



کاربرد محدودساز رزنانسی LC برای کاهش سطح اتصال کوتاه در پستهای توزیع

محمدجعفر بهمنی - سیدحمید حسینی

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف

چکیده:

افزایش جریان اتصال کوتاه در سیستم توزیع معضلی است که به دلیل افزایش ظرفیت تولیدی سیستم و از طرف دیگر رشد بهم پیوستگی ایجاد می‌شود. کاهش جریان اتصال کوتاه به خصوص در سیستم توزیع مستقیماً بر کاهش قیمت و هزینه تجهیزات مرتبط با جریان خطا تأثیر دارد. در این مقاله به بررسی یک نوع از محدودکننده‌های جریان خطا بنام محدودساز رزنانسی LC پرداخته شده و با استفاده شبیه‌سازی کامپیوتری توسط برنامه EMTP مزایا و معایب کاربرد این نوع محدودساز در موقعیتهای مختلف یک شبکه نمونه مشخص و بررسی می‌گردد.

افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی دو راه حل واحد های تولیدی بزرگ و جدید به شبکه و افزایش بهم پیوستگی شبکه ها با احداث خطوط انتقال و توزیع بین پستهای فشار قوی را پیشنهاد می کند. با یک تجزیه و تحلیل ساده مشخص می شود که دو عامل فوق باعث افزایش سطح اتصال کوتاه در شینهای سیستم می شوند که چنانچه میزان افزایش جریان اتصال کوتاه زیاد باشد نیاز به تعویض تجهیزات شبکه نظر کلیه های قدرت خواهد بود که در نتیجه هزینه های زیادی بر شبکه و به خصوص بخش توزیع تحمیل خواهد کرد یکی از مسایلی که در چند دهه گذشته نظر محققین را به خود جلب نموده ارائه روشهایی برای کاهش جریان اتصال کوتاه⁽¹⁾ بوده است.

در سطور بعدی به یکی از ابزارهای جدید و مؤثر محدودسازی جریان اتصال کوتاه بنام محدودساز رزناسی LC پرداخته می شود و سپس نتایج شبیه سازی کامپیوتری کاربرد آن در یک شبکه توزیع نمونه بررسی می شود که مؤید مؤثر بودن این روش می باشد:

۲ - قابلیت های محدودسازی جریان خطا (FCL)⁽¹⁾ :

محدودساز جریان خطا وسیله ای است که به صورت سری در مدار قرار گرفته و باید در شرایط نرمال کار امپدانس کوچکی از خود نشان دهد و در شرایط بروز خطا این امپدانس سریعاً افزایش یابد تا جریان محدود شود. اساساً همه انواع FCL ها را می توان به صورت یک کلید NC⁽²⁾ که با یک امپدانس یا مقاومت موازی شده باشد فرض نمود. نوع کلید، مدار کنترل و نوع امپدانس می تواند از هر طرح به طرح دیگر بسیار متفاوت باشد. کلید می تواند DC باشد که در طی یک زمان از پیش تنظیم شده و بدون احتساب زاویه فازی ولتاژ، جریان را سریعاً به امپدانس منتقل نماید و یا اینکه کلید AC یا فیوز باشد که در آن افزایش امپدانس کندتر از کلید DC بوده و تا رسیدن جریان به اولین صفر آن میزان جریان با یک مقاومت تقسیم و پس از عبور از صفر کل جریان از داخل مقاومت عبور خواهد کرد. سرانجام همانطور که بعداً شرح داده می شود FCL می تواند یک مدار رزناسی LC باشد که مقادیر اجزاء آن طوری تنظیم می شوند که امپدانس زیادی را به مدار تحمیل کنند.

بطور کلی یک FCL در حالت ایده آل باید این نیازها را مرتفع کند: (۱) در حالت وصل (ON) افت ولتاژی برابر صفر داشته باشد، (۲) در حالت قطع (OFF) مقاومت بالایی داشته

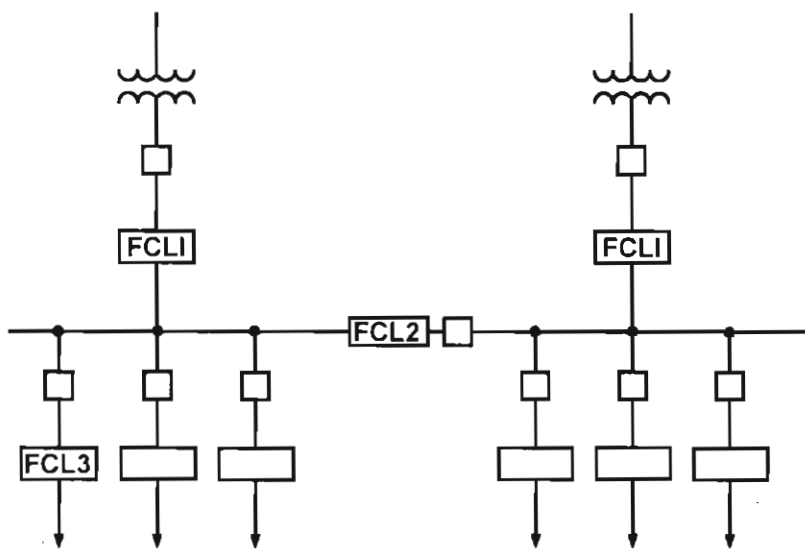
1 - Fault Current Limiter.

2 - Normally Closed.

