مقایسه و شبیه سازی انواع کنترلرهای خودکار جریان خطا از نوع ابررسانایی

[1] محمد هادی ورهرام ،[2] باقر معذبی،[2] علی فرزانه رفعت، [1] سید رضا یوسفی
varahram@sharif.edu, moaizebi@yahoo.com,
afarzanehrafat@ghods-niroo.com, s.reza.y@gmail.com

[1] دانشگاه صنعتی شریف ،[2] دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

چکیده:
محدود کننده های جریان خطا FCL[1] در دهه های گذشته بعنوان یکی از ادوات حفاظت درسیستم های قدرت در کانون توجه مهندسین قرار گرفته است. این محدود کننده ها با هدف حذف و یا محدود کردن جریان خطا به کسری از مقدار آن طراحی می شوند. این کاهش جریان باید در کمتر از یک سیکل انجام شود.احتیاج به توسعه و گسترش محدود کننده ها با افزایش سطوح جریان خطا ی سیستمهای امروزی بیشتر می شود. این محدودکننده ها هم باید از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشند و هم اینکه هنگام کار عادی در شبکه بی تأثیر باشند. بحث در این زمینه با داشتن یک دید کلی نسبت به مفهوم" محدودکردن جریان خطا " و نیاز به آن در سیستم های قدرت آغاز می شود. در ابتدا در مورد مواد ابررسانا توضیحاتی ارائه میشود. باتوجه به مشخصات و رفتارهایی که این مواد از خود نشان میدهند، محدود کننده های جریان خطای ابررسانا (SFCL[2]) بعنوان یکی از انواع رو به گسترش محدود کننده ها در سیستم های حفاظت الکتریکی، مطرح خواهد شد. . سپس به مقایسه و شبیه سازی انواع کنترلرهای خودکار جریان خطا از نوع ابررسانایی خواهیم پرداخت.

۱. مقدمه:

گسترش روز افزون تکنولوژی باعث رشد سریع شبکه های برق گردیده که این نیز خود معلول رشد بار مصرفی و بالطبع تولید بیشتر انرژی الکتریکی میباشد. برآیند مسائل فوق باعث ازدیاد قدرت سطح اتصال کوتاه شبکه های قدرت میگردد. همچنین جریانهای خطای بالا میتوانند تاثیر بدی روی پایداری و امنیت سیستم بگذارند، بخصوص هنگامی که مهندسین در حال تلاش برای افزایش ظرفیت سیستم می باشند. هنگامی که ژنراتورهای بیشتری به شبکه افزوده می شوند و نیز هنگامی که شبکه به طور گسترده ای دارای اتصالات داخلی میشود، سطح خطاهای جریان نیز به شدت بالا رفته که مورد اخیر باعث میگردد که تجهیزات حفاظتی قبلی دیگر پاسخگو نباشند و نیاز به تعویض آنها میباشد. در ضمن طراحی کلیدهای قدرت با قدرت قطع بسیار بالا خیلی گران تمام می شود. استفاده از محدودکننده های جریان خطا راه حل مناسبی برای رفع این مشکل میباشد تا بتوان بدون توجه به افزایش قدرت اتصال کوتاه شبکه و نگرانی از تولید کلیدهای با قدرت قطع بالا، از همان کلیدهای قبلی استفاده کرد و قدرت قطع کلیدهای جدید را همانند گذشته انتخاب نمود.[1-25]

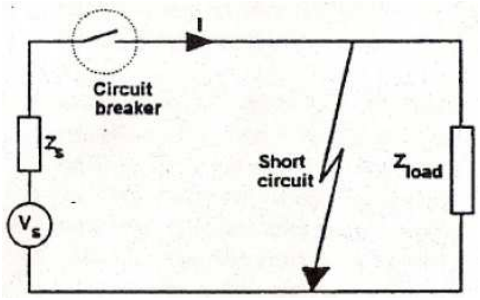
محدود کننده های جریان خطا در گذشته به کمک سلفهای محدود کننده ساخته می شد و به این ترتیب عمل می نمود که در هنگام تشخیص خطا بوسیله سنسور جریان و با فرمان لازم به کلید های قدرت و با وارد کردن یک سلف در سر راه اتصال کوتاه

[1] Fault Current Limiter
[2] Superconducting Fault Current Limiter

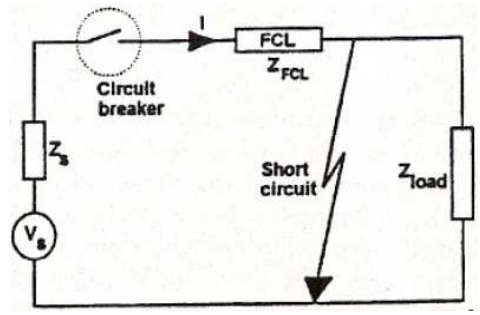
جلوی جریان خطا را می گرفتند. امروزه با پیشرفت دانش در زمینه ابررساناها و پیدایش مواد ابررسانایی دما بالا، امکان ساخت محدود کننده های جریان مختلف و با عملکردهای متفاوت که قابلیت نصب در نقاط مختلف شبکه دارند فراهم گشته اند. درضمن، اطمینان و سرعت بسیار بالای این محدود کننده ها نسبت به محدود کننده های قبلی بسیار بیشتر بوده و با وجود آن، قیمت و تکنولوژی ساخت آنها بسیار به صرفه تر می باشند[25-24 ,8-1].

۲. کنترلر های خودکار جریان خطا:

محدودکننده های جریان خطا وسایلی هستند که می توانند جریان های خطای ناشی از اتصال کوتاه ، ازدیاد بار، و... را در یک شبکه ی قدرت محدود و یا حذف کنند. در شکل ۱ چگونگی عملکرد و قرار گیری یک FCL را بعنوان یک عنصر مداری بهنگام بروز اتصال کوتاه در یک شبکه قدرت ساده که از یک منبع ولتاژ V_S با امپدانس داخلیZ_S و یک بار با Z_{load} ; نشان می دهد.



