

مطالعه و مدلسازی محدودکننده‌های جریان خطا نوع حالت جامد در شبکه برق آذربایجان

وحید شکری^(۲)

محمد گل محمدی^(۱)

(۱) دانشگاه تربیت معلم آذربایجان، تبریز، ایران

(۲) دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران، ایران

واژه‌های کلیدی: محدودکننده جریان خطا نوع حالت جامد SSFCL، شبکه توزیع برق آذربایجان، راکتور ac، راکتور dc، مشخصه‌های محدودکننده‌های جریان خطا

چکیده

در این مقاله محدودکننده جریان خطا نوع حالت جامد (SSFCL) برای حفاظت سیستم در زمان خطا معرفی گردیده است. دو نوع محدودکننده جریان خطا نوع حالت جامد (SSFCL) معرفی شده است ولی یکی از آنها برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. محدودکننده جریان خطا نوع حالت جامد (SSFCL) جریان خطا را قبل از عمل مدار شکن محدود می کند، و مقدار آن را تا سطح مقادیر قابل تحمل توسط تجهیزات پایین می آورد. در این جا شبکه برق آذربایجان را مدلسازی کرده ایم. در این مجال مدل سیستم با (SSFCL) نصب شده در پست تراکتور سازی استفاده گردیده است. این شبیه سازی با نرم افزار MATLAB/SIMULINK انجام گرفته است. تاثیر مثبت (SSFCL) برای محدود کردن جریان خطا در همه ی

حالات خطا مورد بررسی قرار گرفته است. توضیحات مربوط به عملکرد سیستم و شبیه سازی آن به همراه نتایج شبیه سازی در این مقاله بیان گردیده است.

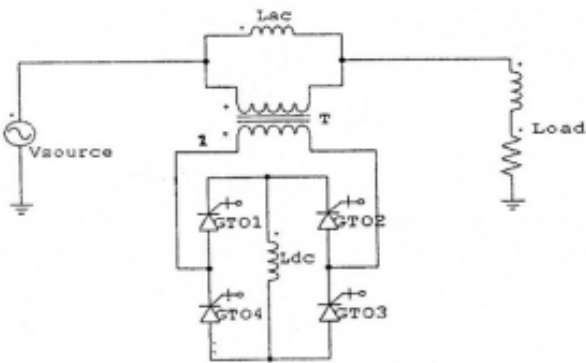
۱. معرفی عملکرد (SSFCL) های نوع اول و دوم

۱-۱ مدار محدودکننده جریان

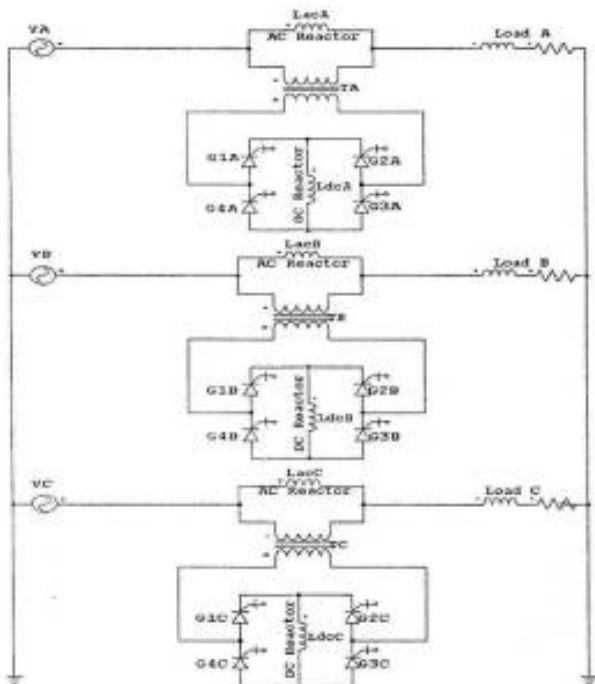
مدار محدودکننده که از نوع حالت جامد (SSFCL) می باشد، در شکل (۱) نشان داده شده است. تریستورهای GTO1-GTO4 تشکیل پل تمام موج کنترل شده را می دهند، راکتور DC, Ldc به عنوان بار مدار پل و راکتور AC, Lac، محدودکننده ی جریان است که به طور موازی با مدار پل قرار می گیرد.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

عملکرد مدار کنترل ساده تر می شود. در هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه، هر فاز سیستم به طور مستقل عمل خواهد کرد بدون آنکه تأثیری روی فازهای دیگر سیستم داشته باشد.

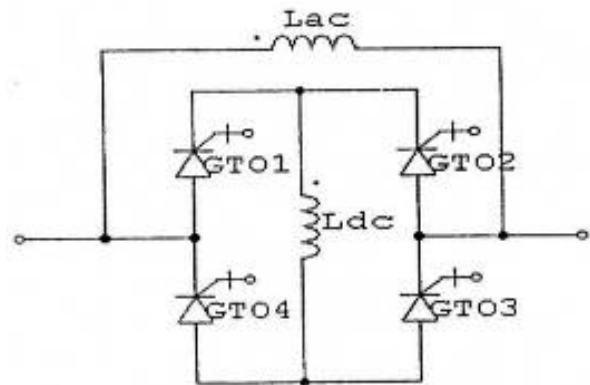


شکل (۲) : نحوه قرار گیری SSFCL در شبکه قدرت



شکل (۳) : SSFCL سه فاز اول با استفاده از سه SSFCL تک فاز

شکل (۴) توپولوژی SSFCL سه فاز دوم را نشان می دهد. در این نوع محدود کننده سه فاز تنها از یک محدود کننده با پل یکسو کننده سه فاز استفاده شده است. مدار پل شامل ۸ ترستور GTO می باشد. که در آن ترستورهای



