



ژنراتور پالس ولتاژ بالا بر مبنای مدار ژنراتور مارکس با استفاده از دیود-خازن و زمان صعود بسیار سریع

احمد مرادی^۱، سید محمد حسن حسینی^۲

^۱ مربی گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، St_ahmad_moradi@azad.ac.ir

^۲ استاد گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلام واحد تهران جنوب، smhh110@yahoo.com

چکیده

در سال های اخیر همزمان با پیشرفت های صورت گرفته در حوزه نیمه هادی ها و افزایش سطح توان کلید های حالت جامد، توپولوژی های مختلفی از ژنراتور های مارکس حالت جامد و مدارات ضرب کننده ولتاژ معرفی شده اند. اما بزرگترین مشکل مولد های توان پالسی حالت جامد، با توجه به سطح ولتاژ و جریان کلید های نیمه هادی، کم بودن دامنه پالس های تولید شده توسط این نوع مولد ها می باشد. در این مقاله طرح جدیدی به منظور تولید پالس های ولتاژ بالا با زمان صعود بسیار سریع، به عنوان یک جایگزین مناسب برای ژنراتور مارکس، پیشنهاد گردیده است. در این طرح از ترکیب کلید اسپارک گپ و مدار ضرب کننده ولتاژ دیود خازن استفاده گردیده است. تایید صحت طرح پیشنهادی نیز از طریق شبیه سازی در محیط MATLAB SIMULINK صورت گرفته است.

واژه های کلیدی: توان پالسی، ژنراتور مارکس، ضرب کننده ولتاژ دیود خازن

1. مقدمه

امروزه استفاده از پالس‌هایی با دامنه زیاد، پهنای پالس کوچک، و در نتیجه سطح توان بالا، در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی و صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. نیاز به استفاده از توان‌های بالا در حوزه‌های مختلف، موجب شکل‌گیری و توسعه فناوری توان پالسی گردیده است. با وجود پیشرفته بودن فناوری تولید پالس‌های با توان بالا، اصول اولیه حاکم بر این فناوری بسیار ساده است. ایده اصلی مبتنی بر جمع‌آوری و ذخیره‌سازی موقت انرژی و سپس آزادسازی ناگهانی و شکل‌دهی پالس‌هایی با توان بالا و در نهایت انتقال و تخلیه انرژی به صورت پالسی بر روی بار مورد نظر می‌باشد. (بلوم) با توجه به افزایش روزافزون کاربرد توان پالسی در زمینه‌های مختلف نظامی، پزشکی و صنعتی تحقیقات گسترده‌ای پیرامون تولید پالس‌های توان بالا صورت گرفته است. تحقیقات صورت گرفته در زمینه توان پالسی منجر به ارائه روش‌های متعددی جهت تولید پالس‌هایی با توان بالا گردیده است. مهمترین و پرکاربردترین مولد توان پالسی عبارتند از فشردن سازه پالس مغناطیسی، ژنراتور مارکس، خطوط شکل‌دهی پالس و شبکه‌های شکل‌دهی پالس که در این میان ژنراتور مارکس به دلیل ساختار ساده‌اش بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