الف.



شکل ب.

شکل ۱. شبکه مداری سیستم قدرت الف) بدون محدود کننده.ب) با محدود کننده.

مادامیکه در شرایط نرمال هستیم، جریان مدار ،I_n توسط فرمول زیر محاسبه میشود:

$$I_n = \frac{V_s}{Z_S + Z_{load}}$$

اما بهنگام بروز اتصال کوتاه در مدار، بار اتصال کوتاه میشود و جریان اتصال کوتاه مدار ، I_f بدینصورت است:

$$I_f = \frac{V_S}{Z_S}$$

از آنجاییکه امپدانس داخلی منبع بمراتب کمتر از امپدانس بار میباشد،جریان I_f اساساً به میزان قابل توجهی از جریان I_n بزرگتر است.

یک FCL ایده آل باید قادر باشد به طور لحظه ای و قبل از اینکه جریان اتصال کوتاه به بار (مصرف کننده ها) آسیب برساند به

خطا واکنش نشان داده وجریان خطا را با ورود امپدانس سری (Z_{FCL}) به کسری از مقدار آن کاهش دهد. این کاهش جریان باید در کمتر از یک سیکل انجام شود. قابل توجه است که محدود کننده های جریان حتی الامکان نباید در شرایط نرمال تاثیری در شبکه داشته باشند.

FCL ها همچنین باید قادر باشند که جریان های خطای متوالی را نیز قطع کنند و باید بعد از هر خطا به طور اتوماتیک بازگشت شوند.

مزایا : طول عمر یک Circuit breaker تابعی است از تعداد دفعاتی که باید عمل کند و نیز اینکه نقطه ی کار آن تا چه حد به ماکزیمم حد مجاز نزدیک می باشد. بنابراین استفاده از FCL ها طول عمر Circuit breaker های موجود در شبکه را افزایش می دهد.

اگر همه و یا حتی تعدادی از مشخصه های ایده آل یک FCL قابل دستیابی باشد ، مزایای زیادی تحقق می یابد. ساختمان پست ها و ادوات خطا را می توانیم نادیده بگیریم، این مسأله موجب صرفه جویی قابل ملاحظه ای در وسایل می شود. همچنین

محدودکردن جریان خطا، امنیت، پایداری و کیفیت توان شبکه را افزایش می دهد[25].

انواع و معایب : محدود کننده های جریان سنتی عموماً به سه دسته عمده تقسیم میشوند:

محدود کننده های جریان سری

محدود کننده های جریان موازی

محدود کننده های جریان دیودی حالت جامد

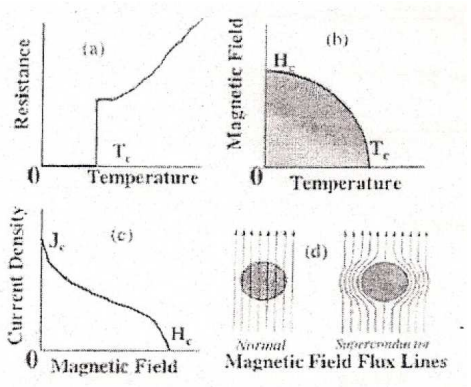
محدود کننده های سری از پدیده رزونانس در مدارهای LC جهت وارد نمودن امپدانس سری در خط استفاده میکنند.از معایب این نوع از محدود کننده ها میتوان به ابعاد بزرگ، هزینه های بالای ساخت و عملکرد آنها اشاره نمود. محدود کننده های جریان موازی نیز با باز نمودن یک سوئیچ بای پس که در حالت نرمال بسته است و با یک امپدانس موازی شده است ،کار میکند. عیب این دسته از محدودکننده ها نیز در پیچیدگی مکانیزم سوئیچینگ وتاخیر زمانی در وارد کردن امپدانس در زمان لازم میباشد. محدود کننده های دیودی حالت جامد نیز بر اساس مدارات پل دیودی عمل میکنند و بعلت محدودیت های الکترونیک قدرت در ولتاژهای بالا دارای محدودیتهایی میباشند.

بطور خلاصه ،محدود کننده های جریان خطای سنتی بدلایل اقتصادی و فنی که چند نمونه آن نام برده شد، موفقیت چندانی کسب نکرده اند[3].

۳. مبانی ابررسانا:

نظریه ی پایه ای در مورد ابررسانا این است که وقتی تا زیر یک دمای مشخصی (T_C) سرد شود ، مانند یک رسانای کامل عمل می کند ، به این معنی که مقاومتی از خود نشان نمی دهد. البته وقتی که دمای آنها تا T_C افزایش داده شود (درجه حرارت بحرانی) ابررسانا به حالت معمولی رفته و مقاومت زیادی از خود نشان می دهد. این تغییر حالت به حالت نرمال می تواند با افزایش شدت جریان تا بالای J_C (چگالی جریان بحرانی) یا افزایش شدت میدان مغناطیسی تا بالای H_C (شدت میدان بحرانی) انجام شود.

خواص ابررسانا در شکل 2 نشان داده شده است. دیاگرام (a) درجه حرارت ابررسانا را ، زمانی که به یک حالت مقاومت بالا می رود، هنگامی که دما را زیاد می کنیم نشان می دهد. دیاگرام (b) رابطه ی بین شدت میدان مغناطیسی ابررسانا را با درجه ی حرارت آن نشان می دهد. درجه حرارت بحرانی (T_C) و نیز شدت میدان بحرانی (H_C) روی تصویر مشخص شده اند. دیاگرام (c) تغییرات شدت میدان مغناطیسی را نسبت به افزایش چگالی جریان نشان می دهد. در نهایت دیاگرام (d) چگونگی عملکرد خطوط چگالی شار را در حضور یک ابررسانا



شکل2. خواص مواد ابررسانا

نشان می دهد. ابررساناها، همچنین می توانند محیط را در برابر میدان مغناطیسی ایزوله کنند ، به این صورت که ابررسانا اجازه ی نفوذ میدان مغناطیسی را به درون خود نمی دهد. به جای آن ، ابررسانا جریان هایی را ایجاد می کند که اثر میدان خارجی را در درون خود خنثی می کنند. این خاصیت در SFCL های Toroidal کاربرد دارد.