شکل (۱): مدار SSFCL

سوئیچ های الکترونیکی مورد استفاده در محدود کننده را از نوع ترستور GTO انتخاب کرده ایم. GTO ها ترستور های خاموش شونده با گیت هستند. به طوری که با اعمال یک پالس کوتاه مثبت به گیت روشن و با اعمال یک پالس کوتاه منفی به گیت خاموش می شوند. این ترستورها نیاز به مدار کموتاسیون ندارند. GTO ها برای کموتاسیون اجباری مبدل ها بسیار مناسب هستند و محدوده کاری آنها 9000 V ، 3000 A می باشد. با توجه به محدودیت ولتاژ نامی ترستورها، زمانی که ولتاژ سیستم بالا باشد لازم است تا ترستورهای زیادی به صورت سری قرار بگیرند، این عمل نه تنها هزینه وسیله محدود کننده جریان را افزایش می دهد بلکه کنترل آن رانیز پیچیده تر می کند. بنابراین، SSFCL را می توان با یک ترانسفورماتور کاهنده کوپل کرد. در این صورت ولتاژ اعمالی به ترستورها در حالت قطع، در محدوده ی مجاز آنها قرار می گیرد. مدار کلی محدود کننده حالت جامد در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، راکتور محدود کننده Lac ، AC ، به طور موازی با سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور قرار داده می شود. از آنجایی که بیشتر سیستم های توزیع به صورت سه فاز می باشند، برای عملی کردن SSFCL تکفاز در سیستم های سه فاز به دو طریق می توان از SSFCL شکل (۲) استفاده کرد. نوع اول مطابق شکل (۳) از سه SSFCL تکفاز در سیستم سه فاز استفاده می شود. در این روش در هر یک از فازهای سیستم سه فاز یک SSFCL تکفاز نصب می شود. در این صورت

جدول (۱): مقایسه دو نوع محدودکننده

سه فاز نوع اول و سه فاز نوع دوم

محدود کننده سه فاز نوع اول	محدود کننده سه فاز نوع دوم
SSFCCL از سه یکسوکننده تکفاز استفاده می کند که جاوفضای بیشتری را اشغال می کند	SSFCCL از یک یکسوکننده سه فاز استفاده می کند که جاوفضای کمتری را اشغال می کند
خطا در یکی از ماجول های SSFCCL روی دیگر فازها تأثیری نمی گذارد	خطا در SSFCCL روی دیگر فازها اندکی تأثیری می گذارد
قیمت گران	قیمت مناسب
سه راکتور dc نیاز دارد	تنها یک راکتور dc نیاز دارد
در راکتور dc سه مقاومت تلف کننده انرژی استفاده می شود. بنابراین تلفات کلی انرژی بیشتر باشد	در راکتور dc یک مقاومت تلف کننده انرژی استفاده می شود. بنابراین تلفات کلی انرژی ممکن است کمتر باشد
طراحی کنترلر ساده تر است	طراحی کنترلر پیچیده تر است
تلفات راکتور ac بیشتر است	تلفات راکتور ac کمتر است

۱-۲ محاسبات مربوط به طراحی SSFCCL

اگر جریان اتصال کوتاه سیستم را با I_{sc} و فرکانس زاویه ای را با ω نشان دهیم ، از آنجا ییکه عمل محدود کنندگی جریان را راکتور ac انجام می دهد بنابراین رابطه ی بین جریان اتصال کوتاه و ولتاژ فاز U_n مطابق زیر محاسبه می شود :

$$U_n = \omega L_{ac} I_{sc} \quad (\text{الف} - ۱)$$

در نتیجه :

$$L_{ac} = \frac{U_n}{\omega I_{sc}} \quad (\text{الف} - ۲)$$

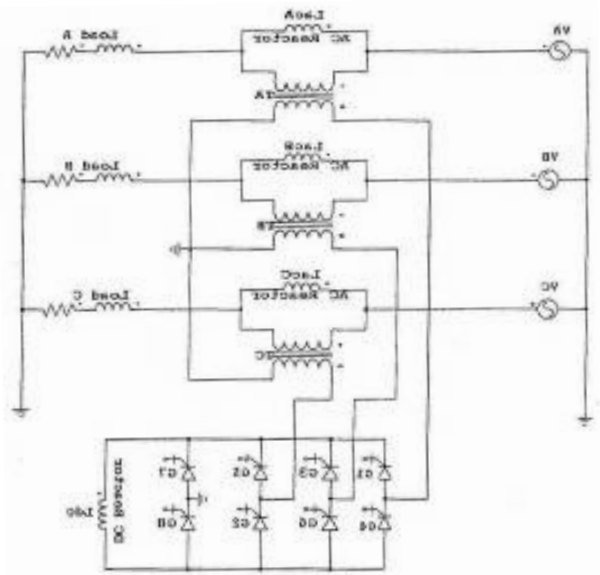
اگر جریان راکتور dc در طول نیم سیکل اول بعد از رخداد اتصال کوتاه افزایش یابد ، رابطه ی بین ماکزیمم مقدار افزایش جریان Δi_m و راکتانس L_{dc} مطابق زیر محاسبه می شود :

$$L_{dc} \frac{di_m}{dt} = U_{im} \quad (\text{الف} - ۳)$$

در رابطه بالا U_{im} ماکزیمم پیک ولتاژ L_{dc} است . با ضرب ω در صورت و مخرج طرف اول رابطه فوق داریم :

$$(wL_{dc}) \frac{di_m}{d(wt)} = U_{im} \quad (\text{الف} - ۴)$$

G7 و G8 تشکیل مدار هرزگرد را می دهند. روشن است که حجم و هزینه این نوع SSFCL سه فاز نسبت به نوع اول (شکل (۳)) کمتر خواهد بود. خطای نامتقارن عملکرد محدود کننده جریان در همه فازها را تحت تأثیر قرار می دهد . به عبارت دیگر، یک خطای تکفاز، در رفتار هر سه فاز یعنی حتی فازهای بدون خطا نیز تأثیر می گذارد که این امر مطلوب نمی باشد



