بررسی تحلیلی و شبیه‌سازی ولتاژ گذرای بازگشتی در کلیدهای قدرت در خطوط انتقال جبران‌شده با خازن سری

محسن قاینی صوفی آبادی
دانشجوی کارشناسی ارشد قدرت
elecmohsen2002@yahoo.com

جواد ساده
استادیار
sadeh@um.ac.ir

گروه برق، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
با همکاری دفتر تحقیقات و استانداردها - شرکت برق منطقه‌ای خراسان

واژه‌های کلیدی: گذرای الکترومغناطیسی، ولتاژ گذرای بازگشتی، کلیدهای قدرت، خطوط جبران شده با خازن سری

چکیده

در این مقاله تاثیر جبرانسازی خازن سری بر روی ولتاژ گذرای بازگشتی(TRV[1]) با استفاده از روش تحلیلی و همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی برای دو حالتی که خازن در طرفین خط و یا در وسط خط نصب گردد، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود خازن سری سبب افزایش TRV می‌گردد. بنابراین هنگام استفاده از جبرانسازی سری برای خطوط انتقال لازم است مطالعات گذرایی صورت گیرد تا طراحی کلیدها و تدابیر حفاظتی آنها بدرستی انجام شود. در این مقاله از دیدگاه قطعی برای شبیه سازی استفاده شده است ولی تاثیر عدم قطعیتهای مختلف موجود در مساله مانند نوع و مکان خطا بر روی TRV بررسی شده است.

۱- مقدمه

از عناصر جبرانساز به منظور بهبود پایداری و بهبود دیگر پارامترهای سیستم از جمله ولتاژ، توان انتقالی، ضریب توان و جریان اتصال کوتاه در سیستمهای قدرت استفاده شده است. امروزه با بروز تجدید ساختار در صنعت برق و به سمت خصوصی رفتن این صنعت، سیستمها در حدود پایداریشان کار می‌کنند و این سبب شده است تا استفاده از ادوات FACTS[2] برای بهبود پایداری، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش توان انتقالی خطوط موجود و ... بیشتر شود[۱]. خازن سری بمنظور کاهش راکتانس خط انتقال و در نتیجه افزایش توان انتقالی بکار گرفته می‌شود[۲]. استفاده از خازن سری در خطوط انتقال باعث تغییر گذراهای پس از وقوع خطا و قطع کلیدها در محل کلیدها می شود. لذا لازم است در چنین سیستمهایی ولتاژ بازگشتی دو سر کلید قدرت بصورت دقیقتری مورد مطالعه و بررسی واقع گردد. قابلیت قطع کلید قدرت توسط دو عامل TRV و دامنهٔ جریان خطا محدود می‌شود. TRV ولتاژ گذرایی است که در دو سر کلید قدرت پس از قطع خط ظاهر می‌شود. بنابراین برای طراحی و انتخاب صحیح کلید قدرت و همچنین سیستمهای حفاظتی آن

1. Transient Recovery Voltage

2. Flexible AC Transmission System

لازم است تا TRV برای کلیدهای سیستم تحت مطالعه محاسبه گردد[۳].

وجود عناصر جبرانساز می تواند سبب تشدید TRV گردد که دلیل اصلی آن انرژی ذخیره شده در این ادوات است که پس از قطع کلید سبب بروز گذراهایی در سیستم شده که نتیجهٔ آن می تواند افزایش TRV در کلید قدرت است. بنابراین مطالعات گذرایی که یکی از آنها TRV است در سیستمهای جبران شده امری ضروری است تا با استفاده از آن تمهیدات مورد نیاز برای طراحی کلید قدرت و همچنین سیستمهای حفاظتی صورت گیرد[۵-۴] .

سیستمهای عملی زیادی وجود دارد که از خازن سری برای افزایش توان انتقالی استفاده کرده‌اند. بدلیل تاثیر شدیدی که خازن سری بر اضافه ولتاژهای گذرا دارد لازم است تا مطالعات گذرای الکترومغناطیسی برای چنین سیستمهایی انجام شود. مراجع [۸-۶] نتایج چنین مطالعاتی را در سه سیستم قدرت مختلف ارائه نموده‌اند.

مرجع [۹] نیز که مطالعات گذرایی را برای خطوط جبران شده با خازن سری در سیستم برق ترکیه انجام داده، نشان داده است که وجود خازن سری در خطوط انتقال سبب افزایش TRV در کلیدهای قدرت می‌گردد.

آنالیز مربوط به TRV معمولا با استفاده از دیدگاه قطعی[1] انجام می‌شود، در حالیکه این پدیده همراه با عدم‌قطعیتهای متفاوتی است. در دیدگاه قطعی معمولا طراحی به ازای بدترین شرایط ممکن انجام می‌شود که رسیدن به چنین شرایطی مستلزم صرف هزینه‌های زیادی است. بنابراین دیدگاه قطعی برای پدیده‌هایی که همراه با عدم‌قطعیت‌های مختلفی هستند اقتصادی نخواهد بود و یک دیدگاه احتمالی[2] می‌تواند برای بدست آوردن یک ارزیابی واقعی از عملکرد سیستم تحت عدم قطعیتهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد[۱۰]. یکی از بهترین تکنیکها برای بررسی پدیده‌های احتمالی استفاده از تکنیک شبیه سازی مونت کارلو می‌باشد. به کمک این تکنیک علاوه بر محاسبهٔ مقدار ماکزیمم TRV، می توان تابع توزیع احتمال این اضافه ولتاژ را نیز تعیین نمود.

تمامی مقالاتی که به محاسبهٔ TRV در سیستمهای جبران شده پرداخته‌اند با نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داده‌اند که وجود عنصر جبرانساز سبب افزایش TRV (یا ماکزیمم دامنهٔ آن و یا نرخ صعود) می‌گردد. شبیه سازیها با استفاده از نرم افزارهای عمومی EMTP و MATLAB انجام شده است.

در این مقاله ابتدا با معرفی چند سیستم واقعی که از خازن سری استفاده کرده‌اند اهمیت موضوع بیان می‌گردد و سپس با استفاده از روش تحلیلی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی که با سیمولینک مطلب انجام شده است، تاثیر جبرانسازی با خازن سری و همچنین عدم قطعیتهای موجود در مساله مانند نوع و مکان خطا بر روی TRV در کلید قدرت بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که وجود خازن سری می‌تواند در اکثر حالات سبب افزایش دامنه و نرخ صعود TRV گردد.