ابررساناهای با درجه حرارت بالا (HTS) موجب پیشرفت زیادی در تکنولوژی ابررساناها شده اند، زیرا این ابررساناها را می توان با نیتروژن مایع سرد کرد. این امر موجب کاهش حجم یخچال ها شده است، به این صورت که می توان آنها را تنها با

صرف چند ژول انرژی در یخچال کوچک سرد کرد. در گذشته برای سرد کردن آنها از سیستم های چندین کیلوواتی که وزن آنها صدها پوند بود استفاده می کردند. البته، حتی HTS ها هم نیاز به بسیار سردتر شدن زیر درجه حرارت اتاق دارند. آنها باید دردرجه حرارت زیر 100- نگه داشته شوند. عبارت High Temprature به این معنی است که $T_C > 30k$.

با کشف پدیده ابررسانایی و در پی یافتن موارد کاربرد آن وجود خاصیت تغییر مقاومت این مواد در اثر دما و میدان مغناطیسی، ایده استفاده از مواد ابررسانایی را در محدود کننده ها ایجاد کرد. به خصوص با پیشرفتهای حاصل شده در این زمینه وکشف مواد ابررسانایی با درجه حرارت بالا این نقش بارزتر شد. یکی از کاربردهای ابررساناها در زمینه قدرت، محدودکننده‌های جریان خطای ابررسانایی می‌باشد[9-10].

۴. کنترلر های خودکار جریان خطای ابررسانا:

چون این محدود کننده‌ها به صورت سری در خط نصب می‌شوند در حقیقت در شرایط عادی عملکرد شبکه، باید دارای امپدانس صفر باشند و این نکته ذهن را متوجه کاربرد ادوات ابررسانایی می‌کند. داشتن مقاومت صفر در شرایط عادی و رسیدن به مقاومت بالا در شرایط خطا از ضروریات یک کنترلر های خودکار جریان خطا می‌باشد که مواد ابررسانا هر دو خاصیت فوق را دارا می‌باشند. یکی از پارامترهای اساسی در مواد ابررسانایی چگالی جریان بحرانی (J_c) است که در مورد ابررسانای نوع دوم می‌تواند در حد بالایی باشد، در این جریان مادهٔ ابررسانایی تغییر فاز داده و وارد حالت رسانایی (نرمال) می‌شود. بنابراین جریان گذرنده از مادهٔ ابررسانا می‌تواند به عنوان یک عامل کنترل کنندهٔ مقاومت عمل نماید. از جمله مشکلات محدودکننده‌های جریان خطای متداول ، طراحی سیستم تشخیص خطا در شبکه می‌باشد تا بتواند این جریان را در همان پریود اول و قبل از رسیدن به اولین پیک آن محدود نماید. در حقیقت این سیستم مهمترین جزء یک محدود کننده است. زیرا اگر جریان خطا با سرعت محدود نشود در همان چند سیکل اول ممکن است به تجهیزات صدمه بزنند. یکی از مهمترین امتیازات محدودکننده‌های ابررسانایی عدم نیاز آنها به سیستم تشخیص خطا می‌باشد. بدین‌ترتیب که با افزایش ناگهانی جریان شبکه به علت خطا، جریان عبوری از محدودکننده از حد جریان بحرانی آن می‌گذرد و بدین ترتیب محدودکننده دارای مقاومت شده و جریان خطا را محدود می‌کند.

.۵- بررسی و طبقه بندی انواع محدودکننده های جریان خطای ابرسانا:

در بررسی محدود کننده های ابررسانایی پارامترهای مختلفی را در نظر می گیرند، برخی از این پارامتـرها عبارتند از : ولتاژ و فرکانس نامی شبکه - جریان نامی که از محدود کننده عبور می کند، (معمولاً این جریان باید در حدود ۲/۱ یا ۳/۱ برابر جریان بحرانی محدود کننده باشد) - قدرت اتصال کوتاه (بیانگر حداکثر قدرت اتصال کوتاهی است که محدود کننده می تواند تحمل کند و معمولاً بر حسب " MVA " بیان می شود) - اندوکتانس محدود کننده (معمولاً در یک محدوده تعریف می شود)- پارامتر " I^2t " که به طور مشابه برای فیوزهای محدود کننده هم تعریف می شود.- زمان عملکرد برای محدود کردن قبل از اولین پیک،- نوع عایقبندی،- ابعاد فیزیکی ، وزن ، نوع مادهٔ ابررسانایی به کار رفته ،- دمای عملکرد ، میدان داخلی ، میدان خارجی در یک متری ، زمان بازگشت ، نوع خنک کننده، قدرت ورودی و [1-25]

...

Non-inductive reactor type

With iron core — Inductive type — transformer type

using zero impedance character — using transformer principle — hybrid type(parallel connect)

without iron core

quench type — not using transformer principle — hybrid type (series connect) / three-phase transformer type / flux –lock type

SFCL

using Meissner effect – magnetic-shield type

Non-quench type

هنگامی که جریان عبوری از ابررسانا تا حد بحرانی افزوده شود، در برابر شار عبوری بطور آنی شاهد مقاومتی خواهیم بود و درصورتیکه این افزایش جریان ادامه یابد، شاهد فروپاشی ابررسانا خواهیم بود. ([3]جریان فروپاشی). نسبت مقاومت در حالت نرمال به حالت شار عبوری به میدان مغناطیسی و درجه حرارت بستگی دارد و در مواد مختلف با هم فرق میکند.عموما این نسبت در کاربرد های ابررسانا بزرگتر از ۱۰۰ نمیباشد.

