

طراحی بهینه اسنابرهای GCSC

سولماز موسوی دیزج

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز

E-mail: solmaz.mousavi@hotmail.com

چکیده - در این مقاله به بررسی و طراحی بهینه مدار اسنابر مورد استفاده در جبران‌ساز GCSC پرداخته شده است. جبران‌ساز GCSC نوعی جبران‌ساز خازن سری است که به صورت سری در خطوط انتقال بلند (EHV) برای جبران افت ولتاژ، افزایش پایداری و کنترل تقسیم بار بین مسیرهای انتقال موازی بکار می‌رود. این جبران‌ساز توسط تایرستورهای GTO کنترل می‌شود. مدار اسنابر مورد مطالعه در این مقاله به همراه مدار GTO در جبران‌ساز قرار می‌گیرد. این اسنابر مزایای زیادی دارد. از جمله آن می‌توان به توانایی آن در کاهش حالت گذرای جریانهای ناخواسته اشاره کرد. این جریانه‌ها می‌توانند به بای پس شدن خازن جبران‌ساز منجر شوند. از طرف دیگر باعث می‌شود GTO در یک ناحیه عملکرد سالم سوئیچ کند. نبودن تلفات مقاومتی در حالت روشن مدار از مزایای دیگر این اسنابر نسبت به طراحیهای دیگر به شمار می‌رود.

کلید واژه - اسنابر ، جبران‌ساز ، تایرستور

1- مقدمه

تقریباً اکثر اجزاء سیستم قدرت به نحوی در تولید و مصرف توان راکتیو نقش دارند. بنابراین لزوم تولید، انتقال و کنترل توان راکتیو در شبکه قدرت الزامی است. از طرف دیگر، دو ضابطه مهم در کار رضایت بخش یک شبکه الکتریکی وجود دارد، اولاً ژنراتورها در سرعت سنکرون کار کنند و ثانیاً ولتاژ شبکه در سطوح مختلف سیستم بایستی در محدوده مجاز خود قرار داشته باشد. ضابطه اول در واقع شرط برابری توان اکتیو تولید شده و مصرف شده را بیان می‌کند. برای برقراری شرط دوم بایستی تعادل بین توان راکتیو تولیدی و مصرفی در هر ناحیه از شبکه الکتریکی برقرار باشد. علاوه بر این کنترل توان راکتیو می‌تواند تاثیر مطلوبی بر رفتار سیستم قدرت داشته باشد که باعث بالا رفتن کیفیت برق خواهد شد. اهداف عمده جبران توان راکتیو ، تصحیح ضریب توان، بهبود تنظیم ولتاژ و متعادل کردن بارها است. اکثر بارهای صنعتی دارای ضریب توان پس فاز هستند. یعنی توان راکتیو جذب می‌کنند. بنابراین جریان معرفی آنها بیشتر از جریان مورد نیازشان خواهد بود. این مسئله باعث تحمیل

هزینه اضافی به مصرف کننده می‌شود که با استفاده از جبران کننده های محلی می‌توان این هزینه را کاهش داد. مسئله بعدی تنظیم ولتاژ است ، تغییر توان راکتیو در تمامی موارد منجر به تغییرات ولتاژ در نقاط تغذیه می‌شوند که اثرات نامطلوبی مانند فرو رفتگی ولتاژ، چشمک زدن و... به دنبال خواهد داشت. راه حل عملی و اقتصادی استفاده از جبران کننده هاست که قابلیت انعطاف بیشتری نسبت به ژنراتورها دارند. همچنین با استفاده از جبران کننده ها می‌توان بر مسئله نامتعادلی فازها فائق آمد.

2- جبران سازهای سری

توان منتقله توسط خط انتقالی برای یک سیستم دوماشینه توسط معادله زیر بیان می‌شود .

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

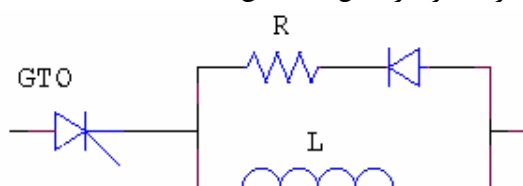
با توجه به رابطه فوق مشاهده می‌گردد که اگر X_L کاهش یابد ، باعث افزایش توان انتقالی توسط خط انتقال خواهد شد . بر این اساس خازنهایی بصورت سری با خط انتقال قرار می‌گیرند .

اجازه میدهد که کنترل دایم و سریع در میزان جبران سازی با استفاده از فقط یک مدول خازنی انجام گیرد. GCSC می تواند تغییرات مداوم در سطح کاپاستانس خط را ایجاد کند. مدار جبران ساز GCSC شامل بانک خازنی و سویچهای GTO است که بطور معکوس موازی شده اند. وقتی هر کدام از سویچهای GTO روشن میشوند، خازن بای پس شده از مدار خارج می شود و به محض اینکه GTO خاموش شد، خازن وارد خط شده قسمتی از اندوکتانس خط را جبران میکند. این ورود و خروج خازن در هر نیم سیکل اتفاق می افتد. بدین ترتیب که خاموش و روشن شدن خازن در هر کدام از نیم سیکلها توسط یکی از GTO ها انجام میشود. میزان خازنی که در هر نیم سیکل وارد خط می شود به درجه جبران سازی بستگی دارد.

