بسم الله الرحمن الرحيم

١٣٤١٢٧

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد قدرت

جایابی بهینه محدودساز جریان خطا در سیستم های قدرت توسط الگوریتم ژنتیک

اساتید راهنما

دکتر مجتبی پیشوایی

دکتر گئورگ قره پتیان

دانشجو

ماکان انوری

۱۳۸۹/۱/۲۲

اردیبهشت ۱۳۸۸

۱۳۴۱۶۷

تاریخ : ۱۳۸۷/۱۲/۱۹
شماره : ۷۵۴۹/۲۰۱۹
پیوست : .....

دانشگاه تفرش

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی: ماکان انوری شماره دانشجویی: ۸۵۲۱۲۱۰۰۲ گروه: مهندسی برق

رشته تحصیلی/گرایش: مهندسی برق/ قدرت

عنوان پروژه: جایابی بهینه محدود ساز جریان خطا (FCL) در سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

تعداد واحد : ۶ تاریخ تصویب : ۸۶/۱۲/۷ تاریخ دفاع : ۸۷/۱۲/۱۹

نمره نهایی : به عدد : ۱۸ به حروف : هجده تمام

هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	محل اشتغال	امضاء
استاد راهنمای اول	دکتر مجتبی پیشوایی	استادیار	دانشگاه تفرش	
داور داخلی اول	دکتر حمید رضا رضا علیخانی	استادیار	دانشگاه تفرش	
داور داخلی دوم	دکتر عبدالمجید حدیدی	استادیار	دانشگاه تفرش	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید سلمان نورآذر خشکناب	استادیار	دانشگاه تفرش	

مدیرگروه : دکتر همایون مشکین کلک

امضاء :

تاریخ : ۸۷/۱۲/۱۹

مهر : دانشگاه تفرش — دانشکده مهندسی برق

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر عباس مالیان

امضاء :

تاریخ : ۸۷/۱۲/۱۹

مهر :

دانشگاه تفرش — اداره کل تحصیلات تکمیلی

دانشگاه تفرش — اداره کل تحصیلات تکمیلی

تقدیم به :

پدر، مادر و برادرم

در اینجا از آقایان مهرداد ملاکی و مجتبی توکلی که کمک های خود را در تهیه و نگارش این پایان نامه از من دریغ نداشته اند، کمال تشکر و سپاس را دارم.

همچنین از اساتید راهنمای خود، که دلسوزانه اینجانب در کلیه مراحل تهیه پایان نامه یاری کرده اند، قدردانی می نمایم.

چکیده

به وجود آمدن خطا در سیستمهای قدرت حتمی و غیر قابل اجتناب است. با به وجود آمدن خطا علاوه بر آنکه محلهایی در نزدیکی محل خطا به دلیل به وجود آمدن قوس های الکتریکی آسیب میبینند، بلکه با جاری شدن جریان خطا از منابع به سمت محل خطا، ناپایداری های گرمایی و دینامیکی به وجود می آیند که فشار زیادی را به تجهیزات نظیر خطوط هوایی، کابل ها، ترانسفورماتورها و سوئیچ ها تحمیل میکنند.

علاوه بر آن در آینده ای نزدیک، بسیاری از تولید کننده های مستقل توان در تولید توان نقش بسزایی خواهند داشت. از نقاط ضعف این کار افزایش سطوح جریان خطاست که اغلب، این سطوح از حد قابلیت ایستادگی (دژنگتور) CB[1] های موجود تخطی میکنند.

CB ها باید قابلیت قطع جریان در چنین خطاهایی را داشته باشند. بنابراین توجه ویژه ای به ادواتی که میتوانند محدود سازی جریان خطا را انجام دهند، وجود دارد.

به دلیل گسترش زیاد سیستم های قدرت جدید و به منظور استفاده موثر از قابلیت های سیستم قدرت نیاز مبرمی به کاهش جریان اتصال کوتاه و استفاده از محدود کننده های جریان خطا (FCL[2]) وجود دارد.

در ساخت شبکه های جدید FCL ها امکان استفاده از تجهیزات با مقادیر نامی کمتر را میدهند، که منجر به صرفه جویی قابل توجهی در هزینه میشود. همچنین استفاده از FCL باعث میشود که آزادی عمل بیشتری در عملکرد و برنامه ریزی سیستم های قدرت داشته باشیم.

با توجه به اینکه FCL میتواند حفاظت سیستم، کیفیت توان و قابلیت اعتماد به سیستم را افزایش دهد، از این رو توسعه چندین نوع آن در بسیاری از کشورها در دستور کار قرار گرفته است.

هدف از نگارش این پایان نامه جایابی بهینه محدود کننده جریان خطا در سیستمهای قدرت توسط الگوریتم ژنتیک میباشد. همچنین صرفه جویی اقتصادیی که با به کارگیری ادوت محدودکننده در طراحی و ساخت پستهای فشار قوی میسر میشود را نیز با یک برآورد هزینه کلی از ادوات پست محاسبه می کنیم.

الگوریتم پیشنهادی ابتدا به منظور تست میزان برازندگی روی یک شبکه ۶ شینه اعمال میشود و سپس نتایج نهایی، از اعمال الگوریتم روی شبکه ۳۹ شینه استاندارد IEEE استخراج میشود.

در هر دو شبکه با اعمال اتصال کوتاه، مقدار ماکزیمم جریان خطا از مقدار پیک قدرت قطع نامی تعدادی از CB ها تجاوز مینماید. سپس مشاهده میشود که با گماردن FCL در خطوط پیشنهادی الگوریتم، مقادیر ماکزیمم جریان خطا به زیر مقدار پیک قدرت قطع نامی CB های مذکور کاهش یافته است. در پایان نیز به محاسبه میزان صرفه جویی اقتصادی در ساخت پستهای فشار قوی با به کارگیری ادوات محدودکننده می پردازیم.

