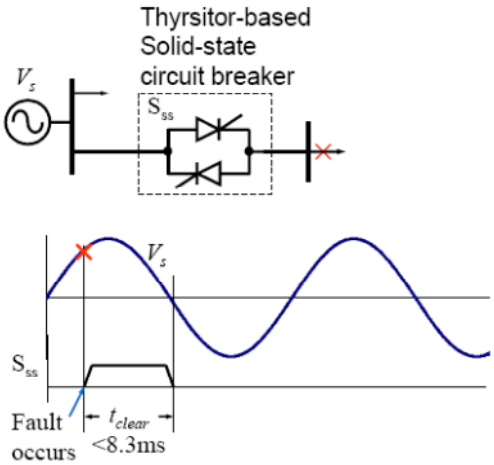
شکل ۱-۶ شکل موجهای مربوط به یک FCL را نشان و سه ناحیه اصلی عملکرد یک FCL را شرح می دهد:[۳]

- عملکرد عادی که در آن هیچگونه محدود کردن وجود ندارد.
- شرایط بروز خطا که در حین آن FCL عملکرد دارد.
- زمان بازگشت که در آن FCL به شرایط عادی خود برمی گردد.

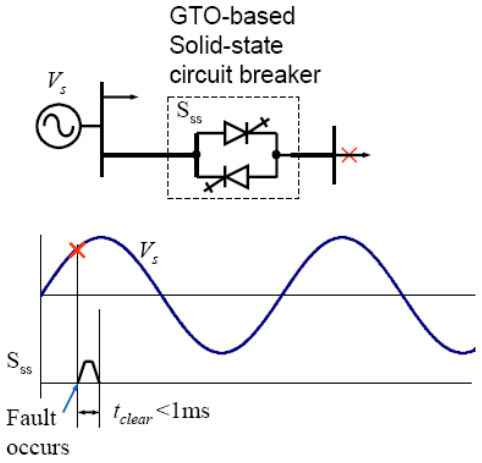
عملکرد کلید خاموش شونده بدون نیاز به قطع ناگهانی جریان یا محدود کردن جریان خطا می تواند تا زمان عبور از نقطه صفر تأخیر داشته باشد. شکل ۱-۷ ساختار مدار مربوطه و همچنین شکل موجهای مورد نظر را نشان می دهد. در این مورد، از تریستور به عنوان کلید استفاده می شود. اگر رفع سریع خطا مورد نیاز باشد، کلید مورد نظر باید ادواتی که با گیت کنترل می شوند مانند GTO یا IGBT یا GTOهای خاص باشد. شکل شماتیکی مدار و شکل موجهای مربوطه در شکل ۱-۸ آورده شده است.



شکل (۱-۶) شکل موجهای مربوط به یک FCL



شکل ۱-۷ عملکرد SSCL بدون نیاز به محدود سازی سریع جریان خطا

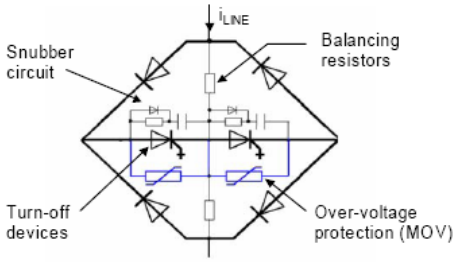


شکل ۱-۸ عملکرد SSCL در محدود سازی سریع جریان خطا با استفاده از GTO

- **طراحی پایه حالت جامد:** ساده ترین محدود کننده جریان خطای حالت جامد [1](SSFCL)، بریکر محدود کننده جریان خطای حالت جامد است. شکل ۱-۹ طراحی پایه یک فاز از چنین تجهیزی توسط Siemens با استفاده از IGBT یا IGCT نشان می دهد. [۴] این ادوات در شاخه DC از یک مدار رکتیفایر تمام موج دیودی قرار می گیرند. بنابراین، فقط یک تجهیز تک قطبی خاموش شونده برای عملکرد خط AC مورد نیاز است (i_{Line}). تجهیز دومی که در این شکل نشان داده شده است جهت مقابله با افزایش ولتاژ در نظر گرفته شده است. علاوه بر یک تجهیز خاموش شونده، می بایست المانی برای حفاظت

[1] *Solid-State Fault Current Limiter*

در مقابل ولتاژ زیاد مانند وریستورهای اکسید فلزی استفاده شود (MOV)[1] تا بتواند در مقابل اضافه ولتاژهای ناشی از اندوکتانس خط AC در حین خاموش شدن سریع توسط IGBT مقاومت کند. یک بریکر SSFCL در ولتاژ متوسط یا ولتاژهای فشار قوی ممکن است شامل چند طبقه به صورت سری باشد.