زاویه خاموشی (γ) سطح جبران سازی متوسط را کنترل می کند. چنانچه حالت روشن GTO کاهش یابد، میزان جبران سازی افزایش یافته و به همان اندازه جریان بیشتری از خازن عبور می کند. وقتی سویچها بطور کامل خاموشند خازن بطور کامل در مدار است، که ماگزیمم جبران سازی قابل حصول میگردد. شاید اهمیت زیادی داشته باشد که این جبران ساز بتواند تغییرات مداوم رابطور یکنواخت با استفاده از فقط یک خازن کنترل کند.

3- اسنابرها

تایرستورهای GTO در حالت عادی باید با اسنابر استفاده شوند. این مدار اسنابر در شکل (2) نشان داده شده است.



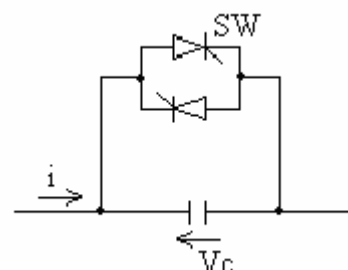
شکل (2) مدار اسنابر GTO

همانطور که از شکل نیز پیداست مدار اسنابر از یک سلف موازی با یک شاخه مقاومت-دیود تشکیل شده است. در حالتی که GTO خاموش است مدار اسنابر مورد نیاز نیست چرا که خازن dv/dt را محدود میکند.

در حالتی که GTO روشن است باید جریان آند GTO از مقدار ماگزیمم تعیین شده در مشخصات آن کمتر باشد. از این رو در حالت روشن باید از مدار اسنابر استفاده شود.

خازن سری موجب افزایش ولتاژ انتهای فیدر مستقل از جریان بار و کاهش امپدانس راکتیو سری خط می شود. ولی خازن سری معایبی نیز دارد، اولاً توانائی تولید توان راکتیو برای بارهای فیدر را ندارد. ثانیاً خازن سری نمی تواند جریان خط را تحمل کند و موجب اضافه ولتاژ شدیدی میشود. مسائل دیگری مانند پدیده تشدید و... باعث شده که کاربرد آنها در سیستم های توزیع محدود شود.

بر این اساس جبران ساز TSSC معرفی شد که شامل تعدادی خازن می باشد و توسط یک سری کلیدهای تایرستوری دو طرفه بصورت سری با خط انتقال قرار می گیرند. جبران ساز TSSC ولتاژ جبران سازی پله ای خواهد داشت که از این جهت محدودیت دارد. TSSC قادر نیست خاصیت طبیعی خازن سری خط را تغییر دهد بنابراین این ممکن است در محدوده ریر فرکانس اصلی سیستم با دیگر امپدانسهای موجود شبکه به حالت تشدید برسد، که این مسئله (نوسانات زیر سنکرون) یکی دیگر از معایب TSSC است. برای رفع این معایب TCSC معرفی شد، که تا حدود زیادی مسئله نوسانات زیر سنکرون را کاهش میدهد. و در نهایت برای حذف کامل نوسانات زیر سنکرون SSSC معرفی شد. جبران سازهای سری که سویچ یا کنترل میشوند، بر پایه تکنولوژی تایرستورهای معمولی هستند. در این روش چون تایرستور توانایی خاموش شدن را ندارد محدودیت وجود دارد. برای رفع این مشکل از تایرستورهای خاموش شونده با گیت استفاده میشود، بنابراین خازنهای سری کنترل شونده توسط تایرستور GTO، (GCSC) برای دستیابی به منظور فوق پیشنهاد میشود. این جبران ساز که در شکل (1) نشان داده شده است، شامل یک خازن موازی با سویچ تایرستور GTO است.



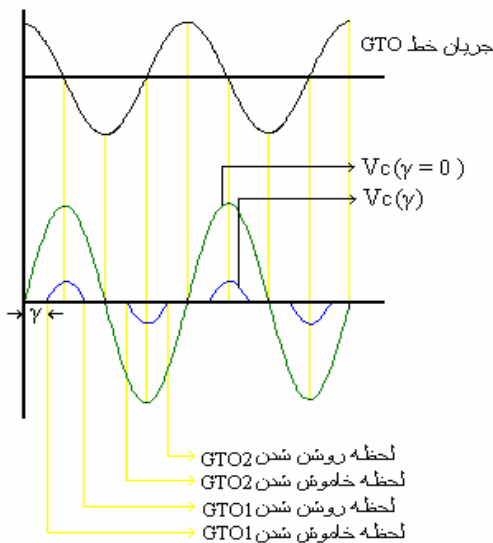
شکل (1) خازن سری کنترل شونده پایه

GCSC میتواند بطور موثر برای تولید جبران سازی دائم و سریع در امپدانس خط مورد استفاده قرار گیرد. مزیت GCSC نسبت به TCSC، های معمولی این است که GCSC