---

۱ - Circuit Breaker
۲ - Fault Current Limiter

فهرست مطالب

عنوان صفحه

پیشگفتار ۷

فصل اول : نگاهی به محدودساز جریان خطا

۱-۱- جریان خطا و اثرات منفی آن در سیستم های قدرت..... ۱۰

۱- ۲- عملکرد محدودساز جریان خطا ۱۲

۱-۳- مروری بر روشهای محدود سازی جریان خطا ۱۴

۱-۴- انواع محدودساز جریان خطا ۱۸

۱-۵- به کار گیری محدودساز جریان خطا در صنعت ۲۰

فصل دوم : مروری بر روش های جایابی

۲-۱- الگوریتم اجتماع ذرات ۲۷

۲-۲- الگوریتم مورچگان ۲۹

۲-۳- الگوریتم ژنتیک ۳۲

۲-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ۳۴

۲-۵- انتخاب روش بهینه سازی جهت جایابی بهینه محدودساز جریان خطا ۳۶

۲-۶- معایب الگوریتم ژنتیک ۳۸

فصل سوم : ارائه الگوریتم پیشنهادی

۳-۱- طرح مسأله ۴۰
۳-۲- مدل پیشنهادی برای FCL ۴۱
۳-۳- روش کدگذاری ۴۲
۳-۴- جمعیت اولیه ۴۴
۳-۵- تابع هدف و ارزیابی میزان برازندگی ۴۴
۳-۶- انتخاب ۴۶
۳-۷- عملگرهای تقاطع و جهش ۴۷
۳-۸- تنظیم پیکره بندی الگوریتم ژنتیک ۴۸
۳-۹- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی ۴۹
۳-۱۰- مزایا و معایب الگوریتم پیشنهادی ۵۲

فصل چهارم : شبیه سازی و تحلیل نتایج

۴-۱- شبیه سازی و اعمال الگوریتم پیشنهادی روی شبکه ۶ شینه نمونه ۵۳
۴-۲- اعمال الگوریتم پیشنهادی روی شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE ۶۱
۴-۳- جمع بندی فصل ۶۵

فصل پنجم : بررسی صرفه جویی اقتصادی در طراحی پست با به کارگیری ادوات محدودکننده جریان خطا

۵-۱- معرفی پست سقز ۶۶

۵-۲- برآورد میزان صرفه جویی اقتصادی در پست سقز با به کارگیری ادوات محدودکننده جریان خطا ۷۱

۵-۳- جمع بندی فصل ۸۰

نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۱

پیوست ها

پیوست A-۱- الگوریتم ژنتیک ۸۲

پیوست A-۲- اطلاعات سیستم ۶ شینه ۱۰۳

فهرست مراجع ۱۰۵

Abstract 107

پیشگفتار

عوامل بسیاری نظیر افزایش تولید انرژی الکتریکی و رشد روز افزون استفاده از تسهیلات تولید پراکنده باعث افزایش جریان خطا شده اند. این افزایش در جریان اتصال کوتاه علاوه بر آنکه منجر به ناپایداری های گرمایی و دینامیکی و فشار زیاد به تجهیزات سیستم قدرت میشود، بلکه باعث میشود مقدار پیک جریان اتصال کوتاه از قدرت قطع نامی دژنگتورهای (CB) سیستم قدرت تخطی کند.

متحمل شدن هزینه های سنگین جهت تعویض تجهیزات، عدم استفاده موثر از قابلیت های سیستم قدرت و نیروهای دینامیکی ناشی از جریانهای خطای بالا (که ممکن است به یک خطای دائمی در سیستم قدرت منجر شود) از پیامدهای منفی این افزایش در سطوح جریان خطا میباشد.

به منظور رفع این مشکل تاکنون تحقیقات بسیاری در تکنولوژی های مختلف انجام شده است. در کره مقایسه ای بین سه آنالیز در عملیات محدود سازی جریان خطا انجام شده است[1]. در شبکه ۳۴۵ کیلوولت در KEPCO کره مقایسه ای بین عملکرد شکافتن باس بار، نصب راکتور محدود کننده جریان خطا (CLR[1]) و ابر هادی های محدود کننده جریان خطا (SFCL[2]) صورت گرفته است. در حال حاضر در شبکه فوق به دلیل جریانهای اتصال کوتاه بالا اقدام به تعویض CB ها با CB هایی با قدرت قطع بالاتر نموده اند. مبنای مقایسه این سه عملکرد پایداری گذرا، زمان بحرانی پاکسازی خطا و محدوده انتقال توان میباشد. نتایج نشان میدهد نصب SFCL موثرترین روش برای کنترل جریان خطا میباشد.

در شبکه فشار قوی آلمان نیز یک کاربرد جالب برای SFCL، اتصال زیر شبکه های ۱۱۰ کیلوولت میباشد که توسط آنها ظرفیت مازاد ترانسفورماتورها به طور قابل توجهی کاهش می یابد[2]. توان رزرو توسط دیگر ایستگاه ها تحویل داده میشود و این در حالیست که جریان اتصال کوتاه (SCC[3]) توسط FCL به مقادیر قابل قبولی محدود شده است.

علاوه بر آن در آلمان یک کنسرسیوم شامل ۶ عضو در سال ۲۰۰۵ برای توسعه محدودکننده های جریان خطا شروع به کار کردند و پس از تحقیقات موفقیت آمیز دو نمونه اصلی جهت نصب در سیستم های قدرت آماده شده اند[3].