باشد، ۳) قبل از رسیدن به اولین پیک جریان وارد مرحله عمل شود، ۴) جریان خطی گذرا را کاهش دهد، ۵) مؤلفه DC جریان خطا را تا حد قابل قبولی حذف کند، ۶) جریان خطا را در حالت ماندگار محدود نماید.

۳- محل نصب FCL :

برای کاربرد FCL در سیستم توزیع قواعدی وجود دارند که با توجه به شکل ۱ بیان می‌شوند این شکل یک پست بزرگ دارای چند ترانسفورماتور توزیع با در نظر گرفتن محل‌های ممکن برای نصب FCL را نشان می‌دهد. در شبکه‌های توزیع توسعه یافته استفاده از چند ترانسفورماتور به صورت موازی بر روی شینه‌های کوپل شده با یکدیگر متعارف می‌باشد. اولین قاعده در کاربرد FCL این است که محدودسازی جریان سیستم توزیع برای رفع خطا بکار نمی‌رود و فقط دامنه جریان را طوری محدود می‌کند که دیزنکتور با ایمنی کامل و بدون وجود اضافه بار عمل قطع را انجام دهد. توجه به این نکته مهم است که محدودسازی جریان خطا نبایستی سیستم حفاظتی را مختل سازد [8].



« شکل ۱- محل‌های نصب FCL در یک پست بزرگ توزیع. »

دومین قاعده اینکه FCL باید طوری قرار گیرد که از حداکثر تعداد کلیدهای ممکن حفاظت کند. صرفه اقتصادی این روش مشخص است. با نصب FCL در موقعیت ترانسفورماتور (FCL1) و با فرض فعال شدن آن سهم ترانسفورماتور مربوطه از جریان خطا

کاهش یافته و یا حذف می‌شود. همچنین جریان قطع دژنکتور خط نیز کاهش می‌یابد. چنانچه FCL در موقعیت شین ارتباطی (FCL2) قرار گیرد، شین بطور مؤثری تقسیم شده و خط معیوب تنها از طریق یکی از ترانسفورماتورها تغذیه می‌گردد. نصب FCL در موقعیت فیدر (FCL3) دارای این مزیت است که جریان نامی آن نسبت به حالات قبلی کوچکتر است اما دارای دو عیب می‌باشد به این صورت که برای بررسی هر فیدر یک FCL مورد نیاز است و نسبت به FCL مستقر در شین ارتباطی دارای تلفات بیشتری است زیرا جریان بار مداوماً از آن عبور می‌کند. بطور کلی انتخاب محل استقرار FCL را می‌توان با احتساب سطوح محدودسازی جریان که با توجه به ملاحظات عملی اقتصادی و طراحی بدست می‌آیند انجام داد.

۴ - محدودساز رزناسی LC :

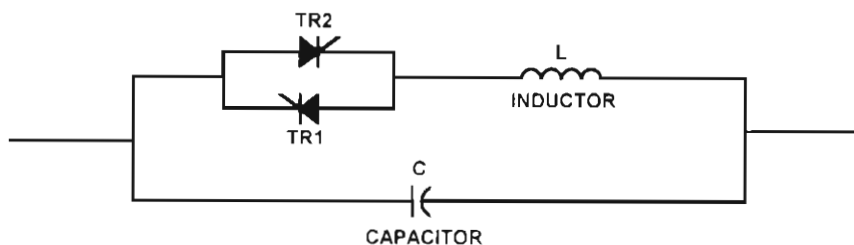
چنانچه بخواهیم قابلیت‌های مورد اشاره دور از واقعیت نباشند طبعاً باید برای محدود کردن جریان خطا از روشهایی استفاده نمود که در عین حال که جریان اتصال کوتاه را در شبکه محدود می‌نمایند در شرایط کار عادی نیز اشکال قابل ملاحظه‌ای ایجاد نکنند. قدیم‌ترین و عمومی‌ترین تکنیک، قرار دادن سیم پیچ سری در خطوط خروجی مدار و یا در بخش ارتباطی شین‌ها است که بر اثر آن امپدانس مدار افزایش یافته و جریان خطا کاهش می‌یابد. فیوزهای محدودساز جریان قادرند جریان خطا را در اولین یک آن قطع کنند ولی از طرف دیگر اضافه ولتاژ حاصل از این قطع ناگهانی می‌تواند خطرناک باشد. روشهای دیگری هم نظیر استفاده از FCLهای نوع کلیدی، ابر رساناها و یا کلیدهای خلاء نوع قوسی^(۱) پیشنهاد و ارائه گردیده‌اند که در حال حاضر استفاده از آنها به دلایلی از جمله بالا بردن هزینه و محدودیت رنج ولتاژ و جریان عملی نیست.

پیشرفتهای چند دهه اخیر در زمینه الکترونیک استفاده از کلیدهای تریتوری را برای کنترل سیستمهای قدرت ممکن نموده است. و این امر احتمال استفاده از این وسایل جهت محدودسازی جریان اتصال کوتاه در شبکه را خیلی زیاد کرده است. در اینجا به بررسی جدیدترین روش کاهش جریان خطا با استفاده از مدار رزناسی می‌پردازیم که از نظر تئوری و عمل در حد قابل توجیهی است. در این روش از ترکیب موازی یک سیم پیچ و خازن که رویهمرفته مدار رزناسی LC را تشکیل می‌دهند استفاده می‌شود (شکل ۲).

در شرایط بروز خطا مدار رزناسی LC به صورت سری در مسیر جریان خطا قرار گرفته و

1 - Arc Type Circuit Breaker.