$i \cos \omega t$ تعریف شود، ولتاژ خازن با زاویه تاخیر بشکل زیر خواهد بود

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_{\gamma}^{\omega t} i(t) dt = \frac{I}{\omega C} (\sin \omega t - \sin \gamma)$$

از زمانی که سویچ در زاویه γ باز می شود تا گذر از صفر بعدی ($\gamma < \omega t < \pi - \gamma$) ولتاژ در همین حال باقی می ماند. در شکل (4) جریان خط و ولتاژ خازن را در دو حالت مختلف نشان می دهد. یکی وقتی GTO ها تمام مدت خاموشند و ولتاژ جبران سازی قابل حصول است ($\gamma = 0$) و دومی حالتی که خازن توسط GTO ها کنترل می شود. همانطور که در شکل نیز مشخص است کنترل ولتاژ خازن در هر نیم سیکل توسط یکی از GTO ها انجام می شود.



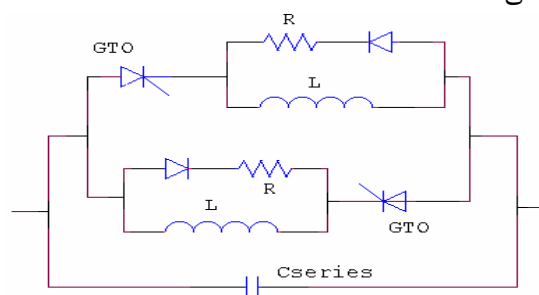
شکل (4) جریان خط و ولتاژ خازن در دو حالت ($\gamma = 0$) و (γ مشخص)

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در لحظه خاموش شدن GTO نوسانی در جریان GTO مشاهده نمی شود. ولی در لحظه روشن شدن ضربه ای با دامنه در حدود 1.5 برابر جریان عادی دیود داریم و همین باعث ایجاد یک ضربه کوچک در ولتاژ خازن می شود. این ضربه به صورت همزمان با ضربه جریان ایجاد می شود. این ضربه های ذکر شده در شکل موج ولتاژ خازن کنترل شده و جریان سویچ در شکل (5) نشان داده شده است.

این حالت سلف سری با GTO تغییرات جریان GTO را در حالت روشن محدود میکند. در خلال حالت روشن GTO خازن و سلف باهم موازی می شوند که انتظار می رود یک نوسان غیرمیرا ایجاد کنند. راه حل مناسب برای میرا کردن این نوسان، اضافه کردن یک مقاومت سری در مسیر سلف است ولی این مقاومت به تنهایی باعث افزایش تلفات مداوم ناخواسته میشود. تا وقتی که جریان GTO افزایش می یابد دیود معکوس مقاومت را از مدار خارج می کند. بنابراین در حالت روشن هیچگونه تلفات مقاومت بطور عمدی نداریم. GTO در هر نیم سیکل روشن و خاموش می شود. وقتی که GTO در یک جریان غیر صفر خاموش شد، جریان موجود در شاخه القاگر بلافاصله نمی تواند تغییر کند پس باید سلف تخلیه شود. شاخه دیود- مقاومت که موازی سلف است مسیر دشارژ آنرا فراهم میکند. به عبارت دیگر در هر دو لحظه خاموش و روشن شدن، دیود بایاس مستقیم شده و انرژی ذخیره شده در سلف را تلف می کند. پس میتوان پذیرفت در لحظه خاموش شدن GTO هیچ نوسانی در جریان GTO وجود ندارد. برای حل این مشکل از یک دیود بایاس معکوس در شاخه مقاومت استفاده می شود. به طوری که شاخه مقاومت- دیود را به صورت موازی با سلف قرار می دهند.

4- طراحی اسنابر

شکل (3) مدار جبران ساز GCSC را به همراه اسنابرهایی GTO نشان می دهد.



شکل (3) جبران ساز GCSC همراه مدار اسنابر

در این جبران ساز همانطور که ذکر شد برای کنترل ولتاژ خط عمل باز و بسته شدن سویچ در هر نیم سیکل، به صورت سنکرون با فرکانس سیستم اتفاق می افتد. زمان خاموشی سویچ در هر نیم سیکل با زاویه تاخیر (یا خاموشی) γ ، ($0 < \gamma < \pi/2$) کنترل می شود. اگر جریان خط با رابطه $i(t) = I$

محدودیت‌های GTO را بدانیم . GTO مورد استفاده در این مقاله $1000^A - 8000^V$ است.