شکل ۱-۹ طراحی پایه یک فاز از SSFCL

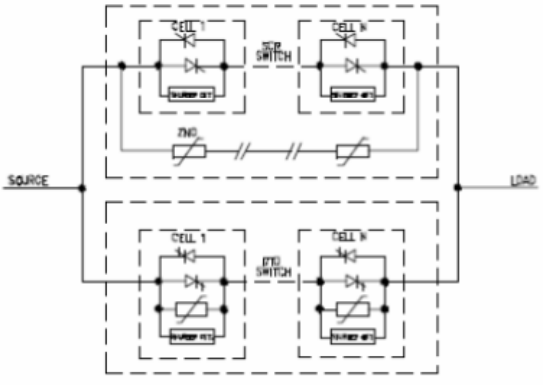
یک مدار جایگزین برای بریکر SSFCL وجود دارد که بر پایه تریستور کار می کند. وستینگهاوس با همکاری EPRI [۵] یک بریکر حالت جامد که ترکیبی از تریستور و GTO است را طراحی کرده است. (شکل ۱-۱۰) همانطور که شکل نشان می دهد این مدار شامل دو شاخه موازی است: یک شاخه شامل کلید حالت جامد بر پایه GTO (و اسنابر مربوطه و برقگیرهای اضافه ولتاژ ZnO) و شاخه دیگر کلید حالت جامد با استفاده از تریستور و المانهای مربوط به آن.

کلید GTO قسمت اصلی بریکر و عبور دهنده جریان در حالت دائمی است. کلید GTO برای از بین بردن خطاهایی که در طرف منبع رخ می دهد، به کار می رود. جریان نامی آن در حد ماکزیمم جریان خط است اما درحد جریانهای خطا نیست. این کلید در حالت عادی بسته است و جریانها را تا زمانی که این جریانها به حد تنظیم شده برای باز شدن کلید نرسیده اند، عبور می دهد.

کلید تریستور در حالت عادی باز است و عملکردش عبور دادن جریان خطا برای کمک به تجهیزات حفاظتی سنتی در طرف بار است. به همین منظور مشخصات این کلید جهت جریانهای در حد جریان خطا مناسب است. عملکرد این کلید با کلیدهای GTO هماهنگ شده است. در مقایسه با GTOها که در آنها جریان در هر نقطه ای در سیکل می تواند قطع شود، تریستورها زمانی می توانند جریان را قطع کنند که شکل موجها به صفر برسند. بریکرهای تریستوری، برخلاف بریکرهای GTO، می توانند برای حفظ جریان خطا طراحی شوند تا مشخصات جریان- زمان مورد نیاز جهت هماهنگی با حفاظت های اضافه جریان را

[1] *Metal Oxide Varistor*

برآروده کنند. بخش تریستوری قادر است جریان های خطا را در زمانی حول و حوش ۱۰ تا ۱۵ سیکل عبور دهد.



شکل ۱-۱۰ مدارSSFCL طراحی شده توسط وستینگهاوس و EPRI

مزیت کلید GTO، توانایی آن در قطع جریان با تأخیر قابل چشم پوشی است. مزیت کلید تریستور در مقایسه با کلید GTO با یک اندازه، توانایی آن در عبور جریان های بسیار زیاد است.