۲- جبرانسازی با خازن سری

از خازن سری بمنظور کاهش راکتانس خط انتقال و در نتیجه افزایش توان انتقالی استفاده می‌شود. امروزه با تجدید ساختار صنعت برق سیستمها در حدود پایداریشان کار می‌کنند و همچنین وجود بازار و قراردادهای موجود بین تولیدکنندگان و مصرف کنندگان موجب می‌شود تا گاهی اوقات در بعضی خطوط پرشدگی[3] رخ دهد. یکی از ابزارهایی که می‌تواند به روشهای مدیریت پرشدگی کمک کند استفاده از ادوات FACTS به منظور کنترل پخش بار و افزایش توان انتقالی است که یکی از این ادوات خازن سری کنترل شده با تایریستور (TCSC[4]) است[۱].

میزان خازن مورد استفاده برای جبرانسازی بستگی به ضریب جبرانسازی و همچنین راکتانس خط انتقال دارد. فرض کنیم که ضریب جبرانسازی α باشد بنابراین مقدار خازن سری لازم از رابطه زیر بدست می آید:

1. Deterministic Approach
2. Probabilistic Approach
3. Congestion
4. Thyristor Controlled Series Capacitance

$$X_C = aX_L \Rightarrow \frac{1}{C\omega} = aL\omega \Rightarrow C = \frac{1}{aL\omega^2} \qquad (۱)$$

که در آن L اندوکتانس توالی مثبت خط است.

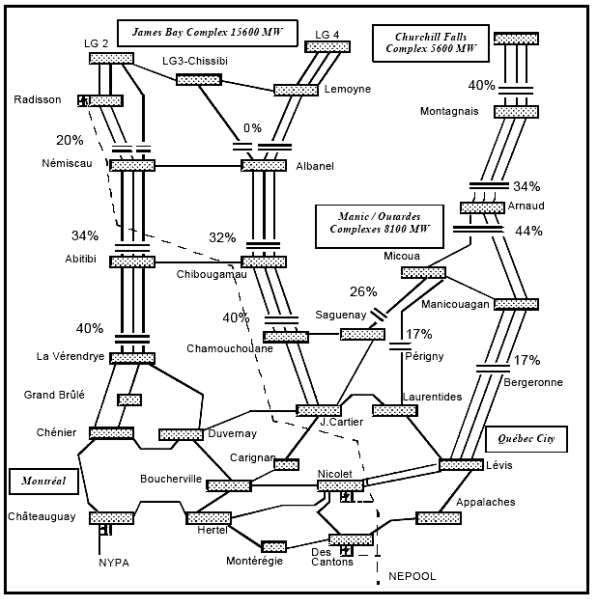
برای اینکه اهمیت مطالعات گذرایی در خطوط انتقال جبران شده با خازن سری بیان شود در ادامه چندین سیستم که از خازن سری استفاده کرده‌اند معرفی می‌گردد.

۲-۱- سیستم انتقال ۷۳۵ کیلوولت Quebec:

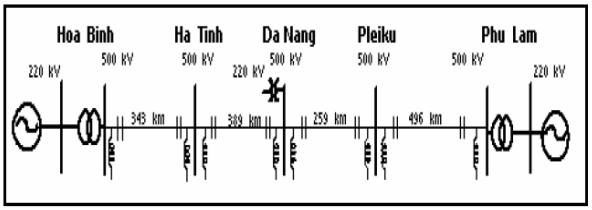
این سیستم از دو شاخهٔ ۱۰۰۰ کیلومتری تشکیل شده است که یک شبکهٔ شعاعی طولانی است. مراکز تولید در شمال را به نواحی بار جنوبی یعنی شهرهای مونترال و کبک متصل می‌سازد. نمای کلی این سیستم در شکل۱ دیده می‌شود. شرکت برق کانادا در ابتدای دههٔ ۱۹۹۰ یک برنامهٔ عمده را برای بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم خود بکارگرفت که یک نمونهٔ آن، نصب ۳۲ بانک خازنی سری با ظرفیت ۱۱۲۰۰ مگاوار برای افزایش قابلیت انتقال سیستم بود. میزان جبرانسازی در خطوط مختلف در شکل۱ دیده می‌شود. استفاده از خازن سری سبب بوجود آمدن اضافه ولتاژهای شدیدی در دو سر کلیدهای قدرت می‌گردید که پس از مطالعه مشخص شد که این اضافه ولتاژها ناشی از وجود خازنهای سری در شبکه است. برای جلوگیری از صدمه دیدن تجهیزات در مقابل اضافه ولتاژها مطالعات گذرایی جامعی صورت گرفت و طرحهای حفاظتی نیز پیش بینی گردید که بطور مفصلتر در [۶] آورده شده است.

۲-۲- سیستم انتقال ۵۰۰ کیلوولت ویتنام:

در سال ۱۹۹۴ خط انتقال ۵۰۰ کیلوولت از شمال به جنوب ویتنام که ۱۴۸۷ کیلومتر طول داشت مورد بهره برداری قرار گرفت. در هر قسمت از این خط از دو جبرانسازی خازن سری و راکتور موازی استفاده شده است که میزان جبرانسازی سری ۶۰ درصد (در هر طرف خط ۳۰ درصد) و جبرانسازی موازی ۷۰ درصد (هر طرف ۳۵ درصد) می باشد. شکل۲ دیاگرام تک‌خطی این سیستم را نشان می‌دهد. استفاده از عناصر جبرانسازی که همیشه مقداری انرژی در آنها ذخیره شده و محبوس است، سبب تشدید اضافه ولتاژهای بوجود آمده در گذراها خواهد شد. به همین دلیل مطالعات گذرای الکترومغناطیسی در این سیستم ضروری به نظر می‌رسید که این کار توسط یک شرکت اروپایی انجام شد که خلاصهٔ نتایج آن در مرجع [۷] آورده شده است.