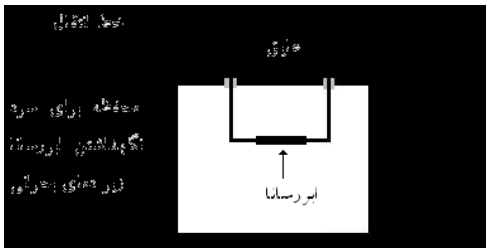
٦-.چهار نمونه از محدودکننده های جریان خطای ابررسانایی :

محدود کننده های ابررسانایی را می توان مستقیما و یا از طریق کوپلاژ در مدار قرار داد.از این رو این محدود کننده ها از نظر طرز قرار گرفتن در شبکه به انواع زیر تقسیم می شوند.

محدود کنندهٔ مقاومتی سری, محدود کنندهٔ القایی, محدود کننده با هستهٔ آهنی, محدود کننده های ابررسانایی Flux Lock

محدود کنندهٔ ابررسانایی مقاومتی سری

همان طور که در بالا به آن اشاره شد ، ساده ترین محدود کنندهٔ جریان ، استفاده از یک مقاومت متغیر و قرار دادن آن به طور سری با خط انتقال می باشد (شکل۳).



شکل۳: نمایش شماتیک

با توجه به اینکه این نوع از محدود کننده های ابررسانایی مستقیما به طور سری در خط قرار می گیرند ، لذا جریان خطا به طور مستقیم از آنها عبور می کند. در حالت خطا که ابررسانا تغییر فاز داده و دارای مقاومت شده است می توان مقاومت ابررسانا

$$R_f = \rho \frac{l}{A}$$

را از رابطه محاسبه نمود. در این

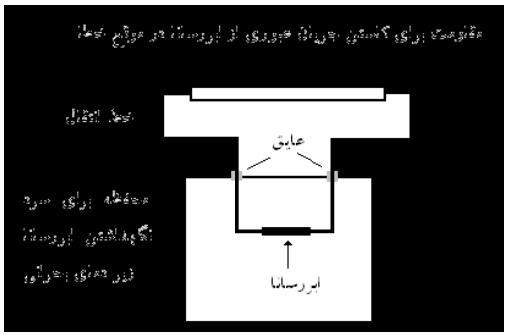
$$A = \frac{I_n}{J_c}$$

رابطه A از رابطه بدست می آید.اگر فرض شود که Rf برابر Zs باشد ، در این صورت طول و سطح مقطع ابررسانا را می توان محاسبه نمود.بعنوان مثال اگر منبع ولتاژ ۲۰ کیلوولت با

---

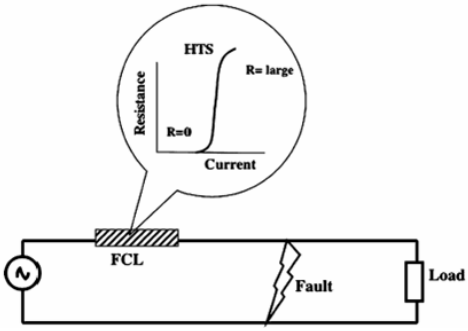
[3] **Quench current**

امپدانس $Z_s = 0.5 + j$ باشد و در حالت عادی ، جریان ۵۰۰ آمپری به بار برسد و اگر ماده ابررسانایی که در دسترس داریم دارای $J_c = 1000 \ A/cm^2$ و $\rho = 10^{-6}\Omega.m$ باشد ، در این صورت به المان ابررسانایی با طول 56^m و سطح مقطع $0.5 \ cm^2$ نیاز است تا جریان خطا را در این حالت ، به نصف جریان خطا در حالت بدون محدودکننده ، محدود نماید. (9^{KA} در حالت حضور ابررسانا و 18^{KA} در حالت بدون محدود کننده). در مدت خطا ، تلفات انرژی در مقاومت ابررسانا تقریبا 50^{MJ} خواهد بود.بنابراین با در نظر گرفتن اینکه جریان خطا ممکن است خیلی زیاد باشد ، لذا تلفات توان در این مقاومت خیلی شدید بوده و گرمای ایجاد شده ممکن است باعث تبخیر ماده سرد کننده و یا حتی ذوب شدن ابررسانا گردد. برای رفع این مشکل بایستی جریان عبوری از ابررسانا را در حالت خطا ، کاهش داد. بدین منظور مطابق شکل از یک مقاومت موازی با ابر رسانا استفاده میکنیم (شکل۴) :

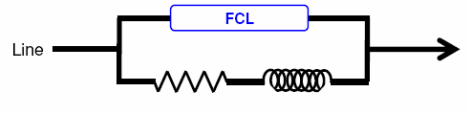


شکل۴: نمایش شماتیک

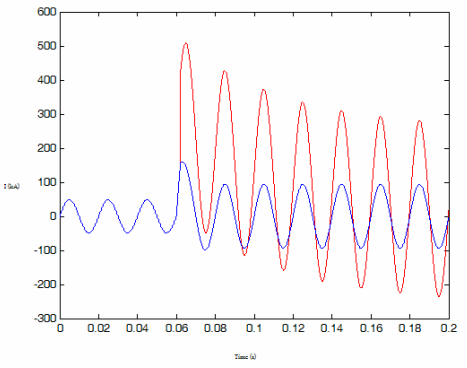
در شرایط عـادی مقاومت معادل بین این مقاومت موازی و مقاومت ابررسانا برابر صفر خواهد بود (زیرا مقاومت ابررسانا در شرایط عادی ، صفر است) لذا در این شرایط جـریـانی از این مقاومت موازی نـمـی گـذرد. در هنگام خطا ، بدلیل مقاومت دار شدن ابررسانا ، مقاومت معادل دیگر صفر نبوده و لذا هم از ابررسانا و هم از این مقاومت ، جریان عبور خواهد کرد. مقدار این مقاومت را می توانیم طوری تعیین نماییم که بخش بیشتری از جریان خطا از آن بگذرد و لذا قسمت اعظمی از تلفات توان ، در این مقاومت تلف خواهد شد.حتی می توان بجای این مقاومت موازی ، از ذخیره کننده های انرژی استفاده نمود تا در موقع بروز خطا ، بجای اینکه توان به صورت گرما تلف شود، در این ذخیره کننده انرژی ذخیره شود . محدود کننده های مقاومتی به دو طریق استفاده میشود(شکل ۵):