حال فرض کنید GTO در یک جریان غیر صفر مثل I_0 خاموش شده باشد. در این صورت انرژی ذخیره شده در سلف برابر $L \cdot I_0^2 / 2$ خواهد بود. این انرژی باید در مقاومت اسنابر تلف شود. در این حالت اسنابر به صورت یک مدار RL است. ثابت زمانی اسنابر L/R است. برای تعیین مقدار مقاومت اسنابر باید دید جریان سلف باید تا چه میزان پایین بیاید. به عنوان مثال این مقدار میتواند $0.1 I_0$ باشد. مطالعات نشان میدهد که به منظور محدود کردن تلفات اسنابر، باید حالت روشن GTO را به مینیمم رساند. حالت روشن GTO به دو ثابت زمانی محدود می شود، برای می نیمم حالت روشن 40° $R=0.05$, $\tau=1ms$

سلف L در اسنابر، نرخ تغییرات جریان GTO (di/dt) را در حالت روشن محدود میکند . مقدار $di/dt=500 \text{ A}/\mu s$ را میتواند تحمل کند. وظیفه سلف حفاظت GTO در مقابل افزایش جریان بیشتر از این مقدار است. خازن دارای مشخصات 10Ω ، 1000 A است که با MOV (Metal Oxid Varistor) با سطح ولتاژ حفاظتی 22^{KV} محافظت خواهد شد. بنابراین اندوکتانس میتواند با رابطه ساده $V=L di/dt$ ارزیابی شود.

$$V = 22^{KV} = L di/dt$$

$$di/dt < 500 \text{ A}/\mu s$$

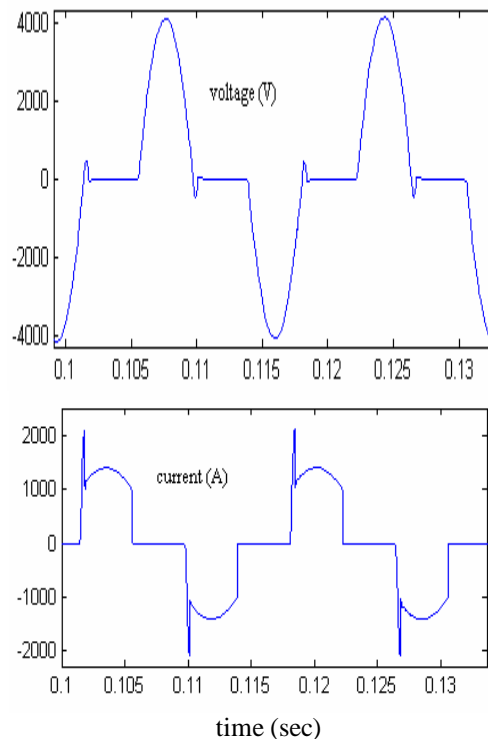
$$22^{KV} / L < 500 \text{ A}/\mu s$$

$$L > 44 \mu h$$

بحث فوق نشان میدهد که سلف $50 \mu h$ کافی است .

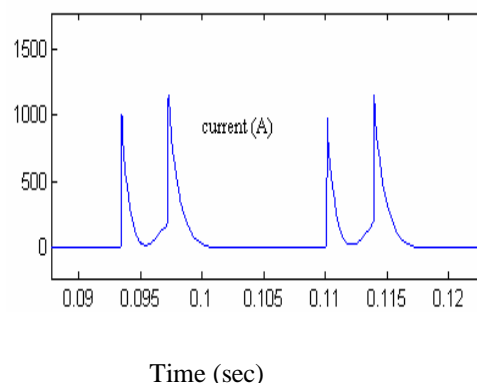
5- تلفات اسنابر

یکی از مزیت‌های اصلی مدار اسنابر پیشنهادی نسبت به طراحیهای دیگر نبودن مقاومت سری با سلف است . بنا براین این اسنابر هیچ تلفات مقاومتی مهمی در حالت روشن ندارد . به هر جهت چنانکه قبلاً ذکر شد در پیک جریان موجی روشن، ولتاژ سلف، دیود را بایاس مستقیم میکند و این باعث میرا شدن نوسان LC میشود . به عبارت دیگر وقتی که GTO خاموش میشود انرژی که به داخل سلف رفته از طریق شاخه D-R دشارژ میشود . میزان تلفات این انرژی به دامنه جریانی که سلف در GTO خاموش دارد ، بستگی دارد. برای عملکرد بهتر می نیمم زمان حالت روشن را به دو ثابت زمانی اسنابر محدود می کنیم. در مطالعه هر



شکل (5) ولتاژ خازن و جریان سوچ GTO در حالت پایا

بدنبال جریان پیک حالت روشن که در شکل (5) نشان داده شده، ولتاژ سلف از صفر می گذرد. در حالی که از طرف دیگر ولتاژ خازن روی سلف افتاده و با توجه به رابطه $V=L di/dt$ جریان زیادی از سلف خواهد گذشت. در این حالت جریان سلف برابر مجموع جریان دیود و جریان GTO است. که باعث می شود دیود بایاس مستقیم شود و این به مسیر مقاومت-دیود اجازه میدهد تا نوسان LC را جذب کند. بنابراین جریان گذرا بجای خازن از شاخه D-R میگذرد و تلف میشود. شکل (6) جریان یکی از دیودها را نشان میدهد.