امپدانس آن به محض ورود سریعاً افزایش یافته و جریان خطا را محدود می‌نماید. چنانچه از تلفات چشم‌پوشی کنیم در شرایط ماندگار امپدانس مدار رزنانشی بسیار بزرگ و در واقع از نظر تئوری بی‌نهایت می‌باشد. واضح است که مدار رزنانشی برای برآورده کردن این نیاز بایستی بلافاصله پس از برقراری خطا در مدار قرار گیرد. این امر مستلزم کاربرد کلیدهای سریع‌العمل با زمان عملکردی حدود چند میلی‌ثانیه می‌باشد. ظرفیت حمل جدیدترین تریتورها به حدود چند هزار آمپر می‌رسد که با توجه به روند رو به کاهش قیمت نیمه‌هادیها کاربرد این وسایل از نظر اقتصادی نیز به صرفه خواهد بود.



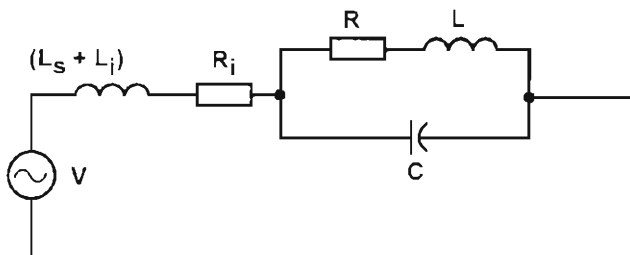
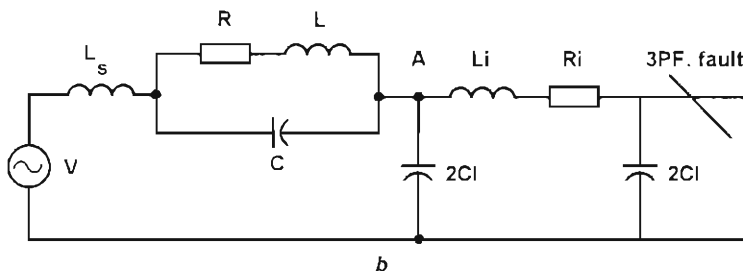
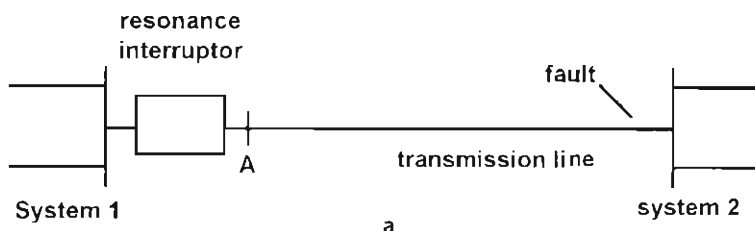
« شکل ۲ - محدودساز رزنانشی LC »

در شکل ۲ خازن C به صورت سری با خط انتقال قرار گرفته و عمل جبران‌سازی را انجام می‌دهد. به هنگام وقوع اتصال کوتاه تریتورهای TR₁ و TR₂ آتش شده و اندوکتانس L را به صورت موازی با C در مدار قرار می‌دهند. مدار حاصل که یک مدار رزنانشی می‌باشد جریان خطا را محدود می‌سازد. زمان لازم برای ایجاد این حالت بسیار کوچک و در حد میلی‌ثانیه می‌باشد. روشن شدن تریتورها در جریان صفر تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار جریان به حدی برسد که بطور مکانیکی قابل قطع باشد. با قطع آتش از روی گیتها، کلیدهای تریتوری در صفر بعدی جریان خاموش می‌شوند که اگر خطا حذف شده باشد دوباره سیستم به کار نرمال خود باز می‌گردد.

۱-۴ - تجزیه و تحلیل عملکرد و معادلات :

با استفاده از مدار شکل ۳ عمل محدودسازی جریان را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در شکل یاد شده محدودساز جریان در یک خط ارتباطی بین دو سیستم قدرت بزرگ نصب گردیده است. سیستم از دید شین با یک منبع ولتاژ و یک اندوکتانس سری نمایش داده می‌شود. برای خطوط انتقال از مدار معادل پی استفاده شده و برای نمایش محدودساز جریان نیز یک اندوکتانس و خازن موازی بکار رفته است. مدار معادل پس از وقوع یک خطای سه فاز متقارن

روی خط انتقال به صورت شکل ۳- b نمایش داده می شود. برای ساده تر شدن مطالعه تحلیلی سیستم از خازن خط نیز چشم پوشی نموده که به این ترتیب شکل ۳- c نتیجه می شود.



« شکل ۳- مدار معادل برای محاسبات جریان خط (a) دیاگرام مدار، (b) مدار معادل، (c) مدار معادل ساده شده.

جریان مدار معادل شکل ۳- c با استفاده از تبدیل لاپلاس به قرار زیر است:

$$\frac{\sqrt{2}V}{\sqrt{3}} \frac{\omega}{S^2 + \omega^2} = I \left[R_i + S(L_s + L_i) + \frac{(SL + R)}{SC} / \frac{(1 + SL + R)}{SC} \right] \quad (1)$$

که در آن:

ω = فرکانس زاویه ای V = مقدار ولتاژ تغذیه

C = خازن مدار رزنانس L_i = اندوکتانس خط

$$R = \text{مقاومت اهمی مدار رزنانس} \quad R_i = \text{مقاومت اهمی خط}$$

$$I_o = \text{جریان اولیه در منبع و امپدانس خط} \quad L_s = \text{اندوکتانس منبع}$$

$$L = \text{اندوکتانس مدار رزنانس}$$

جریان خطایی که از معادله بالا محاسبه می‌گردد دارای یک مؤلفه ماندگار، دو مؤلفه DC و دو مؤلفه گذرا می‌باشد. اگر مدار LC با فرکانس منبع تغذیه تنظیم شود ($\omega = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$) مؤلفه ماندگار به صورت زیر خواهد بود:

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V}{\sqrt{\{\omega(L_{si} - L)\}^2 + [R_s + (L/RC)]^2}} \sin(\omega t - \phi_o) \quad (2)$$

که در آن $L_{si} = L_s + L_1$ و ϕ_o زاویه فازی امپدانس مدار در حالت رزنانس می‌باشد. با فرض اینکه مقاومتها برابر صفر باشند (برای سهولت در تحلیل) مؤلفه‌های DC و گذرا توسط چهار معادله زیر بیان می‌شوند:

$$I_{dc1} = I_o \frac{L_{si}}{L_{si} + L} \quad (3)$$

$$I_{dc2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V}{\omega(L_{si} + L)} \quad (4)$$

$$I_{11} = I_o \frac{L}{L + L_{si}} \cos \beta t \quad (5)$$

$$I_{12} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V}{\omega L_{si}} \frac{\omega^2}{\beta^2 - \omega^2} \frac{L}{L + L_{si}} \cos \beta t \quad (6)$$

که در معادلات فوق $\beta = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L + L_{si}}{L_{si}}}$ می‌باشد. اگر مدار LC روی فرکانس منبع تغذیه تنظیم شود معادله (۶) به صورت زیر خواهد شد:

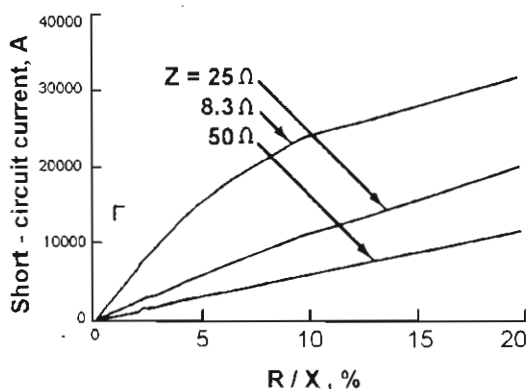
$$I_{12} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V}{\omega_o (L + L_{si}) \cos \beta t} \quad (7)$$

مؤلفه‌های DC و گذرا در صورتی که مقاومتها برابر صفر نباشد به صورت نمایی میرا می‌شوند.

۲-۴- آنالیز حساسیت:

اگر مدار LC روی فرکانس تغذیه تنظیم شده باشد طبق معادله (۲) ملاحظه می‌شود که مقاومت داخلی اندوکتانس بکار رفته در مدار محدودساز بطور مؤثری در توانایی آن برای محدود کردن جریان اثر می‌گذارد (شکل ۴). بنابراین بهتر است که مقاومت اهمی اندوکتانس محدودساز جریان تا حدی که تکنولوژی ممکن می‌سازد به حداقل رسانیده شود. به عنوان

نمونه چکهایی (chokes) که فعلاً در بازار موجود می‌باشند دارای نسبت مقاومت اهمی به راکتانس حدود 5% هستند. علاوه بر این در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که بالا بودن امپدانس مشخصه نیز خود یک مزیت بشمار می‌آید.



« شکل ۴- اثر پارامترهای مدار بر جریان خطای ماندگار. »

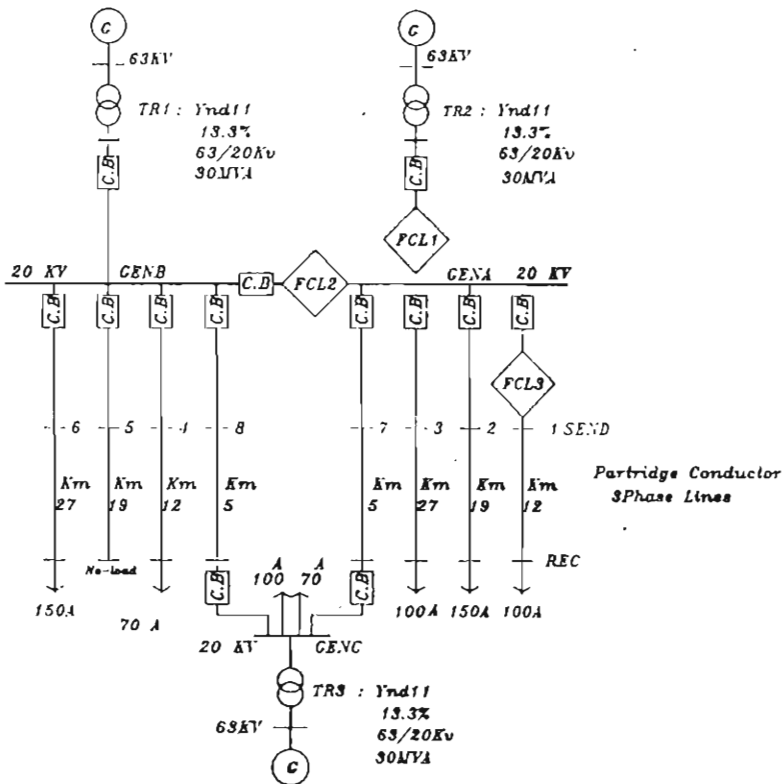
بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگر فرکانس رزونانس مدار LC بیش از فرکانس تغذیه باشد امپدانس محدودساز اندوکتیو بوده و جریان خطا را بطور مؤثر کاهش می‌دهد. مؤثرترین حالت محدودساز هنگامی است که روی فرکانس تغذیه تنظیم گردد که در این صورت امپدانس اهمی بوده و مقدار بالایی خواهد داشت. چنانچه فرکانس از این مقدار هم کمتر انتخاب شود امپدانس مدار حالت خازنی پیدا می‌کند اما در فرکانسهای مابین ω_0 و ϕ کل امپدانس مدار در حالت القایی باقی می‌ماند زیرا امپدانس خط بزرگتر از امپدانس مدار LC است. در این ناحیه با کاهش فرکانس، جریان شدیداً افزایش می‌یابد. در $\beta = \omega$ امپدانس اهمی شده و رزونانس سری رخ داده و جریان به حداکثر مقدار خود می‌رسد. کاهش بیشتر فرکانس رزونانس مدار LC جریان را کاهش می‌دهد. چنانچه مدار LC روی فرکانس تغذیه تنظیم شده باشد می‌توان جریان گذرا از معادلات (۵) و (۷) محاسبه نمود. در این حالت جریان به مجموع راکتانس خط، منبع تغذیه و محدودساز جریان بستگی دارد. معادله (۷) نشان می‌دهد که بزرگ بودن اندوکتانس و کوچک بودن ظرفیت محدودساز یک مزیت به شمار می‌آید. اندازه بهینه باید در ارتباط با قیمت تجهیزات محاسبه گردد. همچنین طبق معادلات (۳) و (۴) افزایش اندوکتانس محدودساز باعث کاهش مقادیر مؤلفه‌های DC می‌شود.