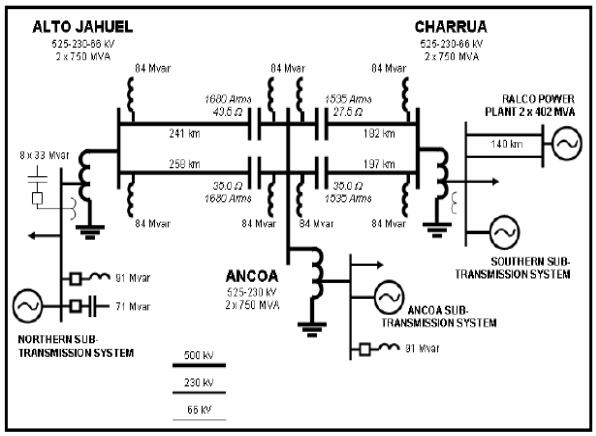
شکل(۱)- سیستم انتقال ۷۳۵ کیلوولت Hydro-Quebec کانادا



شکل(۲)- سیستم انتقال ۵۰۰ کیلوولت ویتنام

۲-۳- سیستم انتقال ۵۰۰ کیلوولت شیلی:

سیستم انتقال جبران شده با خازن سری در شیلی، از دو خط ۵۰۰ کیلوولت که بیش از ۴۰۰ کیلومتر طول دارد تشکیل شده است که در شکل۳ مشاهده می‌شود. از ۴ بانک خازنی برای بالا بردن توان انتقالی استفاده شده است که هر ۴ خازن در پستی که در وسط خطوط قرار دارد نصب شده است. وجود این خازنها سبب تشدید اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی خواهد شد که نیاز به مطالعهٔ گذرایی دارد که در [۸] بررسی شده است.



شکل(۳)- سیستم انتقال ۵۰۰ کیلوولت شیلی

۳- محاسبهٔ TRV

در محاسبات TRV باید دو پارامتر را مدنظر داشته باشیم که یکی ماکزیمم دامنهٔ TRV و دیگری نرخ صعود[1] آن است. به عبارت دیگر با توجه به آنکه استقامت عایقی به شکل موج اضافه ولتاژهای که در دوسر آن قرار می‌گیرد بستگی دارد، در محاسبهٔ TRV نیز باید بدنبال شکل موج باشیم که شاخصه‌های مهم آن ماکزیمم دامنه و نرخ صعود است. قطع خط می‌تواند عوامل مختلفی داشته باشد ولی مهمترین عاملی که سبب بروز TRV شدیدتری می‌شود و بروز آن نیز در سیستم زیاد اتفاق می‌افتد، اتصال کوتاه است. در اتصال کوتاه شکل موج TRV به چندین پارامتر متفاوت، از جمله نوع خطا (اتصال کوتاههای سه فاز به زمین، سه فاز، دوفاز به زمین، دوفاز و تکفاز به زمین) ، مکان خطا (ترمینال، در طول خط و خطا در ترانس)، امپدانس خطا، زمان رفع خطا، پارامترهای خط و تجهیزات جبرانساز بستگی دارد. استاندارد IEC56 شکل استاندارد مربوط به پارامترهای اصلی (نرخ صعود و مقدار پیک) TRV را تعیین نموده است. اگر شکل موج TRV از شکل استاندارد خود تجاوز کند یا به عبارت دیگر نرخ صعود و یا ماکزیمم دامنهٔ آن از حد مجاز خارج شود، ممکن است منجر به خرابی عایق و مختل شدن عملکرد کلید قدرت شود.

مقدار TRV را می توان با دو روش تحلیلی و شبیه سازی بدست آورد، ولی با توجه به پیچیدگی شبکهٔ برق و پیشرفت نرم افزارها، امروزه عمدتاً از شبیه‌سازی برای تعیین TRV استفاده می‌شود. برای بدست آوردن و ارزیابی TRV با استفاده از شبیه سازی دو روش ارائه شده است[۳]:

روش دقیق[2]: این روش براساس شبیه سازی فرآیند باز شدن کلید قدرت در یک شبکهٔ معادل سه فاز صورت می‌گیرد.

روش تزریقی[3]: در این روش فرآیند باز شدن کلید قدرت بوسیلهٔ تزریق یک جریان با مقدار مشابه و علامت مخالف با جریان خطا در یک شبکهٔ معادل تکفاز پسیو، شبیه سازی می‌شود. روش اول، دقیقتر است اما محاسبات آن نیاز به زمان و حافظهٔ بیشتری دارد درحالیکه روش تزریقی دقت کمتری دارد ولی سریعتر است.

با توجه به اینکه محاسبهٔ TRV با استفاده از نرم‌افزار صورت می‌گیرد، برای مدل کردن خط انتقال اغلب از مدل گسترده که مدل دقیقتری است استفاده می‌شود.

در بیشتر استانداردهای بین‌المللی مربوط به طراحی کلیدهای قدرت که با دیدگاه قطعی تدوین شده‌اند، ماکزیمم TRV ناشی از خطای سه فاز زمین نشدهٔ نزدیک کلید قدرت با یک ضریب ۱/۳ تا ۱/۵ به عنوان معیار طراحی در نظر گرفته شده است تا کلید قدرت صدمه نبیند. این در حالیست که انواع دیگر خطاها و در مکانهای مختلف نیز امکان بروز با احتمالی بالاتر از خطای سه فاز نزدیک کلید دارند[۱۰]. بنابراین یک دیدگاه احتمالی می‌تواند برای بدست آوردن یک ارزیابی واقعی از عملکرد سیستم تحت این رویدادها مورد استفاده قرار گیرد. شبیه‌سازیهای انجام شده در این مقاله با استفاده از دیدگاه قطعی است ولی ادامهٔ این کار می‌تواند ارزیابی احتمالی این موضوع با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو باشد که در حال انجام است.

1. Rate of Rise of the Recovery Voltage

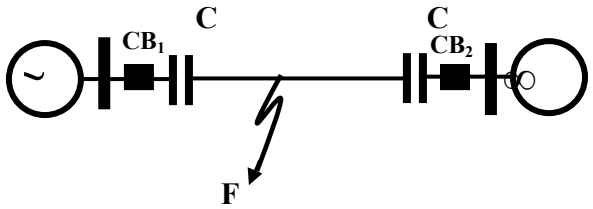
2. Exact method
3. Injection method

۴- بررسی تحلیلی تاثیر خازن سری بر TRV

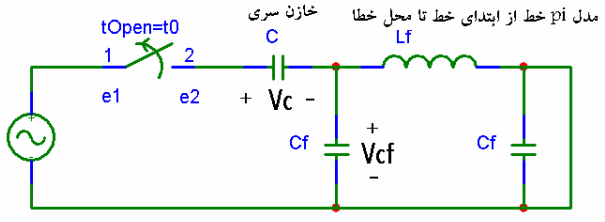
مرجع [۹] TRV را برای خطوط جبران شده با خازن سری بصورت تحلیلی محاسبه کرده است که در آن از مدل معادل pi برای مدلسازی خط انتقال استفاده شده است. این مقاله با تحلیل یک مدار دو فرکانسی نشان داده است که با اضافه شدن خازن سری TRV در کلید قدرت شدیدتر خواهد بود. در این قسمت قصد داریم تحلیل تاثیر خازن سری بر TRV را بصورت واضحتری انجام دهیم. این تحلیل برای دو حالتی که خازن در وسط خط و یا در طرفین خط نصب شود، انجام شده است.