Time (sec)
شکل (6) جریان دیود

هدف اولیه از عملکرد اسنابر ایجاد کارایی سالم برای سوچینگ GTO است . بنابراین لازم است ویژگیها و

شکل (2و3)

این شکلها شکل موج ولتاژ خازن و جریان GTO را نشان میدهند. وقتی GTO روشن میشود خازن بای پس شده و به محض روشن شدن در جریان GTO و ولتاژ خازن ضربه های همزمانی خواهیم داشت که در شکل نیز قابل مشاهده است.

شکل (4)

این شکل ولتاژ خازن را در دو حالت نشان میدهد. حالت اول وقتی که GTO ها همیشه خاموش هستند و دومی زمانی که GTO ها خازن را کنترل می کنند.

شکل (5)

این شکل جریان یکی از دیودها را نشان می دهد. در هر سیکل دیود دو بار بایاس مستقیم میشود، یکی هنگام روشن شدن GTO و دیگری هنگام خاموش شدن آن. انرژی ذخیره شده در سلف از طریق شاخه دیود-مقاومت تلف میشود.

شکل (6)

در این شکل جریان خط به همراه جریان شیفت یافته خط دیده میشود و با استفاده از شکل موج شیفت یافته پالس GTO ایجاد میشود. پالس از لحظه گذر از صفر شکل موج شیفت یافته شروع شده و تا میزان تعیین شده قبلی که قابل تغییر است ادامه می یابد.

سیستم مقاومت هر اسنابر، ماگزیمم انرژی تلفی را در 112 ژول دارد. این مطابق با تلفات اسنابر نهایی حدود 40 KW برای GCSC سه فاز است.

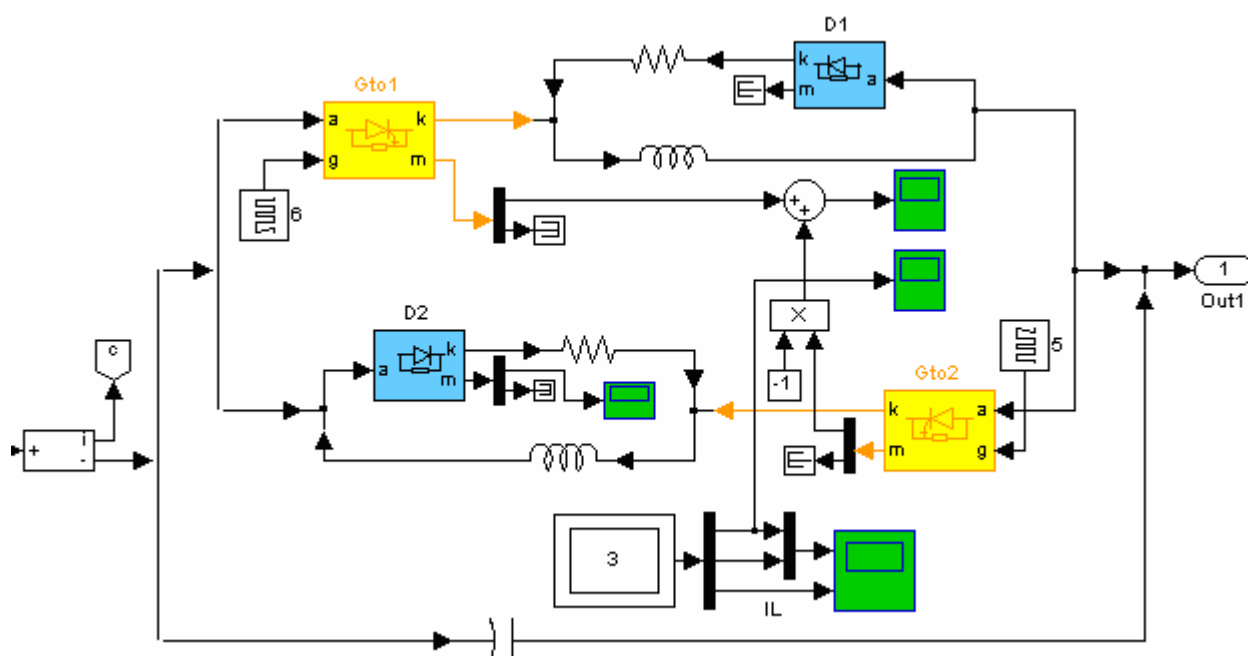
6- نتایج شبیه سازی

شکل (1)