در سوئیس نیز برای توسعه محدود کننده های ۱۵۴ کیلوولت اقداماتی صورت گرفته است که در فاز آخر تا سال ۲۰۱۰ برنامه ریزی شده است[3].

همچنین تحقیقاتی در زمینه نوع مقاومتی ابرهادی های محدود کننده جریان خطا در آنالیز جریان اتصال کوتاه صورت گرفته و میزان اثر نصب این نوع FCL در سیستم های قدرت با مقیاس بزرگ برآورد شده است[4]. در ادامه پیدا کردن موقعیت های مناسب FCL به منظور کاهش جریان خطا توسط الگوریتم یک به یک مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق به دلیل مبنا قرار دادن مینیمم سازی تعداد FCL ها و کاهش تعمدی بار محاسباتی دارای دقت کمی میباشد.

همچنین به منظور جایابی ادوات محدود کننده و در راستای تسریع محاسبات، میتوان از ترکیبی از micro-Genetic Algorithm و hierarchical Genetic Algorithm استفاده نمود[5]. این روش اگر چه از نقطه نظر اصلاح سرعت (به خصوص در سیستم های قدرت با تعداد باسبار بالا) دارای مزایای بسیاری است، اما به محدودکننده هایی با

---

[1] - Current Limiter Reactor
[2] - Superconducting Fault Current Limiter
[3] - Short Circuit Current

راکتانس پایین (که منجر به بکارگیری تعداد زیادی محدودکننده جهت محدودسازی جریان خطا خواهد شد) و در نظر نگرفتن هزینه ساخت این ادوات، از نقطه نظر اقتصادی قابل اجرا نمیباشد.

مطالعاتی نیز در زمینه یافتن موقعیت بهینه FCL نسبت به CB انجام شده و نصب FCL به صورت Downstream و Upstream نسبت به CB مورد بررسی قرار گرفته است[۶]. نتایج نشان میدهند که نصب FCL باعث کاهش بار عمل قطع کنندگی CB میشود و تغییر در موقعیت FCL منجر به هیچ تغییری در شرایط قطع کنندگی CB نخواهد شد. نصب FCL به صورت downstream با CB، به دلیل تثبیت ولتاژ در ترمینال سمت منبع FCL دارای مزیت ویژه ای نسبت به حالت دیگر میباشد.

محدودسازی جریان خطا توسط ابر هادی ها، در ابتدا از نوع کابل های ابر هادی دمای پایین که با هلیم مایع در دمای نزدیک به ۲۷۳- درجه سانتیگراد نگهداری می شده اند، بوده است. با توجه به هزینه بالای نگهداری ابر هادی ها در این دما، از ابر هادی های دمای بالا (HTS cable[۱]) برای این منظور استفاده شد. چنین ابر هادی هایی خانواده ای از مواد سرامیکی هستند که در دمای اتاق مقاومت بالایی دارند و هنگامی که با نیتروژن مایع تا دمای ۱۹۶- درجه سانتیگراد خنک می شوند، مقاومت آنها بسیار ناچیز خواهد شد. به دلیل ارزانتر بودن و سهولت دسترسی و قابلیت کنترل، از نیتروژن مایع به جای هلیم در این فرآیند استفاده می شود.

عمده تحقیقاتی که در حال حاضر انجام میشود، برای به نتیجه رساندن تکنولوژی ابرهادی ها در عملکرد محدود سازی جریان خطا و به منظور دست یابی به یک مدل بهینه و اقتصادی برای این نوع محدودکننده میباشد. زیرا در این نوع محدودسازی نیاز به کنترل اضافی FCL وجود ندارد.

در این پایان نامه جایابی بهینه FCL در سیستم قدرت توسط الگوریتم ژنتیک انجام میشود. در ابتدا بریکرهایی که قدرت قطع نامی آنها از ماکزیمم جریان اتصال کوتاه بیشتر میباشد، شناسایی میشوند و سپس توسط الگوریتم ژنتیک عملیات جایابی بهینه FCL انجام میگیرد. تابع هدف انتخابی (که در فصول آتی به شرح کامل آن می پردازیم) شرایط فنی و اقتصادی را به طور کامل ارضا می نماید.

در شبیه سازی و تحلیل نتایج از FCL های نوع اکتیو (ابرهادی های محدود کننده جریان خطا) استفاده شده است. اگر چه مزیت اصلی به کار گیری این نوع محدود کننده اثر نداشتن بر روی عملکرد حالت عادی شبکه میباشد، ولی بدلیل عدم دست یابی به یک مدل بهینه جهت استفاده از این نوع محدودکننده در صنعت روز دنیا[۵]، تحقیقات به منظور استفاده صنعتی از آنها همچنان ادامه دارد.

همچنین به دلیل عملکرد مستقیم الگوریتم ژنتیک با تابع هدف، توانایی این الگوریتم به جستجو در فضاهای گسترده و احتمال بسیار کم آن در به دام افتادن در نقاط بهینه محلی، از این الگوریتم به منظور جایابی بهینه FCL استفاده شده است[۷].

در پایان به محاسبه صرفه جویی اقتصادیی که با به کارگیری ادوات محدودکننده در ساخت پستهای فشار قوی حاصل میشود، می پردازیم.