– الف=



– ب –



– ج –

شکل ۵. نحوه قرار گیری و عملکرد کنترلر خودکار جریان خطای مقاومتی الف– سری، ب– موازی و –ج – شبیه سازی عملکرد آن (منحنی آبی رنگ: جریان خطا با کنترلر اتوماتیک ابررسانایی, منحنی قرمز رنگ: جریان خطا بدون کنترلر اتوماتیک ابررسانایی[26])

حالت دیگر استفاده به این صورت است که SFCL مقاومتی را بطور موازی به یک مقاومت یا راکتور ببندیم. در حالت نرمال تقریبا مقاومت صفر دارد و تقریبا تمام جریان بار از آن عبور میکند. هنگام خطا مقاومت محدود کننده باندازه ای کافی زیاد میشود ، بطوریکه تقریبا بیشتر جریان خطا از مقاومت یا راکتور عبور میکند.حسن این روش آنست که سریع تر از مدل سری میتواند بازگشت کند

در حالت قبلی ، با توجه به اینکه محدود کننده مستقیما به طور سری در خط قرار می گرفت ، لذا جریان خطا به طور مستقیم از آن عبور نموده و ممکن است ابررسانا تحمل این جریان خطا را نداشته باشد. یک روش برای حل این مشکل استفاده از محدود کننده های ابررسانایی با کوپلاژ القایی میباشد. در این روش ، از دو سیم پیچ که دارای القاء متقابل می باشند ، استفاده می نماییم. سیم پیچ اولیهٔ که از نوع سیم معمولی می باشد را به صورت سری با خط قرار می دهیم و سیم پیچ ثانویه را بوسیلهٔ یک ابررسانا ، اتصال کوتاه می نماییم. برای اینکه کوپلاژ بین سیم پیچ های اولیه و ثانویه ماکزیمم باشد ، می توان از هستهٔ های فرومغناطیسی استفاده نمود.

اگر جریان و تعداد دور سیم پیچ اولیه بترتیب I1 و N1 و جریان وتعداد دور سیم پیچ ثانویه I2 و N2 با شد ، در این صورت :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

لذا با انتخاب مناسب N1 و N2 می توانیم جریان I2 (جریان عبوری از ابررسانا) را به مقدار دلخواه خود کاهش دهیم و در واقع می توانیم از مواد ابررسانایی با جریان بحرانی (Jc) پایینتر استفاده نماییم.

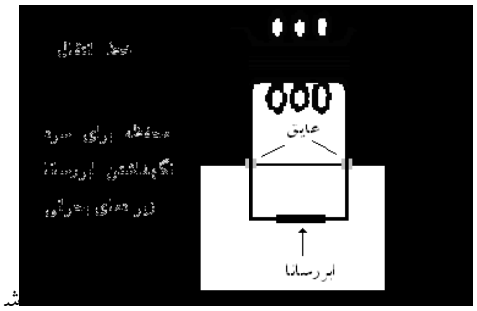
از طرفی می دانیم امپدانس دیده شده در اولیه یک ترانسفورماتور برابر است با :

" مجذور نسبت ترانس ضرب در امپدانس متصل به سیم پیچ ثانویه ". یعنی :

$$Z_{in} = Z_2(\frac{N_1}{N_2})^2$$

در حالت عادی ، مقاومت ابررسانا که در ثانویه قرار دارد برابر صفر است لذا Z2=0 بوده و در نتیجه Zin=0 خواهد بود.یعنی دراین شرایط محدود کننده هیچ تاثیری روی سیستم قدرت ندارد. البته درعمل بدلیل مقاومت کم سیم پیچ مسی ثانویه ، مقدارناچیزی مقاومت در اولیه ظاهر خواهد شد لذا حتی در حالت عادی ، مقداری تلفات توان خواهیم داشت و این یکی از معایب محدود کننده با کوپلاژ القایی می باشد. همچنین در این حالت به دلیل وجود سیم پیچ در میدان مغناطیسی ، مقداری خاصیت سلفی در مدار بوجود می آید و برای اصلاح آن از خازن اصلاح کننده که به طور سری در خط قرار می گیرد ، استفاده می کنیم.

در حالت خطا ، بدلیل افزایش جریان عبوری از سیم پیچ اولیه (I1) ، جریان عبوری از ابررسانا که در ثانویه قرار دارد (I2) نیز افزایش یافته و ابررسانا وارد حالت معمولی می گردد. بنابراین Z2 دیگرصفر نبوده و لذا امپدانس دیده شده در اولیه (Zin) نیز صفر نخواهد بود. با توجه به اینکه اولیه ترانسفورماتور با خط انتقال سری شده است لذا Zin باعث کاهش جریان خطا خواهد شد