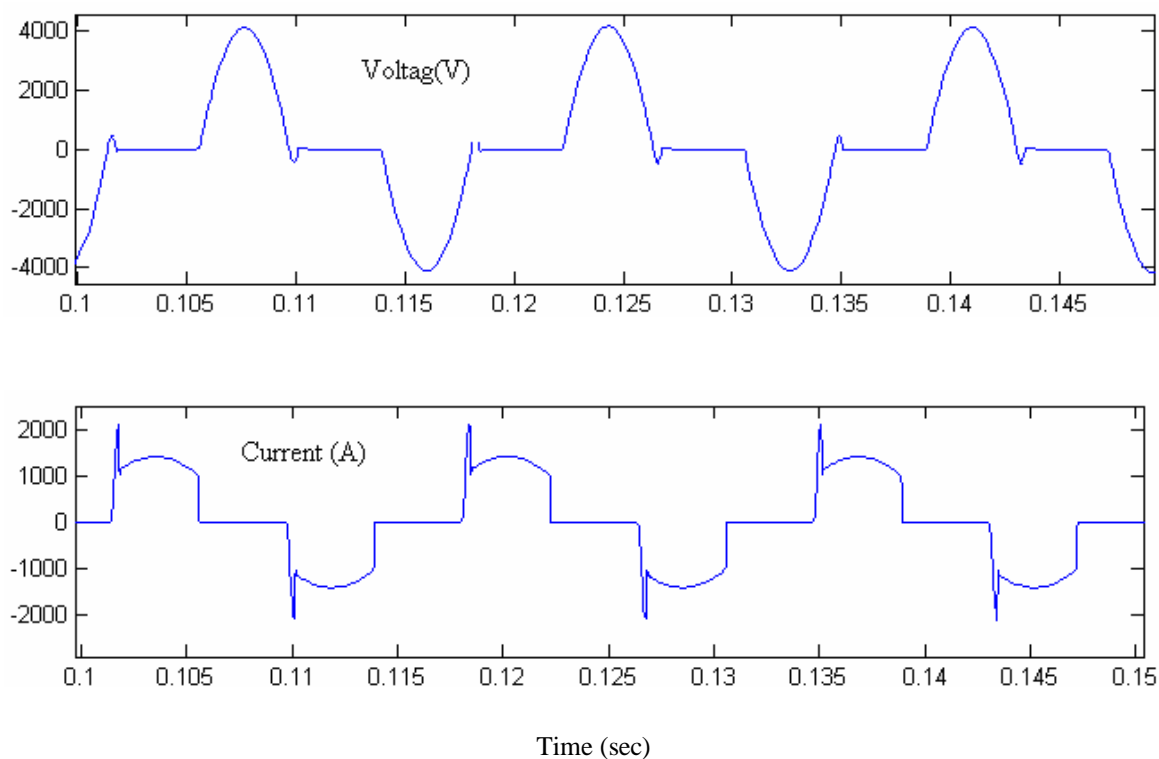
این شکل مدار داخلی بلوک GCSC است. این شکل شامل دو عدد GTO است که بصورت معکوس موازی شده اند. هر یک از این GTO ها دارای مدار اسنابری مطابق شکل هستند. مدار اسنابر شامل یک شاخه دیود-مقاومت است که با یک سلف موازی شده اند. سلف کنترل di/dt و شاخه دیود-مقاومت کار دشارژ سلف را بر عهده دارد.

GTO در هر نیم سیکل روشن و خاموش می شود و در هر دو لحظه خاموش و روشن شدن دیود بایاس مستقیم شده و انرژی ذخیره شده در سلف را تلف میکند.