شکل (۴) : SSFCL سه فاز نوع دوم با استفاده از

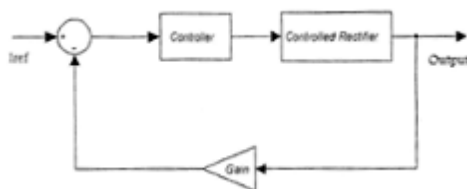
پل یک سو کننده سه فاز

۱-۲ مقایسه دو نوع محدود کننده

در این مقاله دو نوع محدود کننده ارائه شد . در محدود کننده نوع اول از سه محدود کننده تکفاز در سیستم سه فاز استفاده شد (شکل (۳)) . در این محدود کننده از یک پل تکفاز یکسو کننده تمام موج در هر یک از فاز های سیستم استفاده شد. اما در محدود کننده نوع دوم از یک پل یکسو کننده سه فاز تمام موج استفاده شده است (شکل (۴)) که در آن علاوه بر شش GTO از دو GTO دیگر نیز برای تشکیل مدار هرزگرد بهره گرفته شده است. در جدول (۱) مقایسه ای بین ویژگی های دو نوع مختلف محدود کننده ارائه شده است

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

یابد که مطلوب سیستم می باشد. در SSFCL از یک یکسو کننده کنترل شده در ثانویه ترانسفورماتور استفاده می شود. کنترلر، جریان یکسو کننده را در هنگام بروز خطا از طریق تغییرپالس های گیت ترایستور های GTO کنترل خواهد کرد. در نتیجه، جریان کنترل شده ای در ثانویه ترانسفورماتور جاری می شود بدین معنی که جریان عبوری از ثانویه ترانسفورماتور کاهش می یابد و جریان عبوری از سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور با ضریبی معادل نسبت تبدیل ترانسفورماتور کاهش می یابد. پس یک جریان کاهش یافته از خط انتقال عبور خواهد کرد هنگامی که خطای اتصال کوتاه در خط انتقال وجود داشته باشد، جریان افزایشی ناگهانی در مدار رکتیفایر حس شده و با جریان مرجع که در مقدار جریان حالت دائمی تنظیم شده است، مقایسه می شود اگر این مقدار از جریان مرجع بزرگتر باشد، مدار خطای اتصال کوتاه را تشخیص می دهد و در غیر این صورت مدار در حالت دائمی تشخیص داده می شود (شکل ۵) پس از نتیجه گیری از واحد مقایسه، مدار کنترل پالس های لازم را تولید می کند تا جریان عبوری کنترل شود.



شکل (۵): سیستم کنترل حلقه بسته محدود کننده

۳- نصب محدود کننده سه فاز نوع دوم در شبکه توزیع آذربایجان:

در این بخش محدود کننده سه فاز نوع دوم در شبکه توزیع برق آذربایجان قرار داده و آزمایش می شود. شبکه توزیع برق آذربایجان شامل یک نیروگاه گازی و ۶ پست 132/20kv می باشد در هر پست بار کل آن به صورت یک بار سه فاز شبیه سازی شده است و محدود کننده مورد نظر در پست تراکتور سازی قرار داده شده است مشخصات دقیق

با در نظر گیری نیم سیکل برای افزایش جریان در حین خطا به رابطه ی زیر می رسیم:

$$wL_{dc} \frac{di_m}{2} = U_{im} \quad (\text{الف-۵})$$

$$\Delta i_m = \frac{2U_{im}}{wL_{dc}} \quad (\text{الف-۶})$$

مقدار راکتور dc باید به گونه ای طراحی شود که انرژی ذخیره شده در آن مینیم باشد در این صورت کمترین حجم ممکن برای آن بدست می آید. انرژی ذخیره شده در راکتور dc بعد از رخداد خطا مطابق رابطه زیر است:

$$E = \frac{1}{2} L_{dc} (I_m + \Delta I_m)^2 \quad (\text{الف-۷})$$

در رابطه بالا I_m جریان حالت دائم راکتور dc است. برای مینیم سازی E داریم:

$$\frac{dE}{dt} = 2 \times \frac{1}{2} L_{dc} (I_m + \Delta I_m) \times \frac{di_m}{dt} = 0 \quad (\text{الف-۸})$$

$$I_m = |\Delta I_m| \quad (\text{الف-۹})$$

یا جایگذاری Δi_m در رابطه (الف-۶) به رابطه زیر می رسیم:

$$I_m = \frac{2U_{im}}{wL_{dc}} \quad (\text{الف-۱۰})$$

$$L_{dc} = \frac{2U_{im}}{wI_m} \quad (\text{الف-۱۱})$$

از رابطه (الف-۲)، مقدار راکتانس ac بدست می آید:

$$L_{ac} = \frac{U_m}{wI_{cp}} \quad (\text{الف-۱۲})$$

$$L_{dc} = \frac{2U_{im}}{wI_m} \quad (\text{الف-۱۳})$$

۲-۲ طراحی کنترلر

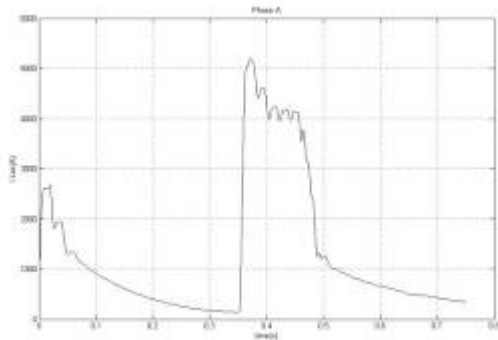
کنترلر یکی از بخش های مهم FCL است که بوسیله آن جریان خط کنترل می شود. در حقیقت، SSFCL برای کاربرد در یک سیستم کنترل حلقه بسته طراحی می شود. در سیستم کنترل حلقه بسته، جریان خطای اتصال کوتاه تشخیص داده می شود تا زمانی که این خطا برطرف نشود کنترل آن ادامه می یابد. بنابراین اگر خطایی در خط انتقال وجود داشته باشد، سیستم یک امپدانس محدود کننده ac را وارد مدار می کند تا جریان اتصال کوتاه را محدود کند و مقدار جریان خطا به مقدار از پیش تعیین شده ای کاهش می

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

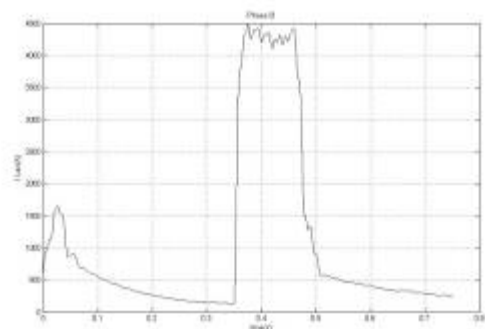
شبکه توزیع آذربایجان در پیوست الف موجود می باشد نتایج حاصل از شبیه سازی برای انواع خطاها (سه فاز به زمین ، دو فاز به زمین و تکفاز به زمین) در شکل های زیر دیده می‌شود.