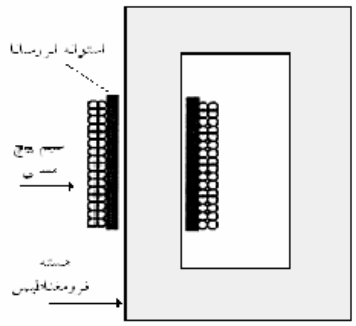


کل ۷: نمایش شماتیک

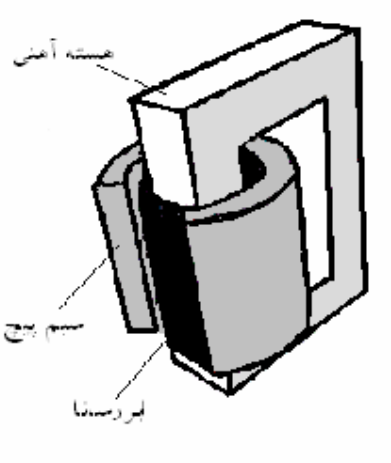
۷ - محدود کننده های ابررسانایی با هستهٔ آهنی

می دانیم یک ماده ابررسانا در زیر دمای بحرانی ، اجازه ورود میدان مغناطیسی به درون خود را نمی دهد و میدان فقط در محدوده کوچک نفوذ پذیری ، اجازه ورود دارد. می توان از این ویژگی مواد ابررسانا ، در ساخت محدودکننده های جریان خطا استفاده نمود.

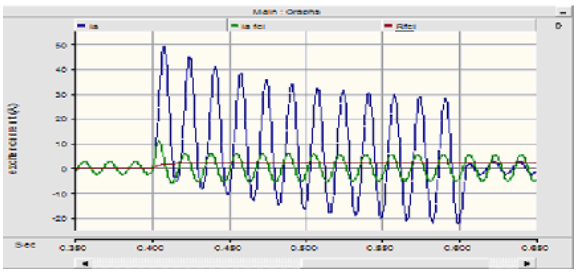
محدود کننده های ابررسانایی با هسته آهنی براساس این خاصیت ساخته شده اند. در این نوع محدود کننده از یک هسته فرومغناطیس استفاده شده است. یک بازوی هسته ، از درون یک استوانه توخالی از جنس مادهٔ ابررسانایی ، عبور کرده است و در روی این استوانه ابررسانا ، یک سیم پیچ قرار داده شده است (و یا اینکه سیم پیچ در روی بازوی دیگر هسته پیچیده شده است) که این سیم پیچ بطور سری با خط انتقال قرار می گیرد.



– الف=



– ب-

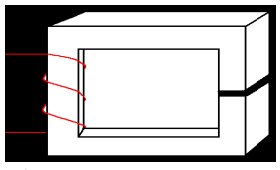


– ج–

شکل ۵: نحوه قرار گیری و عملکرد کنترلر خودکار جریان خطای ابررسانایی با هسته آهنی الف– نمایش شماتیک ، ب– حوه قرار گیری و –ج – شبیه سازی عملکرد آن (منحنی آبی رنگ: جریان خطا بدون کنترلر اتوماتیک ابررسانایی, منحنی قرمز رنگ: جریان خطا با کنترلر اتوماتیک ابررسانایی ,منحنی قرمز رنگ: ولتاژ روی کنترلر اتوماتیک ابررسانایی[1,2,4,5,7,14,24,25,26]

در شرایط عادی ، استوانهٔ توخالی در فاز ابررسانایی بوده و لذا اجازه ورود شار مغناطیسی به درون خود را نمی دهد. بنابراین دراین حالت ، در هستهٔ فرومغناطیس نیز شاری وجود ندارد. بعبارت دیگر سیم پیچیده شده روی استوانه ابررسانا بدلیل عدم وجود میدان مغناطیسی ، دارای خاصیت سلفی نخواهد بود لذا جریان خط انتقال بدون اینکه در مسیر خود ، اندوکتانسی را ببیند ، از سیم پیچ می گذرد. در حالت خطا ، بدلیل افزایش جریان عبوری از سیم پیچ ، میدان مغناطیسی ایجاد شده بر اثر

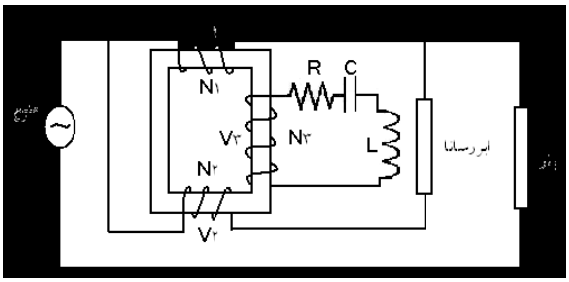
عبور این جریان نیز افزایش یافته و بدلیل بیشتر شدن این میدان از شدت میدان مغناطیسی بحرانی ، ابررسانا از فاز ابررسانایی خارج و وارد حالت معمولی می شود. لذا دیگر مانعی برای ورود میدان مغناطیسی به درون هستهٔ فرومغناطیس ، وجود ندارد. بعبارت دیگر در این حالت بدلیل نفوذ شارمغناطیسی در هسته ، هسته اشباع شده و در نتیجه سیم پیچ به یکباره تبدیل به یک اندوکتانس بزرگ می شود و این امر باعث کاهش جریان خطا می گردد. همچنین این اندوکتانس از نرخ افزایش جریان (di / dt) نیز به طور محسوسی می کاهد. در این محدود کننده ، از مادهٔ ابررسانایی به صورت یک استوانهٔ نازک توخالی استفاده شده (که در اصطلاح به آن " Thick Film " می گویند) که این موضوع باعث سهولت در امرخنک سازی و صرفه جویی در ماده ابررسانا می گردد. نوع دیگر از این دسته که FCL با شکاف هوایی نیز نامیده می شود ، دارای یک دیسک از جنس ابررسانا است که در شکاف هوایی نازک ایجاد شده در هسته ، قرار گرفته است. در حالت عادی ، دیسک که در فاز ابررسانایی است بدلیل اینکه اجازه عبور میدان مغناطیسی را نمی دهد ، مانع از این می شود که هسته به فرم یک مدار مغناطیسی کامل عمل نماید و در نتیجه سیم پیچ اولیه دارای امپدانس کمی خواهد بود. موقعی که دیسک از فاز ابررسانایی خارج میشود (بدلیل روی دادن خطا) ، حلقه مغناطیسی ، کامل شده و امپدانس ایجاد شده ، جریان خطا را محدود می کند.