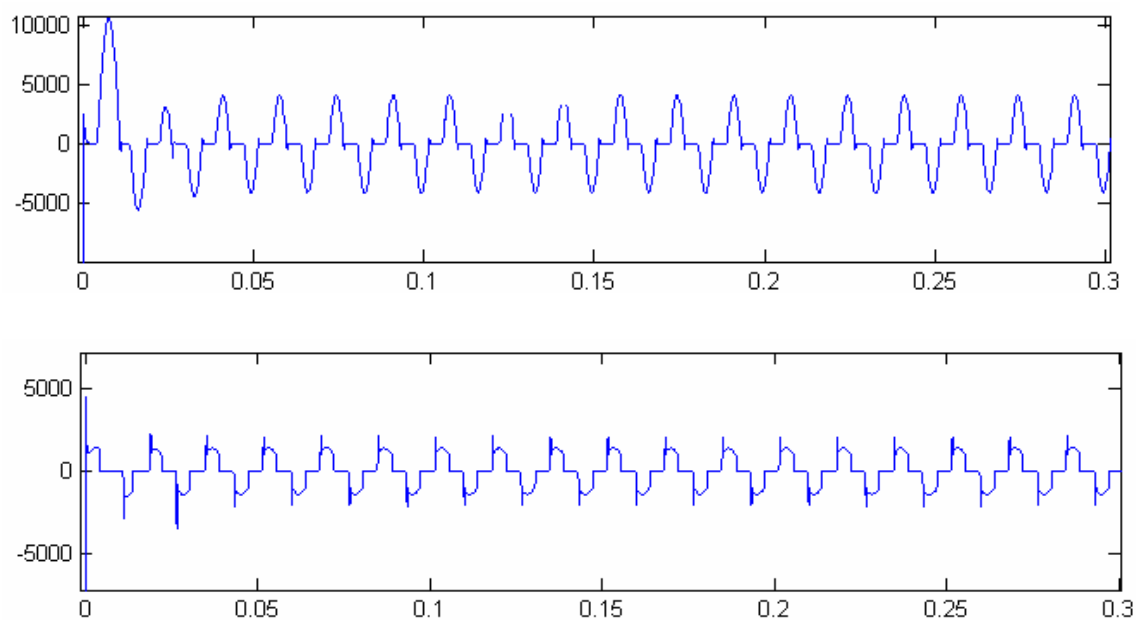
دو بلوک دیگر با نامهای 2و3 وظیفه تولید پالس را برای هر یک از GTO ها دارند. سایر بلوکهایی که در شکل دیده میشوند برای نشان دادن شکل موجهای مدار است. در ورودی مدار نیز یک آمپر متر قرار داده شده است. شکل موج جریان خط با استفاده از بلوک C به دو بلوک 2و3 انتقال میدهم.



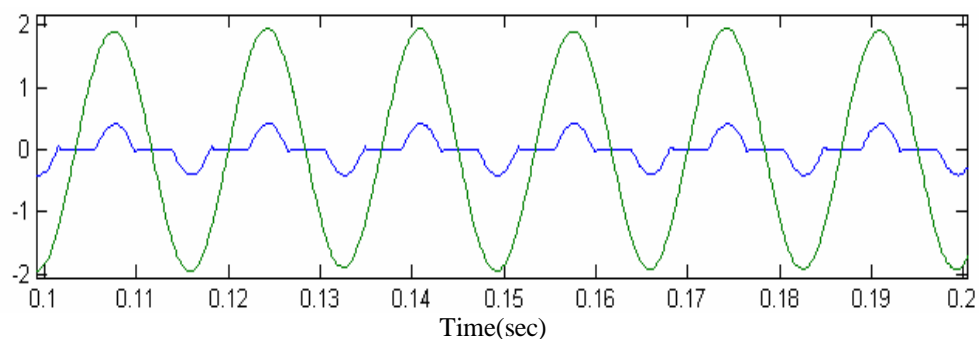
شکل (1) مدار جبران ساز سری خازنی (GCSC)



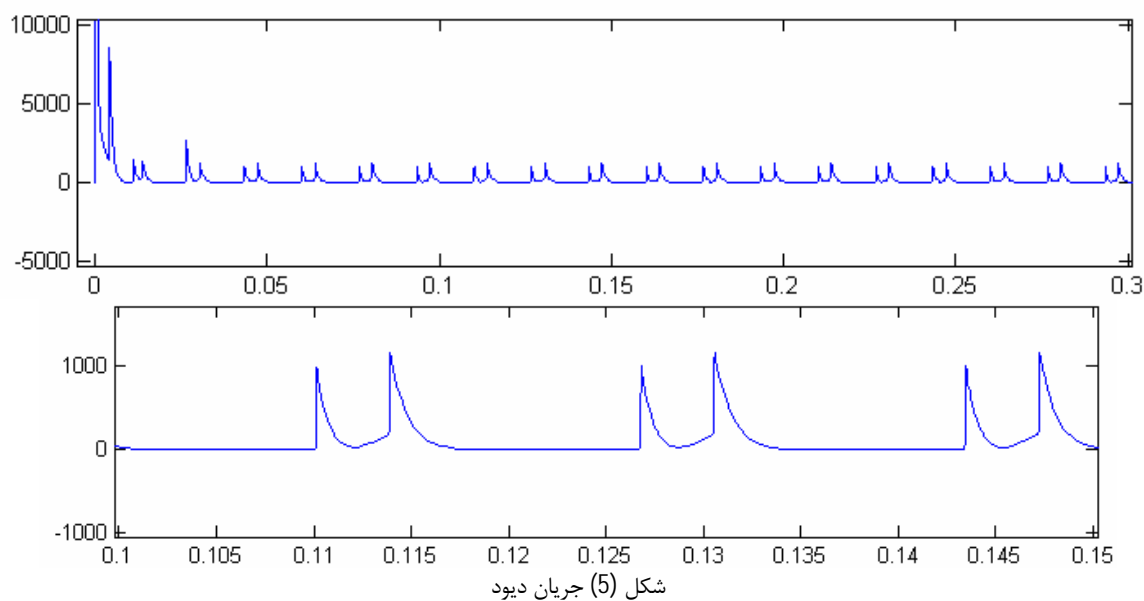
شکل (2) ولتاژ خازن کنترل شده و جریان سویچ GTO