۴-۱- خازن در طرفین خط:

در ابتدا فرض می‌کنیم خازن سری در طرفین خط نصب شده و اتصال کوتاه در نقطه ای در طول خط اتفاق افتاده باشد که در شکل۴ نشان داده شده است. در صورتیکه از مدل فشردهٔ pi برای خط انتقال استفاده شود، می‌توان مدار معادل شکل۵ را برای تحلیل استفاده نمود.



شکل(۴)- خازن سری در طرفین خط



شکل(۵)- مدار معادل خط با خازن سری در طرفین خط

همانطورکه در شکل۵ دیده می‌شود خازن موازی سمت راست اتصال کوتاه شده و حذف می‌گردد. خازن سری در گذرایی نقشی ندارد و پس از قطع کلید ولتاژ دو سر آن ثابت می‌ماند و گذرایی بین خازن موازی خط و سلف خط انجام می‌شود. ولی وجود ولتاژ ذخیره شده در دو سر خازن سری می‌تواند سبب افزایش TRV گردد. فرض کنیم کلید در لحظهٔ t_0 باز شود. با توجه به گذرایی سریع سمت خط، می‌توان از گذرایی طرف منبع صرف نظر کرد و ولتاژ آن را پس از باز شدن کلید ثابت فرض نمود. بنابراین می توان TRV را با استفاده از روابط زیر بدست آورد:

$$e_2(t) = V_c(t_0) + V_{cf}(t) \qquad (۲)$$

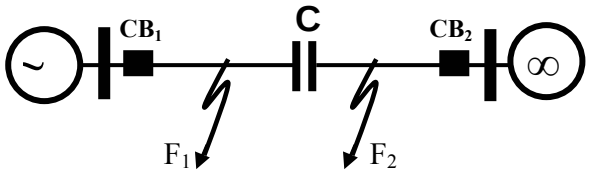
$$V_{cf}(t) = V_{cf}(t_0).\cos\left(\frac{2\pi}{\sqrt{L_f.C_f}}t\right) \qquad (۳)$$

$$TRV = \max(e_1(t_0) - e_2(t)) \qquad (۴)$$

بنابراین وجود خازن سری با ولتاژی که در دو سر آن ذخیره می‌گردد می‌تواند سبب افزایش TRV گردد. هر چه میزان جبرانسازی کمتر باشد حداکثر ولتاژی که می‌تواند در دو سر خازن ذخیره گردد کمتر می‌شود که در نتیجهٔ آن مقدار ماکزیمم TRV کمتر می‌شود. همانطورکه گفته شد گذرایی بین خازن و سلف مدل pi از ابتدای خط تا محل خطا، رخ می‌دهد از طرفی هر چه محل خطا به کلید نزدیکتر باشد مقادیر C_f و L_f کوچکتر می‌شود، بنابراین با نزدیکتر شدن خطا به منبع فرکانس گذرایی افزایش یافته و نرخ صعود TRV افزایش می‌یابد. از طرفی چون خازن در گذرایی دخالتی ندارد میزان جبرانسازی سری در این حالت تاثیری بر نرخ صعود TRV ندارد.

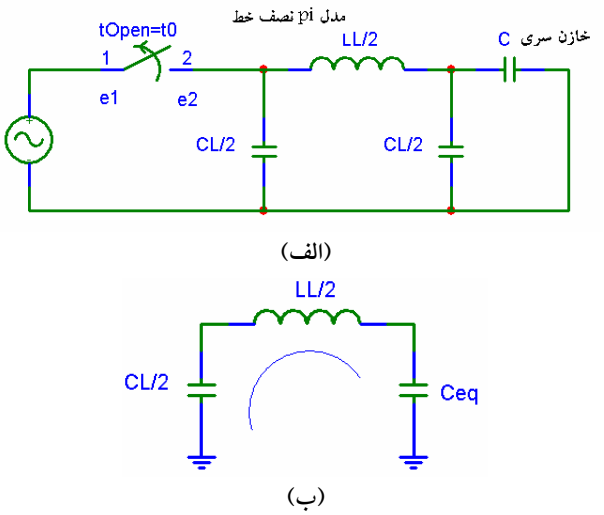
۴-۲- خازن در وسط خط:

وقتی خازن در وسط خط نصب می‌گردد، تاثیر خازن سری بر روی TRV بستگی به این دارد که اتصال کوتاه در کدام بخش از خط اتفاق افتد. بطور مثال در شکل۶ برای CB_1 اگر خطا در نیمهٔ اول خط اتفاق بیفتد(F_1) خازن سری تاثیری بر TRV مربوط به CB_1 ندارد. ولی اگر خطا در نیمهٔ دیگر خط اتفاق افتد(F_2) خازن سری تاثیر بسزایی را بر TRV دارد که در ادامه بررسی می‌کنیم.



شکل(۶)- خازن سری در وسط خط

در حالت بروز F_2 برای سادگی فرض کنیم خطا بلافاصله پس از خازن اتفاق افتاده باشد، در این صورت مدار معادل بصورت شکل۷ (الف) خواهد بود. با توجه به اینکه $C>>C_{L/2}$ است بنابراین مدار معادل تحلیل گذرایی سمت راست کلید CB_1 به صورت شکل۷ (ب) خواهد بود. که در آن C_{eq} برابر $C+C_{L/2}$ است که با توجه به اینکه $C>>C_{L/2}$ ، C_{eq} تقریبا برابر C است.