شکل ۹- نمای محدود کننده با هسته آهنی توسعه یافته

۸ -محدود کننده های ابررسانایی Flux Lock

می دانیم اگر جریان عبوری از ابررسانا از جریان بحرانی (Jc) بیشتر گردد و یا اگر شدت میدان مغناطیسی اعمال شده به ابررسانا از شدت میدان مغناطیسی بحرانی (Hc) بیشتر گردد ، مادهٔ ابر رسانایی تغییر فاز داده و وارد حالت معمولی می شود. از این دو ویژگی ابررساناها به طور همزمان استفاده می نماییم تا مقاومت حالت گذار افزایش یافته و در نتیجه باعث بهبود عملکرد محدود کننده گردد. برای این منظور بایستی بتوان در لحظهٔ خطا ، یک میدان مغناطیسی به مادهٔ ابررسانایی اعمال نمود. ساختار کلی این نوع از محدود کننده‌های ابررسانایی در شکل زیرنشان داده شده است.



شکل ۱۱: نمایش شماتیک

در شرایط عادی ، ولتاژ سیم پیچهای ۱ و ۲ و ۳ به صورت زیر می باشد :

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$V_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$V_3 = N_3 \frac{d\phi}{dt}$$

در این رابطه ϕ فـوران عبوری از درون هسته مغناطیسی و Ni نشـان دهندهٔ تعداد دورهای سیم پیچ i ام می باشد. از طرفی طبق شکل ، سیم پیچ ۱ با مجموعه سری سیم پیچ ۲ و ابررسانا ، موازی است لذا :

$$V_1 = V_2 + V_{Sup}$$

با توجه به اینکه در شرایط عادی ، ابررسانا دارای مقاومت صفر است لذا : $V_{Sup} = 0$

بنابراین :

$$V_1 = V_2$$
$$\Rightarrow N_1 \frac{d\phi}{dt} = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$
$$\Rightarrow (N_1 - N_2)\frac{d\phi}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\phi}{dt} = 0 \qquad (N_1 \neq N_2)$$

با توجه به اینکه تغییرات شار مغناطیسی نسبت به زمان صفر شده است ، نتیجه می گیریم که فوران باید مقدار ثابتی داشته باشد. نتیجه دیگری که از این رابطه بدست می آید به صورت زیر است:

$$V_3 = N_3 \frac{d\phi}{dt} = 0$$

بنابراین جریان عبوری از سلف L برابر صفر بوده لذا میدان مغناطیسی ایجاد شده بر اثر جریان این سلف نیز برابر صفر خواهد بود. لذا در شرایط عادی ، میدان مغناطیسی تاثیر گذار بر ابررسانا ، وجود ندارد.

در حالت خطا ، بدلیل افزایش جریان عبوری از سیم پیچ ۲ ودر نتیجه افزایش جریان ابررسانا ، مادهٔ ابررسانایی وارد فاز معمولی شده و دارای مقاومت می شود و بنابراین در این حالت دیگر رابطهٔ $V_{Sup} = 0$ برقرار نخواهد بود و لذا :

$$V_1 = V_2 + V_{\sup} \Rightarrow V_1 \neq V_2$$
$$\Rightarrow N_1 \frac{d\phi}{dt} \neq N_2 \frac{d\phi}{dt}$$
$$\Rightarrow (N_1 - N_2)\frac{d\phi}{dt} \neq 0 \Rightarrow \frac{d\phi}{dt} \neq 0$$

بنابراین در این حالت بدلیل تغییر شار مغناطیسی ،

$V_3 = N_3 \frac{d\phi}{dt} \neq 0$ بوده و لذا جریانی عبوری از سلف L خواهیم داشت. میدان مغناطیسی ناشی از این جریان ، به مادهٔ ابررسانایی اعمال شده و در نتیجه مقاومت حالت معمولی ابررسانا افزایش پیدا می کند و این باعث بهبود عملکرد محدود کننده می گردد.

۹. نتیجه گیری:

در این مقاله به بررسی ایده اصلی استفاده از کنترلر های خودکار جریان خطای ابررسانایی پرداختیم. روشهای محدود سازی بر این اصل اساسی استوار هستند که در هنگام بروز خطا یک امپدانس اضافی به صورت سری به مدار تزریق گردد ، البته این امپدانس باید در شرایط عملکرد عادی مدار به مقدار ناچیزی و در حالت ایده ال به صفر تنزل یابد. آنچه محدود کننده های مختلف را از هم متمایز می کند نحوه ایجاد این امپدانس می باشد. در این راستا با اشاره به خواص مواد ابررسانا، مزایای استفاده از این مواد را در محدود کننده ها مشاهده نمودیم.در محدود کننده های ابررسانایی تغییر فاز ماده از حالت ابررسانایی به رسانایی باعث ورود امپدانس اضافی، به صورت سری، به مدار می شود. همچنین به معرفی و شبیه سازی عملکرد دو نمونه از محدودکننده های جریان خطای ابررسانایی (مقاومتی _ هسته آهنی) پرداختیم.

در حال حاضر به جرات می توان ادعا کرد که منظور از محدود کننده جریان خطا در تمامی کشورهای توسعه یافته نوع ابررسانایی آن می باشد.