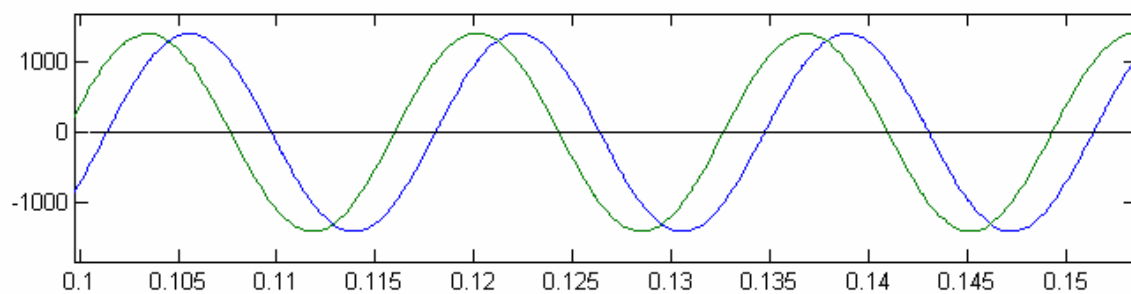
Time (sec)
شکل (3) ولتاژ خازن کنترل شده و جریان سویچ GTO

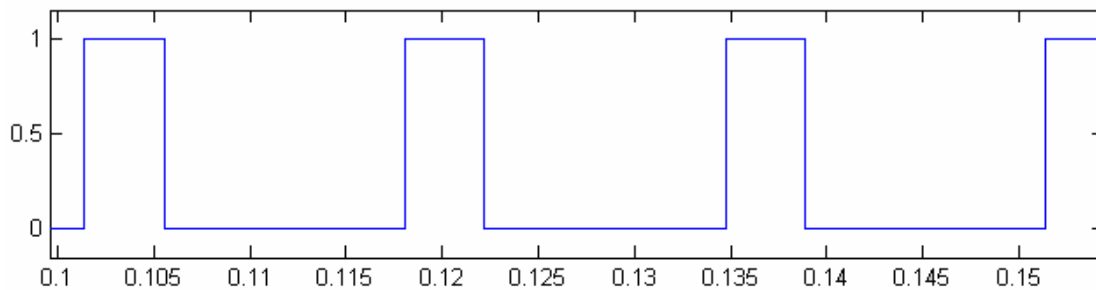


شکل (4) جریان خازن در دو حالت با کنترل و بدون کنترل



شکل (5) جریان دیود





شکل (6) پالس تولید شده با استفاده از شکل موج تاخیر یافته

[4] Understanding FACTS , by Hingorani and Gyugyi

[5] Z.Xueqiang , Study of TCSC Model and Prospective Application in the power systems of china . IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive System , PEDS'99,july 1999, Hong Kong

[6] M. Noroozian , Improving Power Sestem Dynamics By Series Connected FACTS DevicesIEEE Trans.on Power Delivery, Vol.12,No.4,October 1997

[7] Luiz .A.C Lopes and Geza Joos , Pulse Width Modulated Capacitor for Series Compensation.IEEE Trans.on Power Electronics, Vol.16,No.2,March 2001

7 - نتیجه گیری

این مطالعه نشان داده که GCSC میتواند بطور موثر برای تولید جبران سازی دائم و سریع در امپدانس خط مورد استفاده قرار گیرد . یک سویچینگ سریع و موثر که توسط GTO در هر نیم سیکل ایجاد میشود به مدول اجازه بای پس یا ورود مجدد سریع با هیچگونه محدودیت واقعی در هیچیک از وظایف معین را نمی دهد . از همه مهمتر ، در خلال مدتی که GTO روشن و خاموش میشود در گذر از صفر ولتاژ ، مسایل نوسانی در همه مدل های معمولی بطور کامل حذف شده است . مدار اسنابر یکی از اجزاء بسیار مهم از مدول جبران ساز سری پس از رشد کیفیت عملکرد GTO ها است . حذف نوسانات گذرای حالت روشن و تلفات آن همچنین از مزایای اسنابر توسعه یافته است.

سپاسگزاری

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر طرفدار حق به واسطه راهنمایی و کمکشان در تهیه این مقاله کمال تشکر و امتنان را دارم.

مراجع

[1] پایداری سیستم های قدرت ، پروفیسور پرابها شانکار کندور

[2] کنترل قدرت راکتیو ، میلر (MILER)

[3] M. Mardani nejad , GTO Thyristor

Controlled Series Capacitor Switch Performance .
IEEE Trans.on Power
Delivery, Vol.13,No.2,April 1998