۳-۱ خطای سه فاز به زمین :

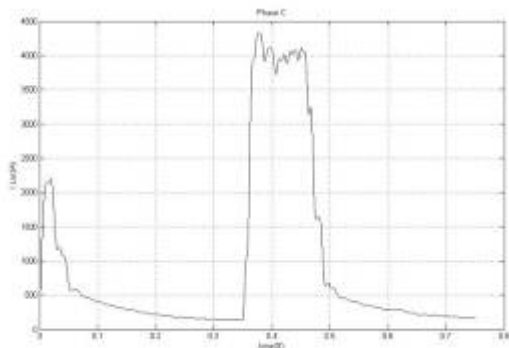
شکلهای زیر عملکرد SSFCL به ازای خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فازهای A, B, C را نشان می دهند



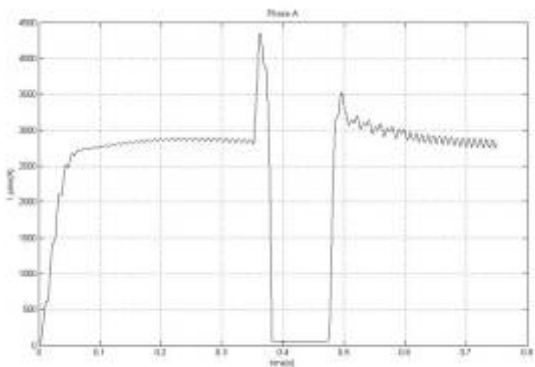
شکل (۹) جریان راکتور ac در فاز A



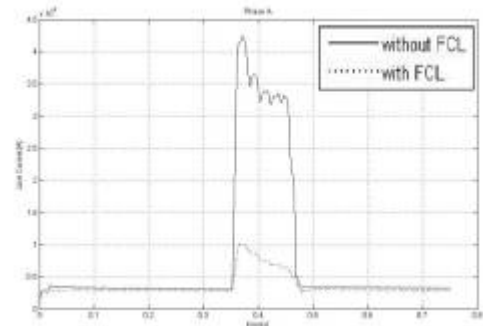
شکل (۱۰) جریان راکتور ac در فاز B



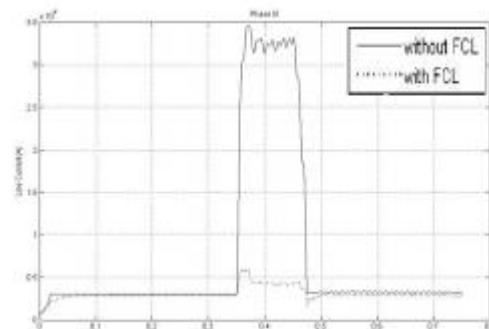
شکل (۱۱) جریان راکتور ac در فاز C



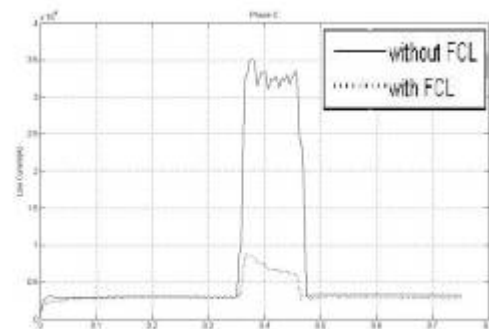
شکل (۱۲) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز A



شکل (۶) جریان فاز A در خطای سه فاز با SSFCL و بدون SSFCL

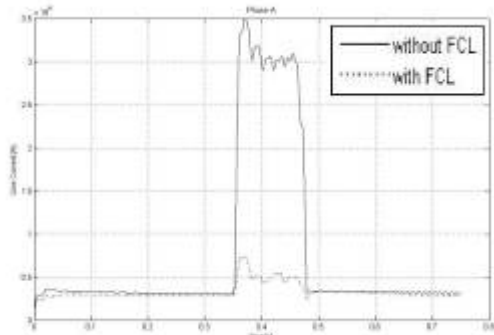


شکل (۷) جریان فاز B در خطای سه فاز با SSFCL و بدون SSFCL

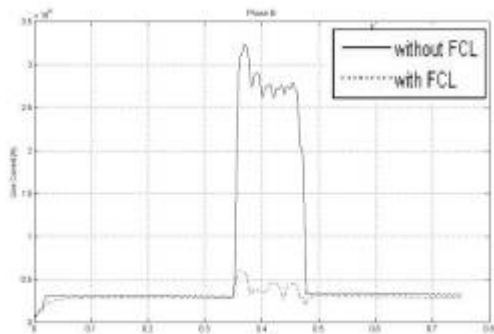


شکل (۸) جریان فاز C در خطای سه فاز با SSFCL و بدون SSFCL

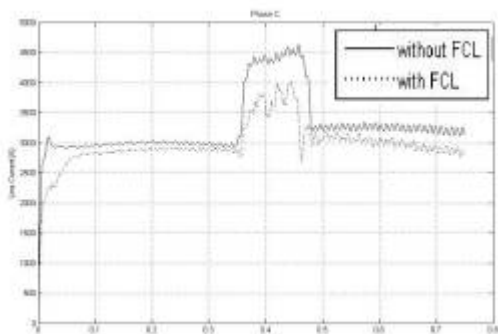
۲-۳ خطای دو فاز به زمین



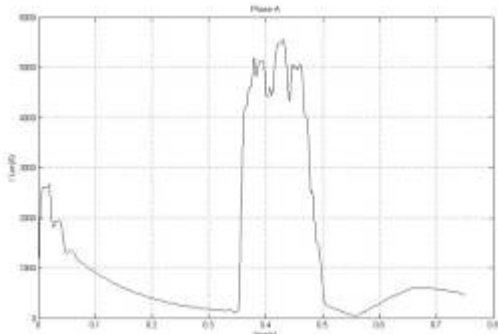
شکل (۱۷) جریان فاز A در خطای دو فاز با SSFCL و بدون SSFCL