(الف)

(ب)

شکل(۷)- مدار معادل خط با جبران خازن سری در وسط خط

$$e_2(t) = e_2(t_0) - \frac{C}{C_{L/2}+C}(e_2(t_0) - V_c(t_0)) \times (1-\cos\frac{1}{\sqrt{L_L C'_{eq}}}t) \quad (۵)$$

که در آن $C'_{eq} = \frac{CC_{L/2}}{C+C_{L/2}}$ ، بنابراین مقدار ماکزیمم e2(t) برابر است با:

$$e_2^{\max} = |2V_C(t_0) - e_2(t_0)| \quad (۶)$$

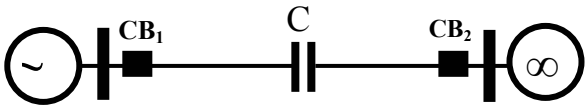
$$TRV = \max(e_1(t_0) - e_2(t)) \quad (۷)$$

دیده می‌شود که وجود خازن سری و ولتاژی که پس از قطع کلید در دو سر آن ذخیره می‌گردد، تاثیر بسزایی در افزایش TRV دارد. در این حالت نیز چون مقدار خازن تاثیر زیادی در فرکانس گذرایی ندارد میزان جبرانسازی بر روی نرخ صعود TRV تاثیر زیادی ندارد.

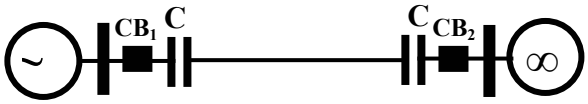
درصورتیکه خطا پس از خازن و در نیمهٔ دوم خط باشد تحلیل مداری آن کمی سخت خواهد بود. بطوریکه تبدیل لاپلاس آن منجر به یک معادلهٔ درجهٔ۴ خواهد شد. بنابراین از ذکر این مورد در اینجا صرفنظر شده و تنها در شبیه‌سازیها به آن پرداخته شده است.

۵- نتایج شبیه سازی

سیستم استفاده شده جهت شبیه سازی در این مقاله در شکل۸ نشان داده شده است. این سیستم از یک ژنراتور که با استفاده از یک خط انتقال به باس بینهایت متصل شده، تشکیل شده است. هر دو حالت خازن در وسط خط و در طرفین خط بررسی شده است.



الف: خازن سری در وسط خط



ب: خازن سری در طرفین خط

شکل(۸)- سیستم تحت مطالعه

اطلاعات مربوط به سیستم در جدول۱ آورده شده است.خط انتقال با استفاده از مدل گسترده مدل شده است.

در ابتدا میزان خازن جبرانساز را محاسبه می‌کنیم. ظرفیت خازن برای ضریب جبرانسازی ۴۰ درصدی و اندوکتانس خط داده شده برابر است با:

$$C = \frac{1}{0.4 \times 300 \times 0.988 \times 10^{-3} \times 377^2} = 59.33 \mu F$$

جدول(۱)- مشخصات سیستم

قسمتهای سیستم	سطح ولتاژ	مشخصات
منبع تولیدی	kV۵۰۰	R_g=۰/۰۵ Ω L_g=۰/۱۳۲H C_l=۵۰۰۰ pF
خط انتقال (۳۰۰کیلومتر)	kV۵۰۰	R_1=۰/۰۱۸۶۴Ω/km R_0=۰/۴۱۵۲ Ω/km L_1=۰/۹۸۸ mH/km L_0=۲/۸۴ mH/km C_1=۰/۰۱۱۸۶ μF/km C_0=۷/۷۵۱ pF/km
باس بینهایت	kV۵۰۰	P_0=۱۵۰۰ MW Q_0=۹۰۰ MVAR
سطح جبرانسازی		۴۰ درصد

حال باید اختلاف زاویهٔ بین باس بینهایت و منبع(δ) را بدست آورد. با توجه به میزان توان انتقالی داده شده (۱۵۰۰ مگاوات) مقدار δ را می‌توان با استفاده از رابطهٔ تقریبی توان انتقالی بدست آورد. با توجه به اینکه طول خط ۳۰۰ کیلومتر است باید از رابطهٔ توان انتقالی برای خطوط طویل استفاده نمود:

$$P = \frac{V_1 \times V_2}{Z_0 \sin\theta} \sin\delta \qquad (۸)$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \times l = 0.0739 \frac{\deg}{km} \qquad (۹)$$

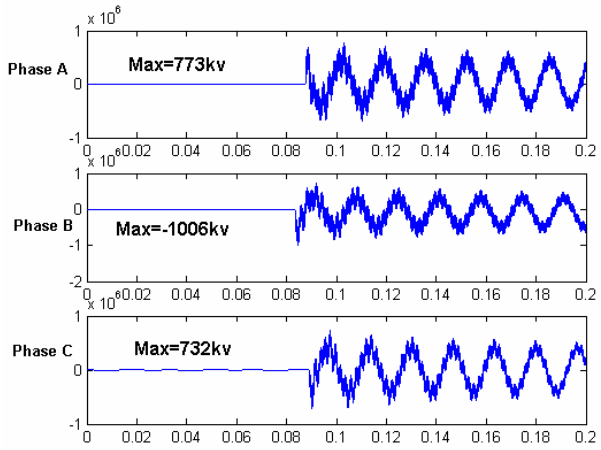
$$\theta = \beta l = 0.0739 \times 300 = 22.18^\circ \qquad (۱۰)$$

$$\sin\delta = 0.654 \Rightarrow \delta = 40.83^o$$

برای شبیه‌سازی هر دو حالت خازن وسط و خازن در طرفین خط را بررسی می‌کنیم. یک حالت پایه در نظر می‌گیریم و برای مشخص کردن تاثیر خازن سری و هر یک از پارامترهای خطا (نوع و مکان)، فقط یکی از پارامترها را تغییر می‌دهیم و سپس برای حالت بعد تغییر را دوباره به حالت اصلی بر می‌گردانیم.