محل خطا بر مقدار جریانهای گذرا و DC تأثیر می‌گذارد. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد چنانچه خطا در نزدیکی منبع تغذیه اتفاق افتد محدودساز جریان کارآیی بهتری خواهد داشت.

۵- شبیه‌سازی کامپیوتری کاربرد FCL رزناسی LC در شبکه توزیع

نمونه :

برای شبکه توسعه یافته شکل ۵ شبیه‌سازی کامپیوتری کاربرد FCL رزناسی برای نصب در موقعیتهای مختلف توسط نرم‌افزار EMTP انجام شده است. مدل‌سازی اجزاء شبکه با حداکثر دقت انجام شده تا نتایج واقعی‌تر باشند.



« شکل ۵- شبکه توزیع نمونه. »

میزان پیک جریان اتصال کوتاه سه فاز در شین 20 کیلوولتی GENA برابر 43.2 کیلوآمپر و در همین حال پیک جریان عبوری از شین ارتباطی برابر 20.1 کیلوآمپر می‌باشد. چنانچه خطا پس از 3mSec از زمان صفر جریان به وقوع پیوندد میزان مؤلفه DC جریان حداکثر خواهد بود. میزان جریان اتصالی در انتهای فیدر شماره (۱) با شرایط قبلی 5.3KA می‌باشد که نسبت به

حالت اخیر میرایی آن بیشتر است.

طبعاً هر چه فیدر طولانی تر باشد به دلیل افزایش امپدانس آن، مقدار پیک جریان اتصالی در نقطه اتصالی کوچکتر و از طرف دیگر میرای مؤلفه DC جریان نیز بیشتر می باشد. جریان خطا را برای بدترین حالت یعنی درست بعد از کلید قدرت ابتدای فیدر شماره یک باید برآورد نمود که جریان اتصالی برای این موقعیت تقریباً برابر با مقدار جریان اتصالی در حالت اول می باشد. قطع چنین جریانی توسط کلیدهایی که در سیستم بکار رفته اند غیر ممکن می باشد زیرا جریان نامی اتصال کوتاه قطع آنها 16 الی 25 کیلوآمپر می باشد. و حضور مؤلفه DC در این جریان، قطع آن را مشکل تر می سازد.

۱-۵- نصب FCL در موقعیت ترانسفورماتور (FCL1):

با توجه به استاندارد شماره ANSI/IEEE C57.92 می توان ظرفیت ترانسفورماتورهای قدرت را در شرایط اضافه بار مشخص نمود. برای ترانسفورماتورهای شبکه شکل ۵ مقدار جریان نامی برابر $I = \frac{30 \times 10^3}{20 \sqrt{3}} = 866A$ است که برای بار معادل 70 درصد و پیک بار ۲ الی ۴ ساعت ضریب 1.37 را در نظر گرفته و در نتیجه مقدار جریان در پرلود پیک برابر $1200A = 1.37 \times 866$ می باشد که در واقع جریان نامی عبوری از FCL در موقعیت یک خواهد بود. در جدول ۱ مقادیر امپدانس عناصر FCL رزنانسی که با توجه به امپدانس سیستم انتخاب شده اند آورده شده است و برای هر نمونه پیک جریانهای ترانسفورماتور، تریستور، جریان چرخشی و ولتاژ برگشتی با توجه به اسیلوگرامهای حاصل از اجرای برنامه EMTP مشخص گردیده است. راندمان محدودسازی طبق رابطه

$$100\% \times \frac{\text{جریان خط با وجود FCL} - \text{جریان خط بدون حضور FCL}}{\text{جریان خط بدون حضور FCL}}$$

تعریف شده است.

مقایسه نشان می دهد که ردیف سوم جدول فوق از نظر محدودسازی راندمان بهتری دارد زیرا علاوه بر کاهش مؤثر جریان خطا جریان شین ارتباطی را نیز افزایش نداده است. بررسیهای انجام شده بر روی خروجیهای برنامه نشانگر عدم برابری در جریانهای عبوری از تریستورها به دلیل حضور مؤلفه DC و بزرگتر بودن پیک ولتاژ برگشتی نسبت به پیک ولتاژ نامی سیستم می باشد که در طراحی باید بدانها توجه شود.