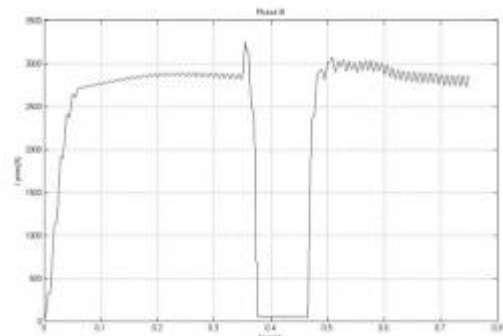
شکل (۱۸) جریان فاز B در خطای دو فاز با SSFCL و بدون SSFCL



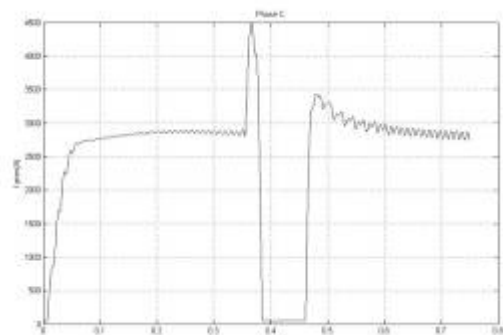
شکل (۱۹) جریان فاز C در خطای دو فاز با SSFCL و بدون SSFCL



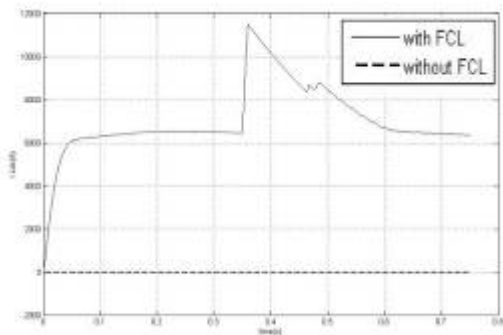
شکل (۲۰) جریان راکتور ac در فاز A



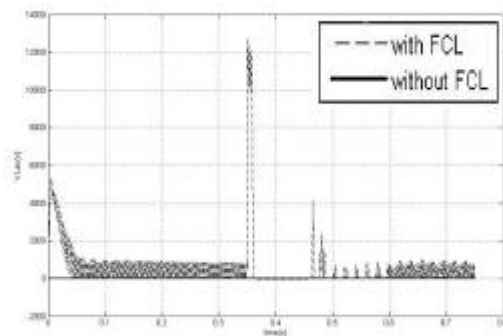
شکل (۱۳) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز B



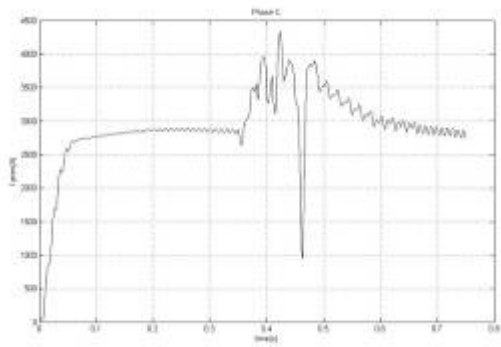
شکل (۱۴) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز C



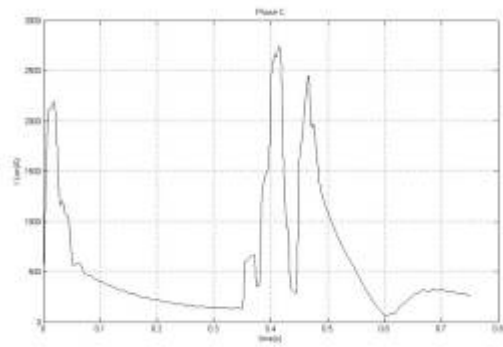
شکل (۱۵) جریان راکتور dc



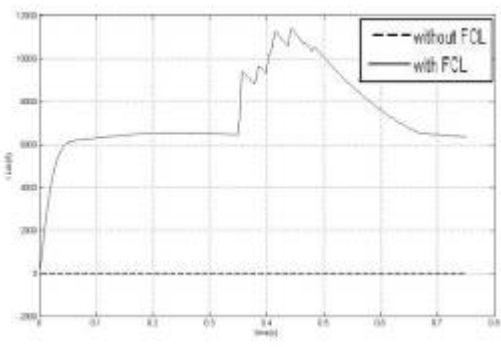
شکل (۱۶) ولتاژ راکتور dc



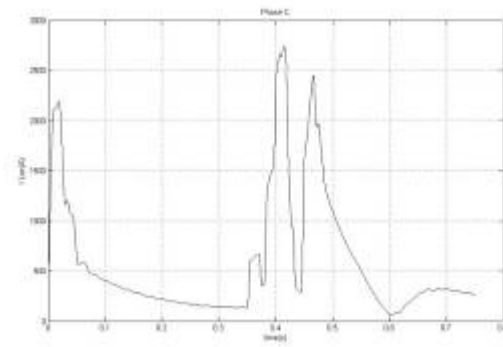
شکل (۲۵) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز C