۵-۱- خازن در طرفین خط:

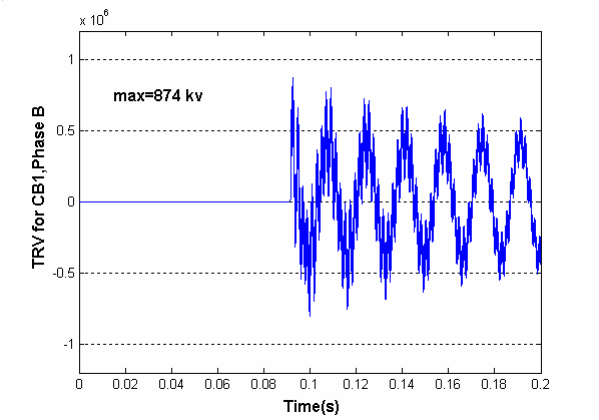
حالت پایهٔ در نظر گرفته شده عبارت است از: ۴۰ درصد جبرانسازی- خطای سه فاز در وسط خط- زمان رفع خطا ۵ سیکل و در لحظهٔ وقوع خطا زاویهٔ باس بینهایت صفر است. پس از اعمال حالت پایه به سیستم، شکل موجها و ماکزیمم TRV را برای CB1 در هر سه فاز بدست می‌آوریم که در شکل۹ آورده شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم TRV مربوط به فاز B است که مقدار آن ۱۰۰۶ کیلوولت است که معادل ۲/۰۱۲ پریونیت است. حال با تغییر میزان جبرانسازی و همچنین دیگر پارامترها، اثر آنها را بر روی TRV بررسی می‌کنیم. با توجه به محدودیت صفحات مقاله، ارائهٔ نتایج فقط برای فاز با TRV بیشتر صورت می‌گیرد.



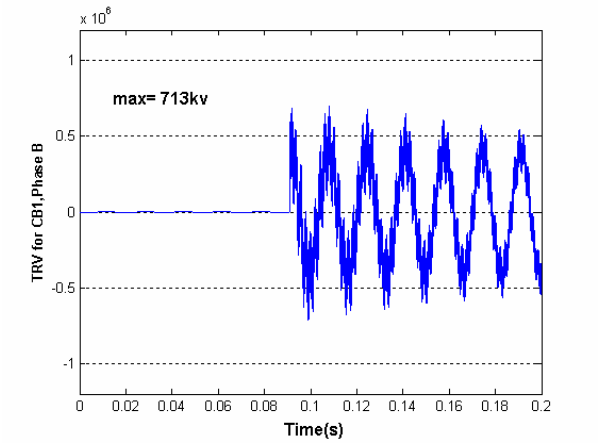
شکل(۹)- شکل موجهای TRV برای هر سه فاز در حالت پایه وقتی خازن در طرفین خط باشد.

۵-۱-۱- تاثیر میزان جبرانسازی سری:

برای بررسی تاثیر مقدار جبرانسازی، ابتدا جبرانسازی را ۲۰ درصد فرض می‌کنیم و سپس خازن را برمی‌داریم. نتیجه در شکلهای ۱۰ و ۱۱ رسم شده است. دیده می‌شود که TRV در حالت با ۲۰ درصد جبرانسازی به ۸۷۴ کیلوولت و در حالت بدون خازن سری به ۷۱۳ کیلوولت کاهش یافته است که بیانگر تاثیر میزان جبرانسازی خازن بر روی TRV است. همچنین همانگونه که در شکلها مشخص است نرخ صعود TRV نیز تغییری نکرده است که همان نتایجی است که در قسمت تحلیلی نیز بیان شد.



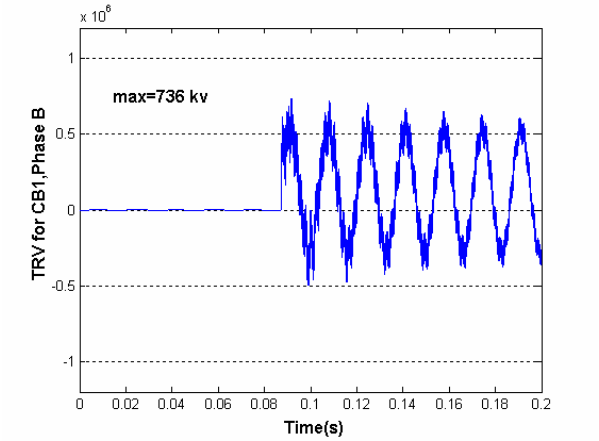
شکل(۱۰)- **TRV** در حالت با ۲۰ درصد جبرانسازی



شکل(۱۱)- **TRV** در حالت بدون جبرانسازی

۵-۱-۲- تاثیر نوع خطا:

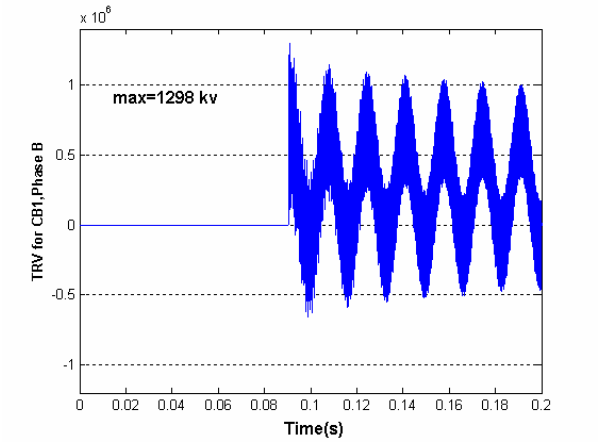
با تغییر خطای سه فاز به تکفاز TRV کاهش می‌یابد. نتیجهٔ این تغییر برای فاز B در شکل۱۲ رسم شده است که TRV از ۱۰۰۶ به ۷۳۶ کیلوولت کاهش یافته است.



شکل(۱۲)- خطای تکفاز و کاهش شدید در **TRV**

۵-۱-۳- تاثیر مکان خطا:

در این قسمت مکان خطا را از وسط خط به سمت منبع نزدیک می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد که هرچه مکان خطا به منبع نزدیکتر باشد، دامنهٔ TRV افزایش یافته و از طرف دیگر با نزدیکتر شدن خطا به منبع، فرکانس گذرایی زیاد شده و نرخ صعود نیز افزایش می‌یابد. شکل۱۳ TRV مربوط به فاز B را برای حالتی که خطا در ۵۰ کیلومتری منبع است نشان می‌دهد.