« جدول ۱ - نتایج کاربرد انواع انتخابی FCL رزنانسی در موفقیت یک برای اتصال کوتاه در شین GENA »

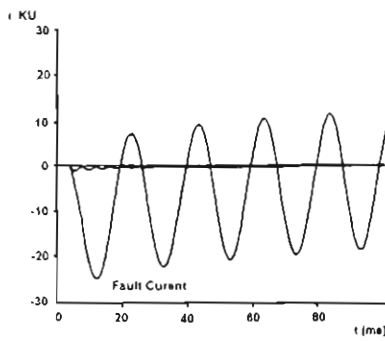
ردیف	مشخصات	نام فایل اجرایی	راندمان محدودسازی جریان خطا %	راندمان محدود و مسازی جریان شین ارتباطی %	ملاحظات
۱	$X_{11} = 6.91 \Omega$ $Y_c = 144686 \mu\text{mho}$ $R = 0.346 \Omega$	3FGLZ 1T	28	-10	$I_r = 3.4 \text{ KA}$ $I_{th} = 400 \text{ A}$ $I_{cr} = 3050 \text{ A}$ $V_r = 18 \text{ KV}$
۲	$X_{11} = 13.823 \Omega$ $Y_c = 72343 \mu\text{mho}$ $R = .691 \Omega$	3FGLZTm1	33	-5	$I_r = 2.1 \text{ KA}$ $I_{th} = 2 \text{ KA}$ $I_{cr} = 175 \text{ A}$ $V_r = 23 \text{ KV}$
۳	$X_{11} = 20.73 \Omega$ $Y_c = 48229 \mu\text{mho}$ $R = 1.036 \Omega$	3FGLZ2T	33	0.5	$I_r = 1400 \text{ A}$ $I_{th} = 1200 \text{ A}$ $I_{cr} = 1450 \text{ A}$ $V_r = 19 \text{ KV}$
۴	$X_{11} = 41.15 \Omega$ $Y_c = 24299 \mu\text{mho}$ $R = 2.058 \Omega$	3FGLZTm3	33	-10	$I_r = 800 \text{ A}$ $I_{th} = 700 \text{ A}$ $I_{cr} = 19 \text{ KA}$ $V_r = 19 \text{ KV}$
۵	$X_{11} = 60 \Omega$ $Y_c = 16667 \mu\text{mho}$ $R = 3 \Omega$	3FGLZTm2	36	-11	$I_r = 59 \text{ A}$ $I_{th} = 503 \text{ A}$ $I_{cr} = 576 \text{ A}$ $V_r = 19 \text{ KV}$
۶	$X_{11} = 80 \Omega$ $Y_c = 12502 \mu\text{mho}$ $R = 4 \Omega$	3FGLZTm2	35	-10	$I_r = 460 \text{ A}$ $I_{th} = 370 \text{ A}$ $I_{cr} = 450 \text{ A}$ $V_r = 19 \text{ KV}$
۷	$X_{11} = 137.6 \Omega$ $Y_c = 7267 \mu\text{mho}$ $R = 6.88 \Omega$	3FGLZ4T	33	-5	$I_r = 300 \text{ A}$ $I_{th} = 220 \text{ A}$ $I_{cr} = 300 \text{ A}$ $V_r = 19 \text{ KV}$

« جدول ۲ - نتایج کاربرد انواع FCL رزنانسی در موقعیت ۲ برای خطای سه فاز در شین GENA. »

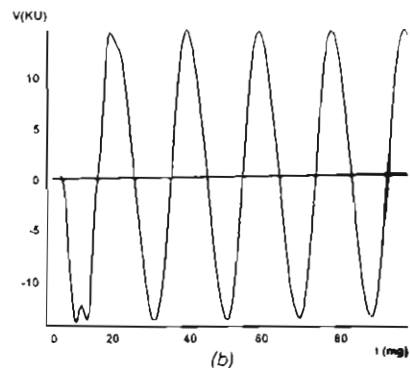
ردیف	مشخصات	نام قابل اجرایی	نوع خطا	راندمان محدودسازی جریان خطا /	راندمان محدودسازی جریان شین ارتباطی /	ملاحظات
۱	$X_L = 6.91 \Omega$ $Y_c = 144686 \mu\text{mho}$ $R = 346 \Omega$	3FGLZB	سه فاز در شین GENA	33%	85%	$I_{TH} = 3200 \text{ A}$ $I_{gr} = 60 \text{ A}$ $U_r = 15 \text{ KV}$
۲	$X_L = 13.823 \Omega$ $Y_c = 72343 \mu\text{mho}$ $R = 691 \Omega$ $X_L = 20.73 \Omega$ $Y_c = 48229 \mu\text{mho}$ $R = 1.036 \Omega$	3FGLZBM1	سه فاز در شین GENA	42%	93%	$I_{TH} = 1900 \text{ A}$ $I_{gr} = 1500 \text{ A}$ $U_r = 15 \text{ KV}$
۳	$X_L = 41.15 \Omega$ $Y_c = 24299 \mu\text{mho}$ $R = 2.058 \Omega$	3FGLZ2B	سه فاز در شین GENA	42%	95%	$I_{TH} = 1.4 \text{ KA}$ $I_{gr} = 1100 \text{ A}$ $U_r = 17 \text{ KV}$
۴	$X_L = 60 \Omega$ $Y_c = 1667 \mu\text{mho}$ $R = 3 \Omega$	3FGLZ3B	سه فاز در شین GENA	35%	98%	$I_{TH} = 660 \text{ A}$ $I_{gr} = 580 \text{ A}$ $U_r = 15 \text{ KV}$
۵	$X_L = 80 \Omega$ $Y_c = 12502 \mu\text{mho}$ $R = 4 \Omega$	3FGLZBM3	سه فاز در شین GENA	33%	98%	$I_{TH} = 480 \text{ A}$ $I_{gr} = 450 \text{ A}$ $U_r = 15 \text{ KV}$
۶	$X_L = 137.6 \Omega$ $Y_c = 7267 \mu\text{mho}$ $R = 6.88 \Omega$	3FGLZBM2	سه فاز در شین GENA	447%	98%	$I_{TH} = 330 \text{ A}$ $I_{gr} = 200 \text{ A}$ $U_r = 15 \text{ KV}$
۷	$X_L = 137.6 \Omega$ $Y_c = 7267 \mu\text{mho}$ $R = 6.88 \Omega$	3FGLZAB	سه فاز در شین GENA	7%	10%	$I_{TH} = 18 \text{ A}$ $I_{gr} = 0$ $U_r = 2.9 \text{ KV}$