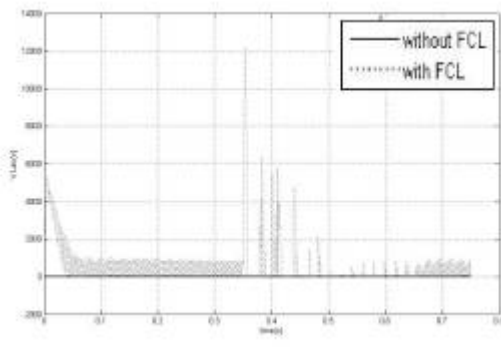
شکل (۲۱) جریان راکتور ac در فاز B



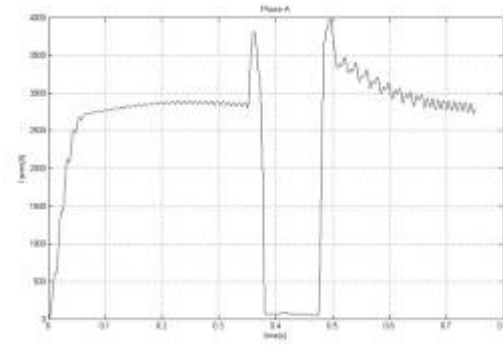
شکل (۲۶) جریان راکتور dc



شکل (۲۲) جریان راکتور ac در فاز C

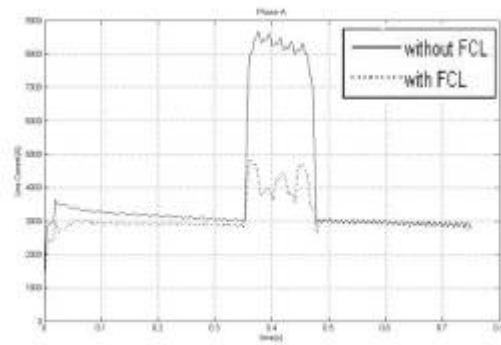


شکل (۲۷) ولتاژ راکتور dc



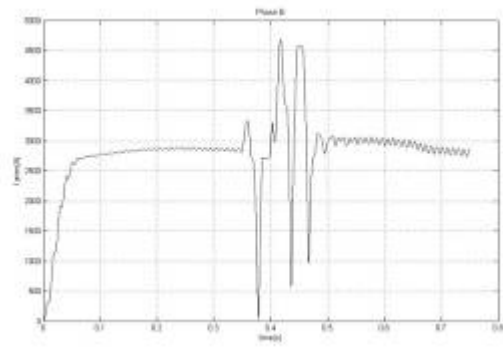
شکل (۲۳) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز A

۳-۳ خطای تک فاز به زمین

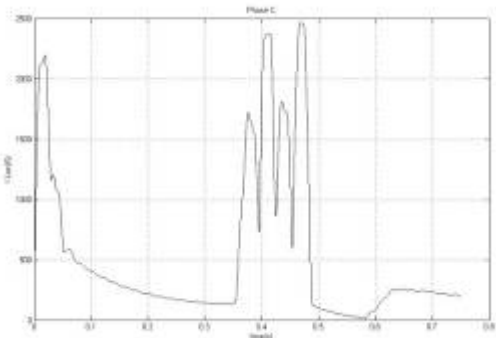


شکل (۲۸) جریان فاز A در خطای تک فاز با SSFCL

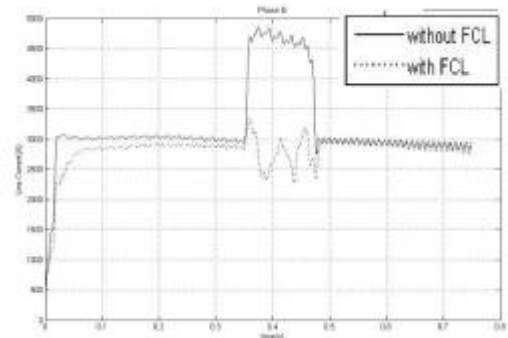
و بدون SSFCL



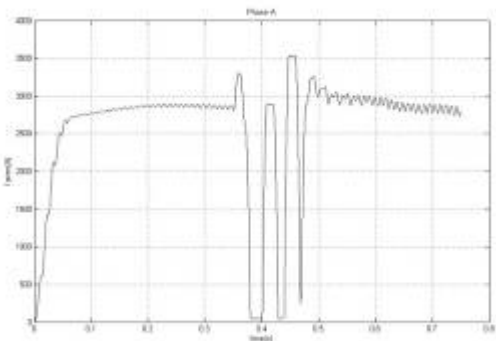
شکل (۲۴) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز B



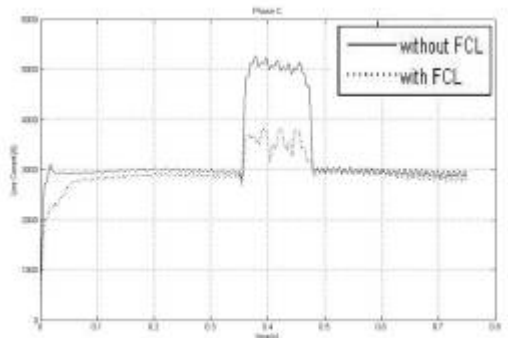
شکل (۳۳) جریان راکتور ac در فاز C



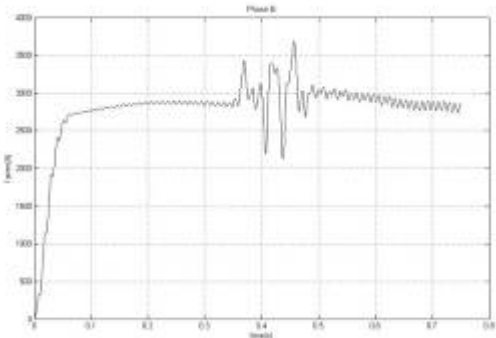
شکل (۲۹) جریان فاز B در خطای تک فاز با SSFCL و بدون SSFCL



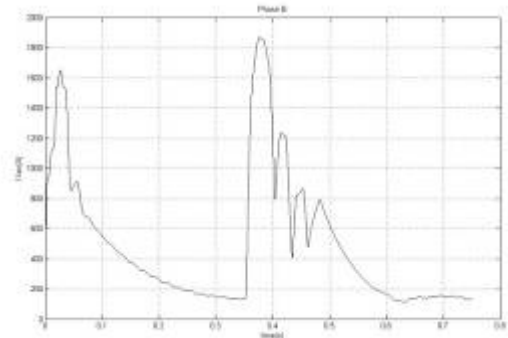
شکل (۳۴) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز A