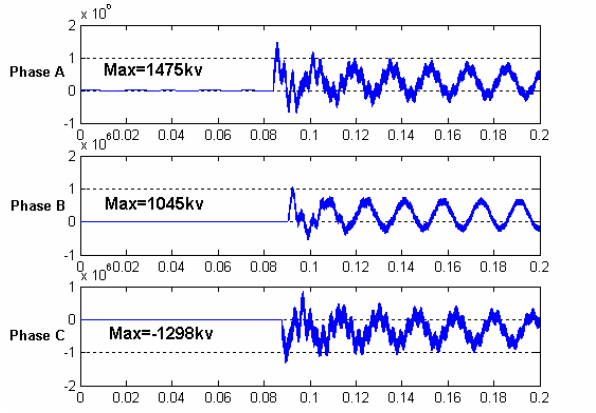


شکل(۱۳)- تاثیر مکان بر **TRV** (خطا در ۵۰ کیلومتری منبع)

همانطور که در شکل نیز دیده می‌شود، دامنهٔ TRV از ۱۰۰۶ به ۱۲۹۸ کیلوولت افزایش یافته و از طرف دیگر واضح است که شکل پر شده است که نشان از افزایش فرکانس گذرایی و افزایش نرخ صعود دارد که نتایج حاصله با نتایج روش تحلیلی مطابقت دارد.

۵-۲- خازن در وسط خط:

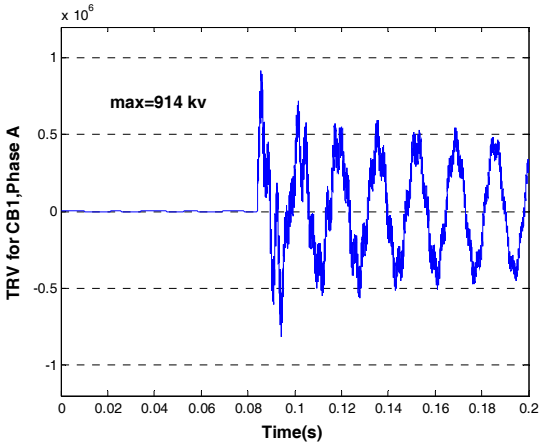
حالت پایه در اینجا نیز مانند خازن در طرفین خط است، با این تفاوت که مکان حالت پایه را در ۲۲۵ کیلومتری منبع در نظر می‌گیریم. شکل موج TRV برای هر سه فاز و برای حالت پایه در شکل۱۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم TRV مربوط به فاز A است که مقدار آن ۱۴۷۵ کیلوولت است که معادل ۲/۹۵ پریونیت است. حال با تغییر میزان جبرانسازی و همچنین پارامترها، اثر آنها را بر روی TRV بررسی می‌کنیم. با توجه به اینکه بدترین فاز در این حالت فاز A است در زیر بخشهای بعدی نتایج را فقط برای این فاز رسم می‌کنیم.



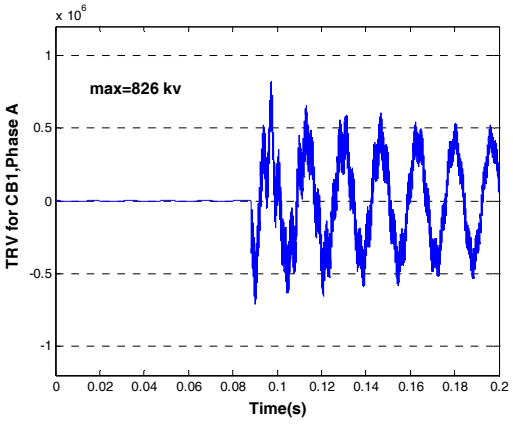
شکل(۱۴)- شکل موجهای TRV برای هر سه فاز برای حالت پایه وقتیکه خازن در وسط خط باشد.

۵-۲-۱- تاثیر میزان جبرانسازی سری:

شکلهای ۱۵ و ۱۶ که TRV را در فاز A نشان می‌دهند بیانگر آن هستند که با کاهش میزان جبرانسازی، TRV به شدت کاهش می‌یابد که نشان از تاثیر بسزای خازن سری بر TRV دارد. در قسمت تحلیلی بیان شد که میزان جبرانسازی تاثیر زیادی بر فرکانس گذرایی و درنتیجه نرخ صعود TRV ندارد که نتایج شبیه سازی نیز آن را تایید می‌کند.



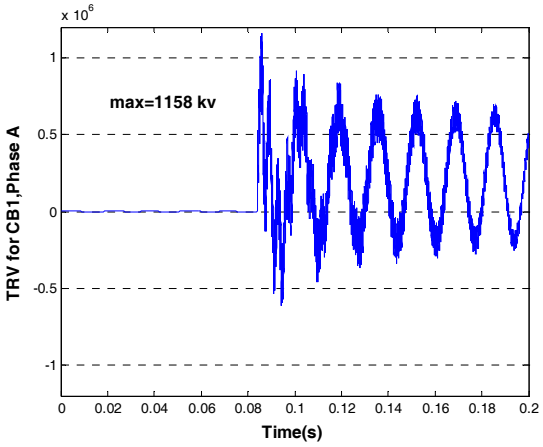
شکل(۱۵)- TRV در حالت با ۲۰ درصد جبرانسازی



شکل(۱۶)- TRV در حالت بدون جبرانسازی

۵-۲-۲- تاثیر نوع خطا:

با تغییر نوع خطا از سه فاز به تکفاز TRV به شدت کاهش می‌یابد. فرض کنیم اتصال کوتاه تکفاز در فاز A رخ دهد، در اینصورت بیشترین TRV را به مقدار ۱۱۵۸ کیلوولت در فاز A خواهیم داشت که در شکل۱۷ رسم شده است. TRV در فازهای B و C به ترتیب ۷۰۴ و ۸۳۴ کیلوولت است.



شکل(۱۷)- خطای تکفاز و کاهش شدید در TRV

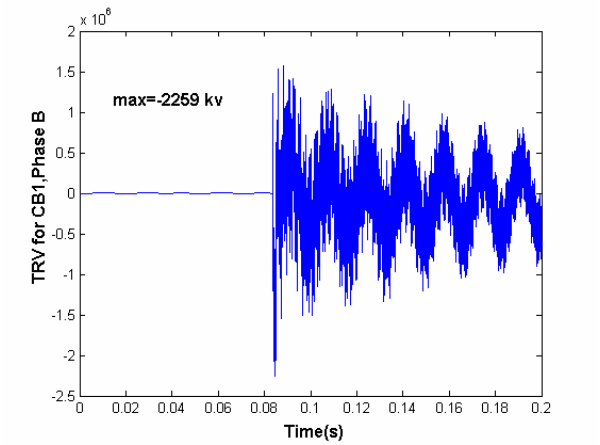
۵-۲-۳- تاثیر مکان خطا:

تغییر مکان خطا در حالتیکه خازن در وسط خط نصب شده باشد، تاثیر متفاوتی را بر TRV نسبت به حالتیکه خازن در طرفین خط باشد دارد. با توجه به آنکه اگر خطا در نیمهٔ اول باشد خازن سری تاثیری در گذرایی ندارد، تغییر مکان خطا در این نیمه تاثیر زیادی برTRV ندارد، ولی اگر خطا در نیمهٔ دوم خط اتفاق بیفتد تغییر مکان خطا تاثیر بسزایی را بر TRV می‌گذارد بطوریکه هر چه مکان خطا به خازن نزدیکتر باشد شدت TRV بیشتر می‌شود. جدول۲ مقادیر TRV را برای فازهای مختلف و برای مکانهای مختلف خطا در طول خط نشان می‌دهد.