---

[۱] - High Temprature Superconductor Cable

در راستای اهداف فوق در فصول آتی مطالب زیر ارائه خواهد شد:

- در فصل اول به بررسی اثرات منفی جریان خطا در سیستم های قدرت، نحوه عملکرد، انواع و محل نصب محدودساز جریان خطا، روشهای محدودسازی و کاربرد FCL در صنعت میپردازیم.
- در فصل دوم به بررسی چهار الگوریتم جایابی که عمدتا در مسایل بهینه سازی به کار گرفته میشوند، میپردازیم. الگوریتم اجتماع ذرات ، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم سیستم ایمنی بدن الگوریتم هایی هستند که در این فصل مورد بررسی قرار می گیرند.
- درفصل سوم به ارائه الگوریتم پیشنهادی می پردازیم و نحوه عملکرد آن را در هر مرحله تشریح میکنیم.
- در فصل چهارم ضمن تشریح سیستم های قدرت مورد مطالعه و نحوه شبیه سازی آنها، به تحلیل و بررسی نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی روی آنها می پردازیم.
- در فصل پنجم صرفه جویی اقتصادیی که با به کارگیری ادوات محدودکننده در ساخت پستهای فشار قوی حاصل میشود را مورد بررسی قرار میدهیم.

فصل اول

نگاهی به محدودساز جریان خطا

در این فصل به معرفی کامل FCL (از این پس به جای محدودساز جریان خطا از واژه FCL استفاده میشود) میپردازیم. در ابتدا عمده عواملی که موجب افزایش سطوح جریان خطا میشوند و اثرات منفی آنها در سیستم های قدرت مورد بررسی قرار میگیرند. سپس به تشریح عملکرد FCL در حالت خطا و طریقه محدودسازی آن میپردازیم. انواع FCL و شیوه محدودسازی هریک، عنوان مطالبی است که در ادامه بیان خواهند شد. و در پایان محلهای نصب FCL در سیستم های قدرت و کاربرد آن در صنعت مورد بررسی قرار می گیرند.

۱-۱- جریان خطا و اثرات منفی آن در سیستم های قدرت

با توجه به رشد صنعت و صنعتی شدن کشورها روز به روز تقاضای انرژی افزایش می یابد. از این رو افزایش تولید و گسترش سیستم انتقال و پست ها برای پاسخگویی به این افزایش روز افزون تقاضا، در دستور کار صاحبان صنایع قرار گرفته است[11]. بنابراین نیاز به انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان بالا در سیستم های قدرت برای پاسخگویی به این تقاضای بالای انرژی احساس میشود. یکی از مهمترین عواملی که قابلیت اطمینان به سیستم را تهدید میکند، افزایش سطوح جریان خطا است. این افزایش در بسیاری موارد منجر به خرابی ادوات سیستم های قدرت میشود و باعث متحمل شدن هزینه های سنگین جهت تعویض قطعات سیستم های قدرت خواهد شد.

به طور کلی عوامل زیر باعث افزایش جریان خطا در سیستم های قدرت شده اند[2],[5],[11]:

۱- رشد تولید انرژی الکتریکی

۲- افزایش قطعی شبکه ها

۳- سهیم شدن تولید کننده های مستقل توان در تولید توان

۴- رشد روز افزون استفاده از تسهیلات تولید پراکنده

۵- رشد تقاضای برق

۶- اتصال داخلی شبکه ها به یکدیگر و در نتیجه کم شدن امپدانس نقطه اتصالی
۷- نصب خازنهای سری و جبرا نساز
۸- احداث خطوط انتقال موازی به منظور افزایش انتقال قدرت

CB های موجود در سیستمهای قدرت در فاصله زمانی ۱۰ الی ۱۵ سیکل، قابلیت قطع جریان خطا را دارند[11]. اگر دامنه جریان اتصال کوتاه از مقدار قدرت قطع نامی CB های سیستم قدرت بیشتر باشد، در طول دوره قطع جریان خطا توسط CB، ترانس ها و دیگر ادوات سیستم قدرت آسیب جدی میبینند. از آنجا که ادوات مورد استفاده در سیستم بر اساس طراحی های سالهای دور میباشند، در نتیجه افزایش جریان اتصال کوتاه به طور قابل توجهی قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری سیستم را تحت تاثیر قرار میدهد.

مهمترین اثرات منفی افزایش جریان اتصال کوتاه در سیستمهای قدرت به شرح زیر میباشد [9],[10]:

۱- جاری شدن جریان خطا از منابع به سمت محل خطا، منجر به ناپایداری گرمایی و دینامیکی میشود.
۲- محلهایی در نزدیکی محل خطا به دلیل به وجود آمدن قوسهای الکتریکی آسیب میبینند.
۳- فشار زیادی به تجهیزات سیستم قدرت نظیر کابل ها، ترانس ها و سوئیچ ها وارد میشود.
۴- مقدار پیک جریان اتصال کوتاه از حد قدرت قطع نامی دژنکتورهای سیستم قدرت تخطی میکند.
۵- منجر به صرف هزینه زیاد جهت تعویض تجهیزات سیستم قدرت خواهد شد.

اکنون به بررسی رویکردهای مختلف جهت کنترل جریان خطا میپردازیم [3],[1] :

الف) تعویض CB ها و دیگر ادوات سیستم قدرت با ادواتی که قدرت نامی بالاتری دارند(upgrade)

انجام این پروسه در عین حال که بسیار سخت و زمانبر است، موجب متحمل شدن هزینه های هنگفتی می شود و از لحاظ اقتصادی به صرفه نسیت. همچنین این روش یک راهکار تضمین شده برای کنترل جریان خطا نمی باشد. زیرا دور نمای رشد صنعت یک منطقه در آن در نظر گرفته نمیشود و تنها برای دوره ای کوتاه مدت معضل افزایش در جریان خطا را برطرف میکند.

ب) جدا کردن باسها در محل پست (busbar split)

در این روش اگرچه مشکل افزایش سطوح جریان خطا تا حدود زیادی مرتفع میشود، ولی قابلیت انعطاف پذیری سیستم بسیار کاهش می یابد. در عین حال اعمال این روش نیازمند صرف زمانی طولانی برای مطالعه روی مناطق و نحوه پخش بار در شبکه است.