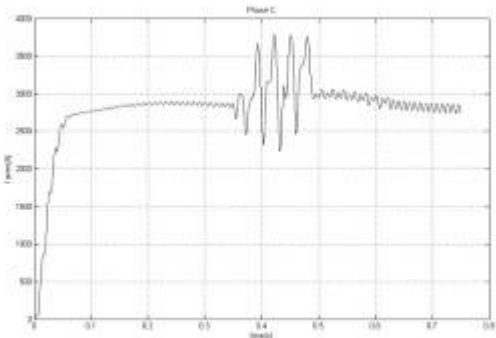
شکل (۳۰) جریان فاز C در خطای تک فاز با SSFCL و بدون SSFCL



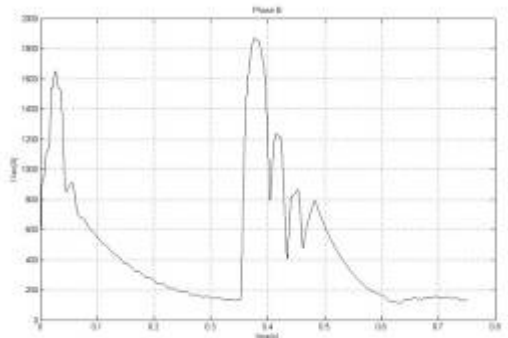
شکل (۳۵) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز B



شکل (۳۱) جریان راکتور ac در فاز A



شکل (۳۶) جریان اولیه ترانسفورماتور در فاز C

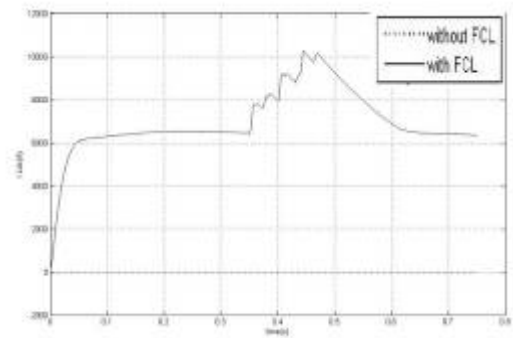


شکل (۳۲) جریان راکتور ac در فاز B

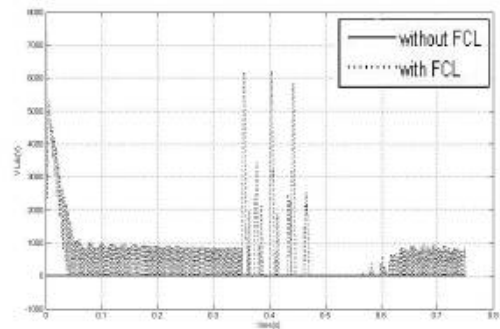
۴- نتیجه گیری

در این مقاله محدود کننده حالت جامد متشکل از عنصر نیمه هادی GTO معرفی و به طور کامل تشریح گردید. در ابتدا مدار محدود کننده حالت جامد تکفاز ارایه و نحوه عملکرد آن شرح داده شد. سپس دوروش برای استفاده محدود کننده تکفاز در سیستم سه فاز ارایه گردید. در ادامه مقایسه ای بین ویژگی های مختلف دونوع محدود کننده به این نتیجه می رسیم که هر دونوع محدود کننده برای کاربرد در سیستم قدرت مناسب می باشند. در آخرین بخش این مقاله نیز نتایج شبیه سازی حاصل از قراردادن محدود کننده سه فاز نوع دوم در شبکه توزیع برق آذربایجان قرار داده شده است. و توانست جریان های خطا را در انواع حالات به خوبی کنترل نماید و بدین طریق می تواند از آسیب دیدگی تجهیزات جلوگیری کند.

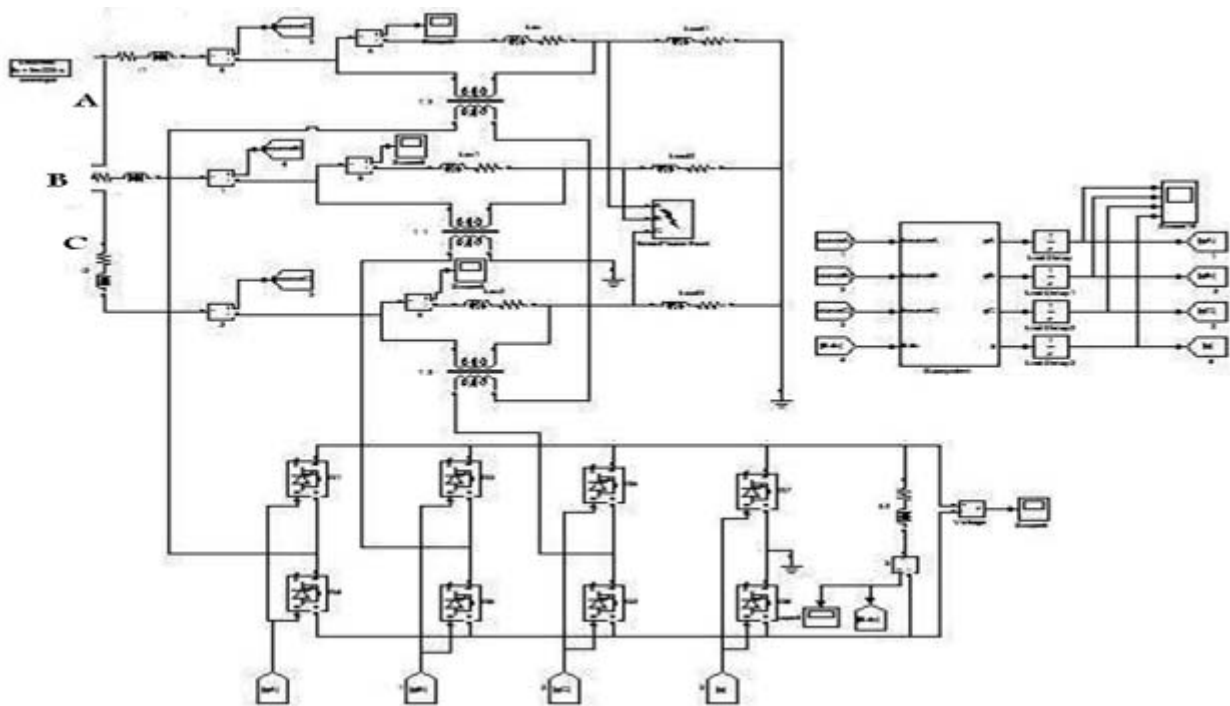
شکل (۳۹) مدار محدود کننده سه فاز نوع دوم می باشد که به همراه شکل (۴۰) در صفحات بعد آمده است.