۱۰. مراجع:

[1] M. H. Varahram, Sh. Behzadi Rafi "*A Novel Approach to Modeling the Superconductive Shielded Core Reactor (SSCR)*" IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control (2003), Vol. III, pp. 1261-1264

[2] M.Borhani, M. H. Varahram, Sh. Behzadi Rafi "*Application of Super-conductivite Equipment in Power Industry* "18th International Power System Conference PSC 2003, Vol. III, pp. 59-64

[3] A. Ehsani, M. H. Varahram," Applications of Superconductivity in the New Restructured Electric Power Utility Industry" 18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005) Tokyo, Japan, 23-26 October 2005, SAP-9-18

[4] Sh. Behzadi Rafi, M. H. Varahram , " A Novel Approach to Modeling the SSCR" 19th International Power System Conference PSC 2004, Tehran Iran; 21.11.2004 – 25.11.2004, 98-F-CAP-799

[5] M. Alizadeh-Sangari, Sh. Behzadi Rafi, M. H. Varahram, M.R. Alighadr "Using Superconductive fault current limiters in Distribution systems";7th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 05) Vienna, Austria: 11.10.2005 – 15.10.2005, TU-P2-54

[6] S. Soltani, M. H. Varahram,: "Application of SMES Unit for Voltage Profile Improvements " 7th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 05), Vienna, Austria: 11.10.2005 – 15.10.2005, TU-P2-23

[7] M. H. Varahram, Sh. Behzadi-Rafi, Gh. Savar, A. Azari " A New Approach to Modeling the Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter "7th European Conference on Applied Super-conductivity (EUCAS 05) Vienna, Austria: 11.10.2005 – 15.10.2005, TU-P2-69

[8] R. Shafiei-Sabet, M. Marvi, M. H. Varahram, A. Lotfjou, Sh. Behzadi Rafi "Modeling the V-I characteristic of high temperature Superconductors for Fault current limiting Applications "; 7th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 05) Vienna, Austria: 11.10.2005 – 15.10.2005, TU-P2-48

[9] محمد هادی ورهرام، رضا حاجی ها ، شایان بهزادی رفیع، روشهای محدود سازی جریان اتصال کوتاه در شبکه قدرت، دانشگاه صنعتی شریف،دانشکده مهندسی برق.

[10] محمد هادی ورهرام، هومن عربیان حسین آبادی، شایان بهزادی رفیع، جایابی بهینه محدود کننده‌های ابررسانائی در شبکه انتقال ایران، پژوهشکده الکترونیک دانشگاه صنعتی شریف، گزارش اول، دوم و نهایی،۱۳۸۰.

[11]Yu jiang , Shi dongyuan, Duan Xianzhong , Tang Yeujin, Cheng Shijie, "comparison of supercon-ducting fault current limiter in power system", IEEE 2001.

[12] "Superconducting fault current limiters" Andrew Rowley is with EA Technology, Capenhurst, Chester CHI 6ES.

[13] N. Engelman et al., "Field Test Results for a Multishot 12.47k V Fault Current Limiter."IEEE Trans. Power Delivery 6-1081-1087 (1991)

[14] Michiharu Ichikawan, Masayuki Okazaki ",A Magnetic Shielding Type SuperConducting Fault Current Limiter Using a Bi2212 Thick Film Cylinder" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.5, No.2, June 1995.

[15] Lin Ye, LiangZhen Lin, Klaus-Peter Juengst, "Application Studies of Superconductiv Fault Current Limiters in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.12, No.1, March 2002.

[16] S. Kozak, T. Janowski, “Physical and Numerical Models of Superconducting Fault Current Limiters”, IEEE Transactions on Applied Super-conductivity, Vol.13, No.2, June 2003.
[17] H. Hatta, Sh. Muroya, T. Nitta, Y.Shirai, M.Taguchi, “Experimental Study on Limiting Operation of Superconducting Fault Current Limiter in Double Circuit Transmission Line Model System”, IEEE Transactions on Applied Super-conductivity, Vol.12, No.1, March 2002.
[18] Y. Shirai, M.Taguchi, M.Shiotsu, H.Hatta, S.Muroya, T.Nitta, “A Proposal of New Operating Procedure of Transformer Type Fault Current Limiter”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.12, No.1, March 2002.
[19] H.Kado, M.Ichikawa, “Performance of a High-Tc Superconductive Fault Current Limiter- Design of a 6.6 kv Magnetic Shielding Type Superconductive Fault Current Limiter-“, IEEE Trans-actions on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, June 1997.
[20] Xueguang Wu, Joseph Mutale, Nick Jenkins and Goran Strbac,” An investigation of Network Splitting for Fault Level Reduction”, The Manchester Centre for Electrical Energy (MCEE), UMIST, UK, January 2003.
[21] P.G. Slade et al., "*The Utility Requirements for a distribution Fault Current Limiter*.", IEEE Trans. Power Delivery 7, 507-515 (1992).
[22] N. Engelman et al., "*Field Test Results for a Multishot 12.47k V Fault Current Limiter.*"IEEE Trans. Power Delivery 6-1081-1087 (1991)
[23] Michiharu Ichikawan, Masayuki Okazaki,“*A Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter Using a Bi2212 Thick Film Cylinder*” IEEE Transactions on Applied Super-conductivity, Vol.5, No.2, June 1995.
[24] S. Behzadi, H. Varahram,” Protection of Induction Generators by means of Superconductive Shielded Core Reactor (SSCR)”, IEEE Transactions on Applied Supercon-ductivity, 2006 (submitted)
[25] M. H. Varahram, M. R. Jahed, N. Sadati, H. Akbarzadeh, M.R. Alighadr, R. Shafiei-Sabet "Using SFCL and SMES for Stability Enhancement of Synchronous Generators by Automatic and PID Controllers"; IEEE. Trans. .PAS (to be submitted)
[26] M. H. Varahram, A. Moradi, S.R. Yousefi,“ Measure reduction of short circuit in high power network by employing SFCL, without any requirement for replacing circuit breakers” "; Transactions on Applied Superconductivity, 2006 (to be submitted)