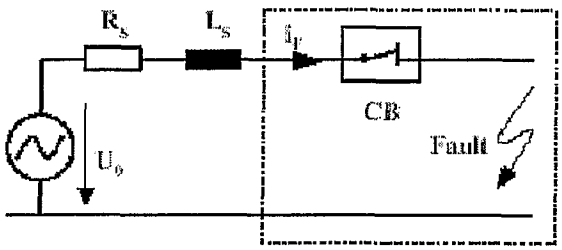
ج) استفاده از ادوات محدودکننده جریان خطا(FCL)

متداول ترین روش به منظور کنترل جریان خطا به کار گیری FCL می باشد. تقریبا کلیه FCL ها از طریق وارد کردن یک امپدانس بزرگ به طور سری با سیستم عمل میکنند و تنها اختلاف بین، روش ایجاد و نحوه وارد کردن این امپدانس به سیستم است. نصب FCL علاوه بر آنکه موجب کاهش ظرفیت اتصال کوتاه میشود، تاثیر بسزایی در بهبود پایداری گذرا نیز خواهد داشت.

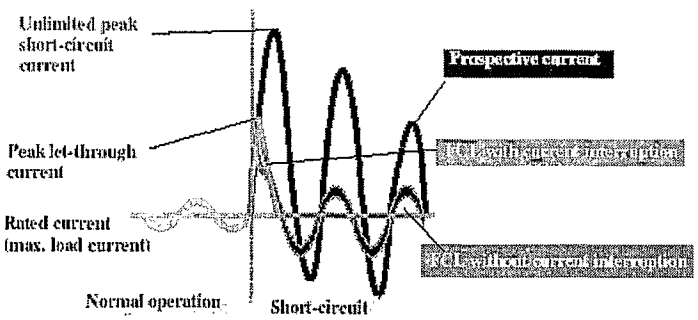
در نتیجه به منظور کنترل جریان خطا استفاده از FCL ترجیح داده می شود. در صنعت امروز به دلیل مسائل اقتصادی و قابلیت اطمینان بالا این رویکرد به طور گسترده ای مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از محدود کننده جریان خطا باعث میشود که تجهیزات در سرویس دهی باقی بمانند حتی اگر جریان اتصال کوتاه پیش بینی شده مقدار نامی پیک خود را افزایش دهد.
در ادامه به بررسی عملکرد FCL در سیستم های قدرت میپردازیم.

۱- ۲- عملکرد محدودساز جریان خطا

با به وجود آمدن خطا، جریان اتصال کوتاه با یک شیب صعودی مشخص که به پارامترهای مدار نظیر ولتاژ، امپدانس منبع و زاویه اولیه خطا بستگی دارد، شروع میشود (مطابق شکل (۱-۱))[9].



Equivalent Circuit Representing a Fault Condition



Typical Current Waveforms Due to a Fault

شکل (۱-۱) : منحنی جریان اتصال کوتاه با نصب FCL

منبع ولتاژ دارای یک امپدانس Z_S است که به یک CB ختم میشود. خطا نشان داده شده در شکل نیز در فاصله دوری از CB رخ میدهد. خطا در لحظه t=0 به سیستم اعمال میشود. منحنی جریان نامی سیستم پیش از اعمال خطا (t<0) در شکل نشان داده شده است.

اگر محدود سازی توسط FCL انجام نشود، منحنی با بیشترین مقدار پیک، نشان دهنده جریان اتصال کوتاه خواهد بود (Prospective Current). این جریان توسط CB در یک فاصله زمانی مشخص قطع میشود. همانطور که از شکل پیداست مقدار پیک جریان اتصال کوتاه در این حالت بیش از ۵ برابر مقدار پیک جریان نامی سیستم میباشد. همچنین مدت زمان طولانی قطع جریان اتصال کوتاه توسط CB میتواند منجر به خرابی CB و دیگر ادوات سیستم قدرت شود.
از اهداف اصلی محدود سازی، محدودکردن پیک اولیه جریان خطا است که برای دست یابی به این هدف لازم است که FCL در فاصله زمانی قبل از پیک اولیه جریان خطا، وارد سیستم شود.
منحنی "FCL With Current Interruption" مربوط به زمانی است که عمل قطع جریان توسط FCL صورت گیرد (نظیر فیوزهای محدود کننده جریان خطا) و یا محدود سازی به بهترین شکل ممکن انجام شود (نظیر ابر هادی های

محدودکننده که اثری بر روی عملکرد حالت عادی شبکه ندارند و با به وجود آمدن خطا یک مقاومت با مقدار بسیار بالا در شبکه وارد میکنند).

منحنی "FCL Without Current Interruption" نیز مربوط به زمانی است که یک امپدانس با یک مقدار مشخص در سیستم وارد شود (نظیر راکتورهای محدودکننده جریان خطا).

همانطور که پیداست در هر دو حالت پیک اولیه جریان خطا به شکل قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و مقدار جریان اتصال کوتاه به میزان قدرت قطع نامی CB های سیستم کاهش یافته است. در این صورت نه تنها نیازی به تعویض CB های سیستم با CB هایی با مقادیر قدرت قطع نامی بالاتر وجود ندارد، بلکه این امکان هست که CB های موجود توانایی ایستادگی در برابر جریانهای اتصال کوتاه با مقادیر پیک اتصال کوتاه بالاتر را نیز داشته باشند.

به طور خلاصه قابلیت های یک FCL را میتوان چنین بیان کرد [9],[6] :

۱- این ادوات اضافه جهشهای جریان را در خطوط انتقال و توزیع دمپ می کنند.