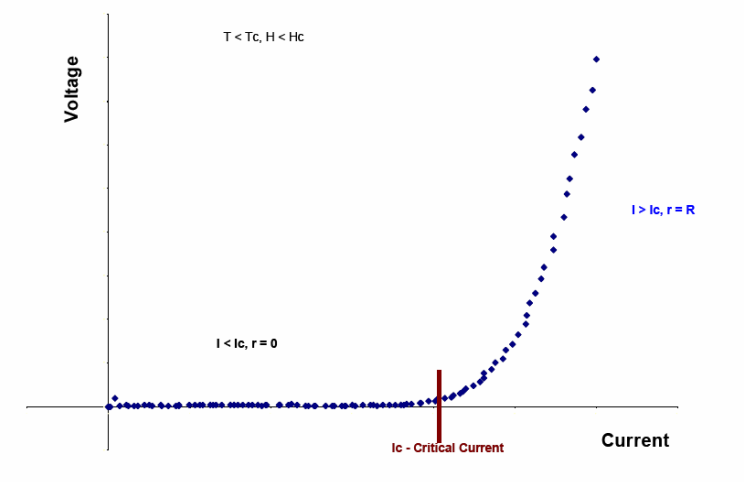
۱-۲-۲-۲) محدود کننده جریان خطای ابررسانا:

FCLهایی که از ابر رسانای با تحمل جریان زیاد (HTS)[1] استفاده می کنند، در حین بروز خطا امپدانس لازم جهت محدود کردن جریان خطا را فراهم می کنند در حالی که در شرایط عادی امپدانس صفر از خود نشان می دهند. بنابراین FCLهای HTS هیچگونه تأثیر منفی بر عملکرد کلی سیستم ندارد در حالی که ادوات محدود کننده جریان سنتی مانند CLR، کاهش ولتاژ شدید و جریانهای چرخشی در ترانسفورماتورها تولید می کنند و به طور ذاتی تلفات انرژی بالایی دارند.

- عملکرد محدود کننده جریان ابر رسانا (SCCL)[2]:

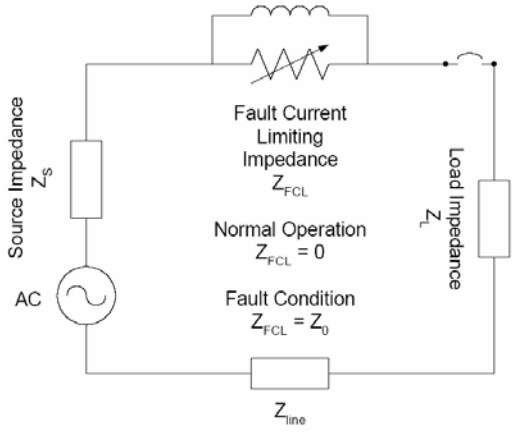
حالت ابر رسانایی حالتی است که در آن یک هادی الکتریکی از خود مقاومتی نشان نمی دهد اگر جریان عبوری از ماده ابر رسانا از حد مشخصی کمتر باشد (حد جریان بحرانی I_C)، وقتی که نقطه عملکرد از دمای معینی کمتر باشد و میدان مغناطیسی خارجی در حد کمی باشد. (دمای بحرانی T_C و میدان بحرانی H_C) شکل ۱-۱۱، منحنی جریان- ولتاژ اندازه گیری شده از نوعی ابر رسانا را نشان می دهد.

[1] *High Temperature Superconducting*
[2] *Super-Conducting Current Limiter*



شکل ۱-۱۱ منحنی جریان- ولتاژ نوعی ابر رسانا

همانگونه که در شکل مشخص است، هنگامی که جریان از حد جریان بحرانی کمتر است، ابر رسانا مقاومت الکتریکی از خود نشان نمی دهد. اما اگر جریان به حد جریان بحرانی برسد، ابر رسانا از حالت ابر رسانایی به حالت مقاومت الکتریکی تبدیل می شود. به این تغییر حالت، مرحله خاموشی می گویند. در مدتی که گرما تولید می شود (تلفات I^2R) در زمانی که مرحله مقاومت الکتریکی به ابر رسانا آسیب نرسانده است، ابر رسانا می تواند به حالت ابر رسانایی خود برگردد به شرطی که سرمای کافی به سرعت برای پراکنده کردن گرما فراهم شود تا دمای ابر رسانا به حول و حوش دمای بحرانی برسد.



شکل ۱-۱۲ کاربرد ابر رسانا به عنوان FCL

شکل ۱-۱۲ محدود کننده جریان خطای بالفعل که خصوصیت مقاومت متغیر ابر رساناها را ترکیب کرده، نشان می دهد. این تجهیز می تواند به گونه ای طراحی شود که در شرایط عملکرد نرمال پیک جریان AC در شبکه توزیع و انتقال توان همیشه زیر جریان بحرانی ابر رساناها باشد. تلفات I^2R در مدت زمان عملکرد