۲-۵- نصب FCL در موقعیت شین ارتباطی (FCL2):

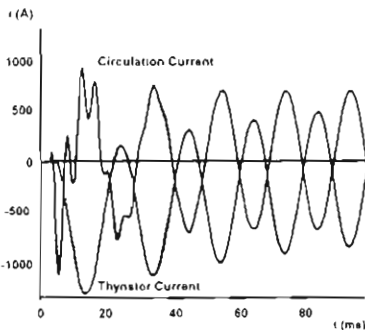
در جدول ۲ نتیجه کاربرد چند نوع مدار LC انتخابی برای خطاهای سه فاز متقارن در شین 20 کیلوولت GENA مشخص شده است. بررسیهای انجام شده بر روی منحنیهای حاصل از اجرای برنامه EMTP برای حالات مختلف نشانگر وجود مؤلفه DC بالا برای جریانهای شین ارتباطی است و این امر به دلیل انتخاب زمان 3mSec برای وقوع اتصال کوتاه است که حداکثر مؤلفه DC را ایجاد می نماید. مقاومت محدودساز نقش به سزایی در میرایی سریع این مؤلفه DC دارد. از طرف دیگر مقدار مؤلفه DC به جریان اولیه مدار نیز بستگی دارد. نکته حائز اهمیت دیگر صفر شدن جریانهای اتصال کوتاه و جریان شین ارتباطی است. در شکل ۶- a



(a)



(b)



(c)

شکل ۶- خطای سه فاز روی

شین GENA و FCL در موقعیت 2

(a) جریان خطا و جریان شین ارتباطی.

(b) جریان چرخشی و جریان تریستور.

(c) ولتاژ برگشتی

جریانهای اتصال کوتاه و جریان شین ارتباطی و در شکل ۶- b جریان چرخشی و جریان تریستور نشان داده شده اند. درصد بالای راندمان محدودساز مشخص کننده ارزشمند بودن FCL در این موقعیت نسبت به موقعیت ترانسفورماتور می باشد و با توجه به توسعه پستهای

فوق توزیع از طریق موازی کردن ترانسفورماتورها می توان گفت که با نصب FCL با چنین راندمانهایی بسیاری از مشکلات ناشی از افزایش سطح جریان اتصال کوتاه مرتفع می گردد. جریان مداوم عبوری از FCL2 کمتر از مقدار مشابه آن در موقعیت یک است البته با این فرض که هیچ یک از دو شین 20 کیلوولتی GENA و GENB قرار نیست که جریان نامی خود را از ترانسفورماتور متصل به شین دیگر تأمین نماید. جریان نامی FCL2 باید نصب جریان نامی آن در موقعیت یک یا تقریباً 600A باشد که در واقع برای کاربرد FCL رزناسی در این موقعیت یک مزیت به شمار می آید. مطابق شکل b - 6 بخش اصلی جریان چرخشی، جریان ماندگار می باشد و بررسیها نشان می دهند. هر چه مقدار مقاومت FCL بیشتر باشد مؤلفه DC این جریان نیز سریع تر میرا می شود. در شکل c - 6 ولتاژ برگشتی دو سر راکتور ملاحظه می شود. شبیه سازیهای انجام شده نشان می دهد که تأخیرهای تا 2 میلی ثانیه برای سیستم حس و آشکارسازی قابل قبول بوده و تنها باعث یک افزایش جزئی در جریان خطا می گردد. تأخیر 0.6mSec را با توجه به کاربرد سیستمهای آشکارساز سریع انتخاب و منظور نموده ایم [7]

۳- ۵- نصب FCL در موقعیت تغذیه کننده (FCL3):

آخرین موقعیتی که در شکل ۵ بررسی می کنیم موقعیت تغذیه کننده ها می باشد. جریان مداوم مورد نیاز FCL می تواند در رنج وسیعی تغییر کند. این تغییرات بستگی به تعداد تغذیه کننده ها و عملیاتی که بهره بردار روی آنها انجام می دهد دارد. بهر حال صورت مسئله مشابه با حالت نصب در موقعیت ترانسفورماتور (FCL1) می باشد. زیرا به استثنای حالتی که خطا در شین واقع شده باشد در هر دو موقعیت جریان خطا یکسان است. یعنی برای یک جریان خطا در تغذیه کننده همان جریانی از FCL3 عبور می کند که از FCL1 می گذرد. جریان مداوم نامی را نمی توان مشابه با دو موقعیت قبلی محاسبه کرد. جریان نامی هر تغذیه کننده با توجه به حداکثر بار دریافتی از آن محاسبه و تعیین می شود که در این محاسبه طرح توسعه آتی و ظرفیت خط در نظر گرفته می شود. مقدار نمونه 600A می تواند یک پیشنهاد قابل قبول برای اکثر تغذیه کننده های 20KV باشد زیرا در بسیاری از حالات جریان نامی زیر این مقدار است.