۲- استفاده از FCL اجازه میدهد که تجهیزات در سرویس دهی باقی بمانند حتی اگر جریان خطای پیش بینی شده مقدار نامی پیک خود را افزایش دهد.

۳- این امکان را فراهم میکند که مقدار نامی CB جلوی جریان خطا را بگیرد.

۴- از تعویض تجهیزات جلوگیری میشود.

۵- در ساخت شبکه های جدید امکان استفاده از تجهیزات با مقادیر نامی کمتر را می دهد.

۶- منجر به صرفه جویی قابل توجهی در هزینه میشوند.

۷- امکان بهره برداری موثر از توان انتقالی را ایجاد میکنند.

۸- هیچگونه اثری بر عملکرد سیستم قدرت حین عملکرد عادی ندارند(SFCL).

۹- بدون نیاز به سنسور امکان محدود سازی یک SCC بزرگ را فراهم میکنند.

۱۰- باعث میشود که آزادی عمل بیشتری در عملکرد و برنامه ریزی سیستم های قدرت داشته باشیم.

۱۱- افزایش ضریب حفاظت سیستم

۱۲- بهبود کیفیت توان

۱۳- افزایش قابلیت اعتماد به سیستم

۱۴- کاهش اثر افت ولتاژ در طول خطای اتصال کوتاه

۱۵- اصلاح پایداری سیستم قدرت

همچنین یک FCL باید دارای قابلیت های زیر باشد [9] :

۱) امپدانس کم در حین عملکرد نرمال

۲) تلفات کم

۳) انجام عمل محدود سازی به میزان مورد نیاز

۴) سازگاری با طرحهای حفاظتی

۵) عدم ایجاد اختلال در رفتار محدود سازی در طول عمر مفید

۶) قابلیت اعتماد بالا

۷) نیاز به مراقبت و تعمیرات پایین

۸) نداشتن خطر برای پرسنل

۹) نداشتن اثرات زیست محیطی

۱-۳- مروری بر روشهای محدود سازی جریان خطا

در این بخش به بررسی عملکرد انواع مختلف FCL ها و مزایا و معایب هریک میپردازیم [8]،[9]،[11]،[12]،[13].

۱-۳-۱- راکتورهای محدودکننده جریان خطا (CLR)

این ادوات از طریق وارد کردن یک سلف در مدار و افزایش امپدانس اتصال کوتاه (Z_{sc})عمل میکنند(طبق رابطه $I_{sc}=V_{sc}/Z_{sc}$).

بزرگترین مشکل در به کارگیری این ادوات تاثیر آنها در عملکرد حالت عادی شبکه میباشد که میتواند اثرات منفی در پخش بار حالت عادی شبکه داشته باشد. از مزایای این ادوات عملکرد سریع آنها در لحظه اتصال کوتاه و هزینه بسیار کم (در مقایسه با دیگر ادوات محدودکننده) می باشد.

از آنجایی که تا کنون تکنولوژی های دیگر در زمینه ادوات محدودکننده منجر به یک راه حل اقتصادی و بهینه نشده است، این ادوات کاربرد گسترده ای در سیستم های قدرت کنونی دارند.

۱-۳-۲- کنترل تریستوری راکتورهای محدودکننده جریان خطا (TCCLR[1])

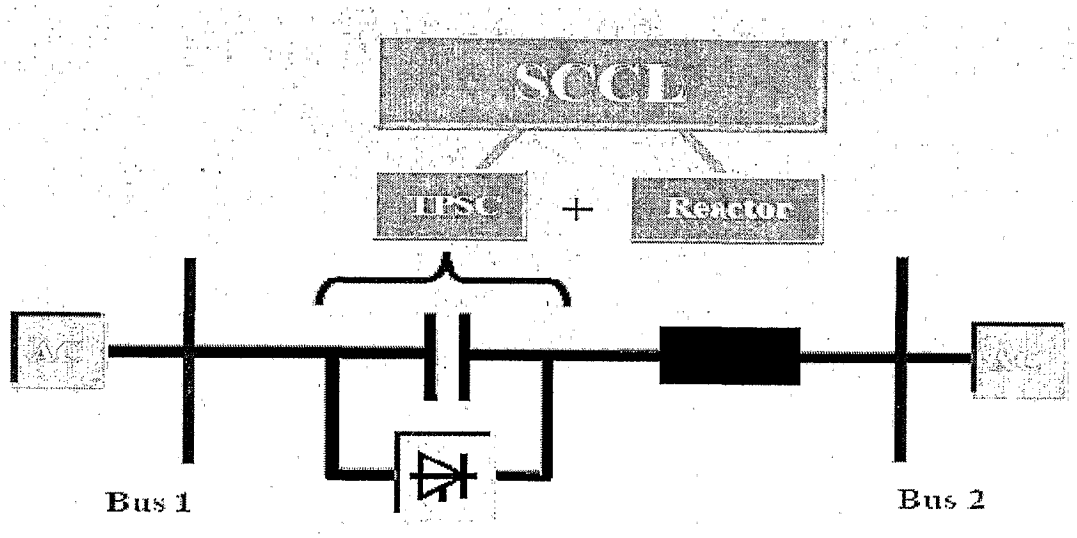
این ادوات نیز همانند حالت قبل با وارد کردن یک راکتور سری و کاهش امپدانس اتصال کوتاه عمل میکنند. با این تفاوت که در این روش با کنترل زاویه آتش تریستورها میتوان امپدانس سلفی که باید در مدار قرار گیرد را کنترل کرد.