همچنین شکل۱۸ TRV را برای فاز B و در فاصلهٔ ۱۷۵ کیلومتری از منبع را نشان می‌دهد که بیانگر این است که علاوه بر افزایش دامنهٔ TRV ، نرخ صعود آن نیز افزایش یافته است.

جدول(۲)- مقادیر ماکزیمم TRV در مکانهای مختلف خطا در طول خط انتقال

نوع فاز / فاصله از منبع (کیلومتر)	Aفاز (کیلوولت)	Bفاز (کیلوولت)	Cفاز (کیلوولت)
۲۵	۷۲۵	۷۸۴	۷۳۰
۵۰	۷۶۹	۷۷۴	۷۵۹
۷۵	۷۹۷	۶۹۷	۷۷۳
۱۰۰	۸۳۲	۸۳۷	۸۳۵
۱۲۵	۸۵۷	۶۸۶	۷۳۷
۱۷۵	۱۶۶۶	۲۲۵۹	۱۳۰۰
۲۰۰	۱۱۸۴	۱۱۵۶	۱۱۶۶
۲۲۵	۱۴۷۵	۱۰۴۵	۱۲۹۸
۲۵۰	۱۶۵۰	۱۰۰۷	۱۴۳۴
۲۷۵	۱۶۴۲	۱۰۴۵	۱۶۷۸



شکل(۱۸)- TRV برای خطا در ۱۷۵ کیلومتری منبع

۶- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیلی و همچنین شبیه سازی نشان می‌دهد که وجود خازن سری می‌تواند تاثیر بسزایی در افزایش TRV داشته باشد که هرچه میزان جبرانسازی بیشتر باشد مقدار TRV افزایش بیشتری خواهد داشت. مکان خطا تاثیر زیادی در دامنه و همچنین نرخ صعود TRV دارد بطوریکه هرچه مکان خطا به خازن سری نزدیکتر باشد دامنهٔ TRV افزایش خواهد یافت و هرچه خطا به منبع نزدیکتر باشد موجب افزایش نرخ صعود TRV خواهد شد.

خطای سه فاز به زمین مقدار TRV بیشتری را نسبت به انواع دیگر خطا ایجاد می‌کند و این درحالیست که احتمال وقوع این خطا خیلی کمتر از انواع دیگر خطا است. اگر طراحی کلید قدرت با استفاده از دیدگاه قطعی صورت گیرد، طراحی باید به ازای بدترین شرایط ممکن که در مورد نوع خطا، سه فاز به زمین است انجام شود که این امر مستلزم صرف هزینه های زیادی است. بنابراین دیدگاه قطعی برای پدیده‌هایی که همراه با چندین عدم قطعیت هستند اقتصادی نخواهد بود و یک دیدگاه احتمالی می‌تواند برای بدست آوردن یک ارزیابی واقعی از عملکرد سیستم تحت عدم قطعیتهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. یکی از بهترین تکنیکها برای بررسی پدیده های احتمالی استفاده از تکنیک شبیه سازی مونت کارلو می‌باشد. با این تکنیک علاوه بر محاسبهٔ مقدار ماکزیمم TRV ، با تعریف یک شاخص ریسک می‌توان احتمال توزیع این ولتاژ را نیز تعیین نمود که موضوع ادامهٔ این تحقیق است که در حال انجام است.

مراجع:

[1] Y. Xiao, Y. H. Song, C. C. Liu, and Y. Z. Sun, “Available Transfer Capability Enhancement Using FACTS Devices”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, No.1, pp.305-312, Feb.2003.

[2] M. E. Marsafawy, “Application of Series-capacitor and Shunt –reactor Compensation to an existing Practical AC Transmission Line”, IEE Proceedings, Vol.138, No.4, July.1991.

[3] D. L. Swindler, et al, “Transient Recovery Voltage Considerations in the Application of Medium-Voltage Circuit Breakers”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.33, No.2, April.1997.

[4] D. M. Nabb, M. Granger, Q. B. Van, M. Rousseau, M. Pilot, “Transient Design Studies for the Transmission Series Compensated Transmission System”, IPST Conference, paper-081, 2001.

[5] B. L. Avent, D. F. Peelo, J. H. Sawada, L. A. Snider, “Limitation of Transient Recovery Voltage and Slow-Front Overvoltages in series Compensated Transmission Lines and in Reactor Switching”, Electric Power Systems Research, Vol.45, No.1, p.p. 13-18 April.1998.

[6] Q. Bui-Van, M. Rousseau, "Control of Over-voltages on Hydro-Québec 735-kV Series-Compensated System During a Major Electro-mechanical Transient Disturbance", IPST Conference, paper-014, 2001.

[7] Q. Bui-Van, B. Khodabakhchian, H. Huynh, "Transient Simulation Study for The 1500KM North-south 500kV Interconnection in Vietnam", Proceedings of the 1st Vietnamese Conference on 500 kV Transmission System, Hanoi, Dec.1999.

[8] Q.Bui-Van, E. Portales, D. Mcnabb, V.Gajardo, "Transient Performance of 500-kv Equipment for The Chilean Series-Compensated Transmission System", International Conference on Power Systems Transients, IPST2003, New Orleans, USA.

[9] F. Iliceto, G. Cinieri, G. Asan ," TRVs Across Circuit Breakers of Series Compensated Lines Status With Present Technology and Analysis for The Turkish 420-KV Grid", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.2, p.p.757-766, 1991.

[10] S.O. Faried, S. Aboreshaid, "A Probabilistic Technique for the Evaluation of Transient Recovery Voltages across Circuit Breakers of Series Capacitor Compensated Transmission Lines", IEEE International Conference on Power System Technology, Vol.2, p.p. 861-865, Dec. 2000.