بررسی ها نشان می دهند که میزان میرایی جریانی خطا و جریان شین ارتباطی به مراتب بیشتر از دو حالت قبل است که این امر به دلیل اضافه شدن مقاومت اهمی خط می باشد. مقدار پیک ولتاژ برگشتی نیز بیش از دو حالت قبل بوده و افزایشی معادل 53% بیشتر از پیک ولتاژ نامی را نشان می دهد.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات :

با استفاده از تجزیه و تحلیل انجام شده و نتایج شبیه سازی کامپیوتری می توان نتیجه گرفت که انتخاب FCL برای هر موقعیت نیازمند یک مطالعه دقیق با توجه به وضعیت و شرایط آن است. بطور کلی نکات زیر باید مد نظر قرار گیرند:

۱- FCL باید جریان خطای مؤثر متقارن را به حد مورد نظر که در رنج نامی تجهیزاتی نظیر کلیدها، فیوزها و وسایل حفاظتی باشد محدود نماید بطوری که عملکرد این وسایل مختل نشود.

۲- با توجه به اینکه سیستم حفاظتی نیز خطا را آشکار می کند ضروری است پس از تجزیه قسمت معیوب از شبکه مجدداً FCL بطور اتوماتیک به حالت اولیه خود برگردد.

۳- FCL سیستم توزیع از نظر نوع اتصال زمین، سطح ولتاژ و غیره مناسب باشد.

۴- FCL قادر به حمل جریان مداوم نامی موقعیتی که در آن بکار رفته (خصوصاً موقعیتهای ۱ و ۳) باشد.

۵- چنانچه تلفات FCL قابل توجه باشد اقتصادی ترین محل نصب آن شین ارتباطی است و خوشبختانه در مورد FCL رزنانسی نیز راندمان محدودسازی در این موقعیت از سایر موقعیت ها بالاتر است.

۶- در FCL تمهیداتی اندیشیده شود تا در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا حداکثر تا 1.0p.u. مقاوم باشد.

۷- هزینه و اندازه FCL از قیمت کلید مشابه خود فراتر نباشد.

۸- FCL باید دارای یک شمارنده جهت ثبت تعداد دفعات عملکرد خود باشد.

در بررسی ثابت گردید که FCL نوع رزنانسی ابزار مؤثری برای کاهش جریان خطا بوده و کاربرد آن کیفیت ارائه سرویس را بهبود می بخشد و لزوم سرمایه گذاری اضافی جهت این وسیله در سیستمهای توزیع در آینده نزدیک مشخص تر خواهد گردید.

- 1 - P.G. Slade, J.L. Wu, E.J. Stacey, W.F. Stubler, R.E. Voshall, J.J. Bond, J.W. Porter, and L. Hong, "The Utility Requirements for a Distribution Fault Current Limiting," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 2, PP. 507-515, Apr. 1992.
- 2 - H.E. Gallagher, J. Grzan, "145 KV Current Limiting Device, Field Tests", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 1, Jan. Feb. 1980.
- 3 - S. Palanichamy, P. ChnNASamy, "Semiconductor Fault Current Limitiers, "IEE Proceedings, Vol. 131, Pt. C, No. 3, May. 1984.
- 4 - H. Nakayama, T. Fukazu, Y. Shinozaki, and K. Ibuki, "Development of High Voltage Self-Healing Current Limiting Element and Verification of its Operating Parameters as CLD for Distribution substations, "IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 1, PP. 342-348, Jan. 1989.
- 5 - G.G. Karady, "Principles of Fault Current Limitation by a Resonant LC Circuit," IEE Proceeding-C, Vol. 139, No. 1, PP. 1-6, Jan. 1992.
- 6 - H.M. Pflanz, J.A. Acreen, J.S. Schaffer, "Development and Testing of Power Assisted Current Limiting Fuses to 600 A and 38KV", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988.
- 7 - I. Lee R. Garberry, W. Knuuer, B.A. Rest, S.H. Horowitz, "An Ultrafast Fault Sensor for a Fault Current Limiting Device, "IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 3, May/June 1979.
- 8 - C.A. Falcone, J.E. Beehler, W.E. Mokoliters, J. Granz, "Current Limiting Device-a Utility Need". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS 93, PP. 1768-1775, Nov/Dec 1974.
- 9 - M. Okazaki and T. Inaba, "Development of a New Multi-Divided Type of Commutating Elements for Fault Current Limiters on Distribution Lines," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 4, PP. 1498-1502, Oct. 1991.
- 10 - H.J. King, H.E. Gallagher, and W. Knauer, " 145-KV Current Limiting Device-Design, Construction, and Factory test," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 99, PP. 911-918. May/June 1980.
- 11 - J.G. Leach, "New Application Flexibility for Medium Voltage Current-Limiting Fuses," IEEE Trans. Industry Application, Vol. 21, No. 4, PP. 1075-1081, July/Aug 1985.