با توجه به اینکه در این روش قابلیت کنترل مقدار راکتور سری وجود دارد، در نتیجه میتوان مشکل پخش بار را تا حدود زیادی مرتفع کرد.

مشکل عمده در به کار گیری این روش، تولید هارمونیک در سیستم قدرت می باشد که ملزم به بکارگیری از فیلتر در شبکه خواهیم بود. همچنین به دلیل به کار رفتن کنترل تریستوری، این رویکرد سرعت پاسخگویی پایینی دارد.

۱-۳-۳- استفاده از سلف و خازن سری در شبکه

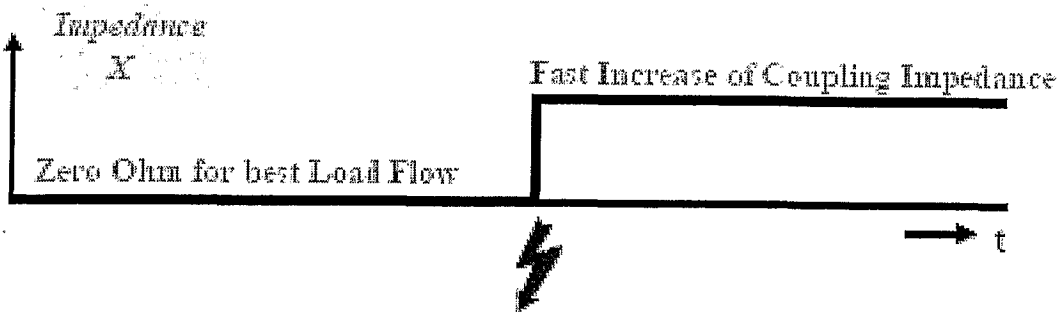
شکل (۱-۲) شمای کلی این محدودکننده و نحوه قرار گیری سلف و خازن سری در شبکه را نشان میدهد.



شکل (۱-۲): شمای کلی محدودساز از نوع سلف و خازن سری

[1] - Tiristor Controler of Current Limiter Reactor

نحوه عملکرد این محدودساز به این شکل است که در حین عملکرد عادی شبکه سلف و خازن اثر یکدیگر را خنثی می کنند. در لحظه وقوع خطا خازن توسط یک کنترل کننده تریستوری بای پس می شود و سلف به تنهایی در مدار قرار می گیرد و مانند یک راکتور محدودکننده عمل می کند.
شکل (۱-۳) نحوه عملکرد این محدودکننده را در پریودهای زمانی حالت عادی شبکه و پس از خطا نشان می دهد.



شکل (۱-۳): نحوه عملکرد محدودساز از نوع سلف و خازن سری

از مزایای مهم به کارگیری این روش نداشتن اثرات منفی در حین عملکرد عادی شبکه می باشد. همچنین میتوان زاویه آتش تریستورها را طوری تنظیم نمود که در شرایط عملکرد حالت عادی شبکه، این محدودساز در مد خازنی عمل نماید و جبران سازی سری خط را انجام دهد و در لحظه وقوع خطا با تغییر زاویه آتش تریستورها به مد القایی برود و عمل محدودسازی جریان خطا را انجام دهد.
مشکل بزرگ به کارگیری این روش آن است که باعث به وجود آمدن پدیده تشدید در شبکه می شود.

۱-۳-٤- ابر هادی های محدودکننده جریان خطا (SFCL)

۱-۳-٤-۱- نحوه عملکرد

اساس عملکرد ابر رساناها، محدود کردن جریان خطا بر اساس مشخصه فرونشانی می باشد. عملکرد آن را می توان به دو بخش تقسیم کرد :

مرحله اول : این مرحله در حین عملکرد عادی شبکه می باشد. در این حالت امپدانس ابر رسانا تقریبا برابر صفر خواهد بود و تاثیری در عملکرد عادی شبکه نخواهد داشت.

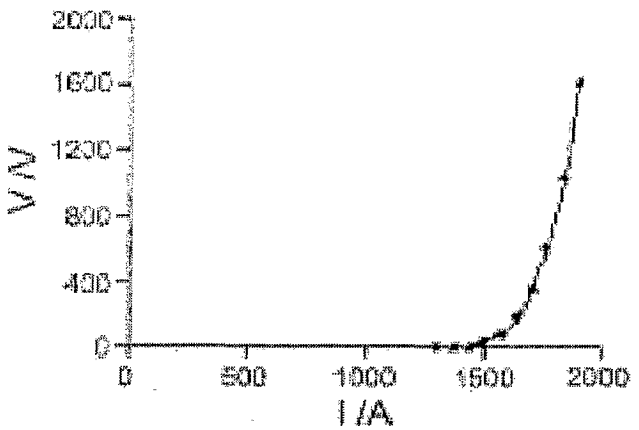
مرحله دوم : با وقوع خطا و افزایش جریان اتصال کوتاه، اگر میزان این جریان از حد خاصی تجاوز نماید (که میزان این حد به طراحی ابرهادی ها بر اساس مقدار قدرت قطع نامی بریکرها بستگی دارد) بر اساس پدیده فروپاشی ابررسانا ها، امپدانس این ادوات شروع به افزایش می کند و باعث محدودسازی جریان خطا می شود.
البته لازم به ذکر است که میزان جریانی که پس از آن در ابر هادی ها پدیده محدود سازی رخ می دهد، در وهله اول به ساختار مواد ابر هادی بستگی دارد (I_{quench}).

۱-۳-٤-۲- انواع ابر هادی ها

۱-۳-٤-۲-۱- محدودساز ابررسانای مقاومتی

در ساخت این محدودساز از دو نوع ماده ابررسانای دما بالای BSCCO (نسل اول) و YBCO (نسل دوم) استفاده میشود.