شکل (۳۷) جریان راکتور dc

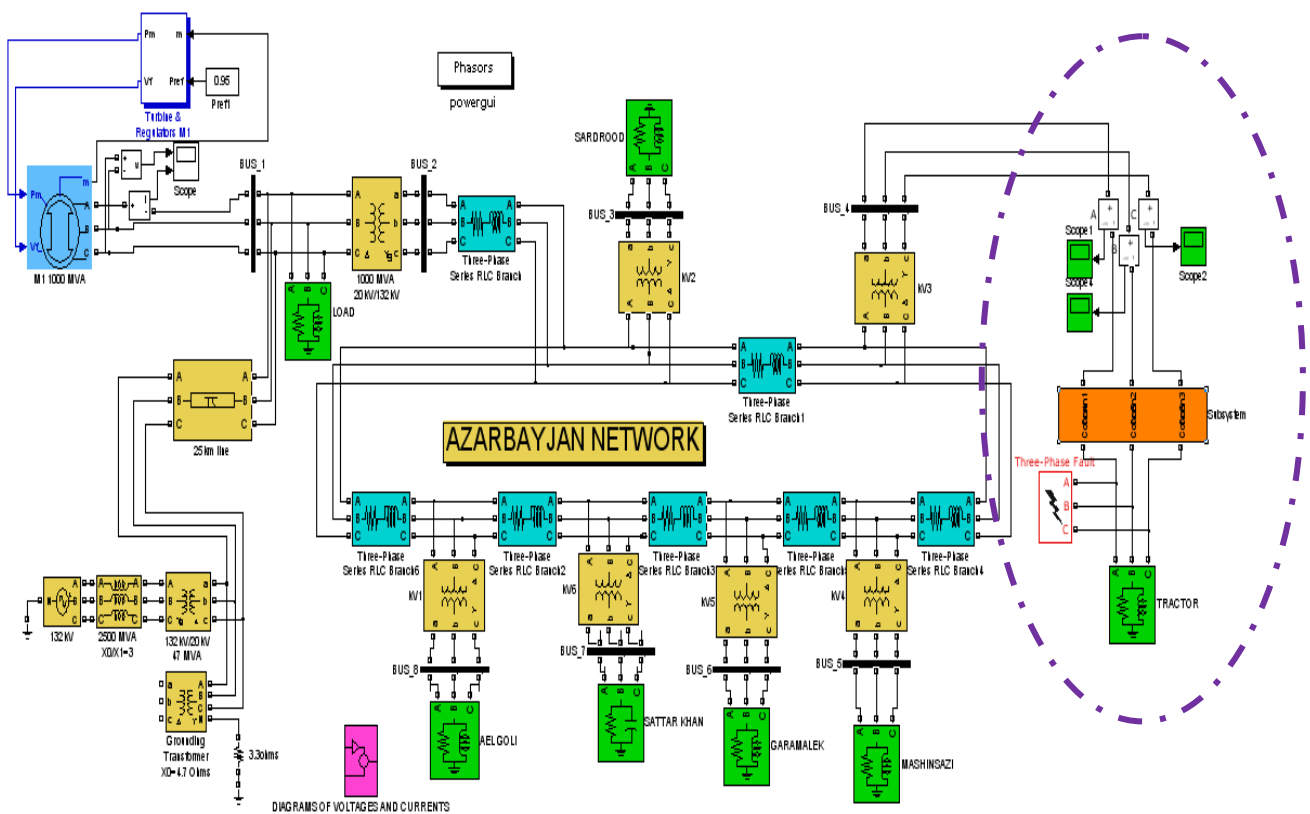


شکل (۳۸) ولتاژ راکتور dc



شکل (۳۹) مدار محدود کننده سه فاز نوع دوم

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۴۰) شبکه توزیع برق آذربایجان همراه با محدود کننده سه فاز دوم در پست تراکتور سازی

منابع و مراجع:

- 1- Frank Mumford, "Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. pp.6/1- 6/7, 1995.
- 2- Y. Jiang et al., "Comparison of Superconducting Fault Current limiter in Power System," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Meeting, vol.1, pp.43-47, 2001.
- 3- M. Morita, O. Miura, and D. Ito, "Transport Properties of QMG Fault Current Limiting Device," Supercond. Sci. Technol., vol.13, pp. 896-901, 2000.
- 4- H.-R. Kim, H.-S. Choi, H.-R. Lim, I.-S. Kim, and O.-B. Hyun, "Quench Distribution in Superconducting Fault Current Limiters at Various Voltages," Cryogenics, vol.41, pp. 275-280, 2001
- 5- Lin Ye, Member, IEEE, M. Majoros, T. Coombs, and A. M. Campbell, "System Studies of the Superconducting Fault Current Limiter in Electrical Distribution Grids", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol17, on.2, Jun2007 .
- 6- K Parton, " A New Power System Fault Limiter", Elec.Rev. 1978.
- 7- CIGRE Working Group"Functional Specification for a Fault Current Limiter" , ELECTRA (2001)194, pp. 22-29.