عملکرد این نوع محدودساز به طور کامل به جریان فروپاشی بستگی دارد.شکل (۱-۴) منحنی فروپاشی این نوع از ابر رساناها را نشان می دهد.



شکل(۱-٤): منحنی فروپاشی ابر هادی های نوع مقاومتی

۱-۳-٤-۲-۲- محدودساز ابررسانای القایی

این نوع از ابر رسانا ها از یک سیم پیچ اولیه مسی و یک سیم پیچ ثانویه ابر رسانا (سیم پیچ ثانویه به یک هسته آهنی کوپل شده است) تشکیل شده است.

تحت عملکرد عادی شبکه سیم پیچ ثانویه ابر رسانا میباشد و هیچ امپدانسی در اولیه القا نمی کند. با اعمال خطا سیم پیچ ثانویه از حالت ابر رسانایی به حالت القایی تبدیل می شود و امپدانسی که توسط آن در سیم پیچ اولیه القا می شود، باعث محدودسازی جریان خطا خواهد شد.

از مزایای استفاده از ابر هادی ها نداشتن تاثیر روی عملکرد حالت عادی شبکه می باشد. همچنین این ادوات نیازی به مدار کنترلی جهت تشخیص خطا ندارند.

از معایب به کارگیری آنها نیز هزینه بالای این ادوات جهت نصب در سیستم قدرت می باشد. همچنین به دلیل مشکلاتی نظیر زمان بازیابی[1] بالا، استفاده از چنین تجهیزاتی در سطوح ولتاژ بالا کمی مشکل است.

۱-۳-۵- استفاده از ادوات FACTS

در بین ادوات FACTS تا کنون تنها از IPC[2] ها جهت محدودسازی جریان خطا استفاده شده است. این ادوات از دو موازی در هر فاز تشکیل شده اند. هر یک از شاخه ها شامل یک سلف، یک خازن و یک ترانس شیفت دهنده فاز می باشند.

---

[1] - Recovery Time
[2] - Interphase Power Controller

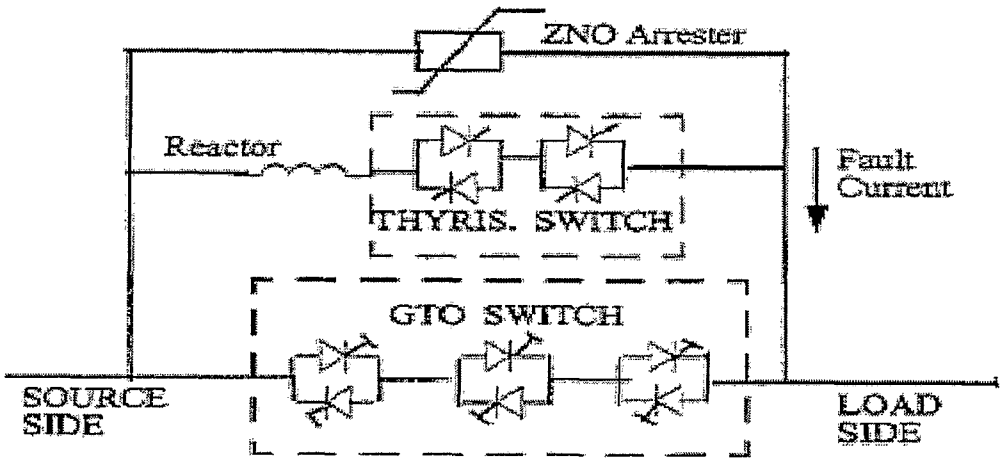
لازم به ذکر است که به کارگیری ادواتی نظیر ادوات FACTS، جبرانگرهای سری کنترل شده با تریستور و لینک های DC که برای داشتن قابلیت محدودسازی سطح اتصال کوتاه به سختی قابل طراحی و نصب هستند، توصیه نمی شود.

۱-۳-۶- سوییچ های نیمه هادی محدودکننده جریان خطا (SSFCL[1])

با افزایش سرعت عملکرد و توان تحملی سوییچ های نیمه هادی، گرایش به استفاده از چنین ادواتی در محدودسازی جریان خطا افزایش یافته است.

ساختمان کلی یک SSFCL به شرح زیر می باشد :

- سوییچ هایی از قبیل GTO که به طور سری نصب شده اند.
- راکتور
- برقگیر
- سوییچ های تریستوری



شکل (۱-۵) : شمای کلی SSFCL

در عملکرد عادی شبکه، گیت های GTO روشن بوده و جریان را به طور کامل از خود عبور می دهند. با وقوع خطا و عبور جریان خطا از یک سطح معین، مدار کنترلی فعال می شود و خطا را تشخیص می دهد. پس از تشخیص خطا، مدار کنترلی گیتهای GTO را سریعا خاموش می کند و به طور همزمان تریستورها روشن می شوند و جریان خطا از طریق راکتور ها محدود می شود.

اصولا تریستور قابلیت حمل جریان هجومی بالاتری نسبت به GTO دارد و تریستور می تواند جریان را تا ۱۰ الی ۱۵ سیکل در خود نگه دارد.

پس از رفع خطا گیتهای GTO روشن شده و هدایت جریان را از سر می گیرند. لازم به ذکر است که از برقگیر جهت حفاظت از تجهیزات در برابر اضافه ولتاژها استفاده می شود.

موارد گفته شده عمده محدودسازهایی هستند که در حال حاضر در صنعت به کار می روند و یا در حال توسعه می باشند. در قسمت بعد چند نوع دیگر از ادوات محدودکننده ها به طور اجمالی بیان می شود.

---

[1] - Solid State Fault Current Limiter