اساس عملکرد ژنراتور مارکس بر مبنای شارژ موازی تعدادی خازن و تخلیه ناگهانی آن‌ها به صورت سری می‌باشد. این ایده برای اولین بار توسط اروین مارکس در سال 1923 مطرح گردید. و پس از آن توپولوژی‌های مختلفی مانند ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی و ژنراتور مارکس LC معرفی گردیدند. در ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی نیمی از خازن‌ها با ولتاژ مثبت و نیمی دیگر با ولتاژ منفی شارژ می‌گردند. در این ساختار تعداد کلیدها در مقایسه با ژنراتور مارکس کلاسیک به نصف کاهش یافته است که این امر موجب کاهش امپدانس و اندوکتانس ناشی از کلیدها و در نتیجه کاهش زمان صعود و افزایش بازده انتقال انرژی می‌گردد. ژنراتور مارکس LC در مقایسه با ژنراتورهای مارکس کلاسیک و مارکس با ساختار شارژ دو قطبی از اندوکتانس و امپدانس کم‌تری برخوردار می‌باشد. زیرا اندوکتانس و امپدانس ناشی از کلیدهای مورد استفاده در این ساختار در هنگام تولید پالس خارج از مدار تخلیه قرار می‌گیرند. با این حال استفاده از ژنراتور مارکس LC در عمل مورد توجه چندانی قرار نمی‌گیرد، چرا که استفاده از القاگرهای بزرگ در ساختار ژنراتور مارکس LC به منظور معکوس نمودن پلاریته خازن‌ها در هنگام تخلیه، علاوه بر افزایش تلفات و کاهش بازده موجب افزایش پیچیدگی‌های مربوط به طراحی و هزینه ساخت می‌گردد. همچنین کوچکترین ناهماهنگی در بسته شدن کلیدهای مدار تخلیه رزونانسی، موجب ایجاد ولتاژهای بسیار بزرگ در برخی از طبقات و تخریب شکل پالس خروجی می‌شود.

از طرف دیگر پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه نیمه‌هادی‌ها و افزایش سطح توان کلیدهای حالت جامد در دهه‌های گذشته موجب گردیده است که محققین به فکر استفاده از کلیدهای حالت جامد در ساختار مولد توان پالسی به جای کلیدهای رایج نظیر اسپارک‌گپ‌ها بیافتند. با افزایش سطح توان کلیدهای حالت جامد این کلیدها در ساختار ژنراتور مارکس مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج استفاده از کلیدهای حالت جامد در مولد توان پالسی عبارت بودند از فشردگی و قابلیت حمل آسان، تولید پالس با نرخ تکرار بالا و زمان صعود سریع، داشتن خروجی منعطف و طول عمر بیشتر. این مزایا موجب توجه بیشتر محققین به این موضوع و ارائه توپولوژی‌های مختلفی از مولد توان پالسی بر مبنای کلیدهای حالت جامد گردید. پس از گشایش این مسیر جدید در حوزه تحقیقات توان پالسی و معرفی توپولوژی‌های گوناگون بر مبنای کلیدهای حالت جامد ایده استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به عنوان مولد توان پالسی مطرح شد.

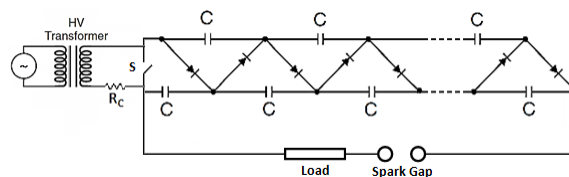
یکی از مبدل‌هایی که می‌تواند نقش مولد توان پالسی را ایفا کند مدار ضرب کننده ی ولتاژ دیود خازن می‌باشد. مدار CDVM یک مبدل پله ای AC-DC است که می‌تواند یک ولتاژ AC کوچک را تبدیل به یک ولتاژ DC بزرگ بنماید. به طور کلی مدارات CDVM پایه از دو زنجیره خازنی که توسط تعدادی دیود به یک دیگر متصل شده اند تشکیل می‌گردند. با توجه به سری یا موازی بودن خازن‌ها در هر زنجیره مدارهای CDVM پایه به سه دسته PPVM و SPVM و SSVM تقسیم می‌شوند که مدار SSVM پایه نسبت به سایر توپولوژی‌های مدارات ضرب کننده ولتاژ دیود خازن تعداد کلید کم‌تری دارد و همچنین ولتاژ دو سر دیودها و خازن‌ها در این ساختار از پراکندگی کم‌تری برخوردار می‌باشد. مدارات CDVM پایه معمولاً

به دو صورت مورد بهره برداری قرار می گیرند. در حالت اول خروجی از یک خازن تکی گرفته می شود و در حالت دوم خروجی مدار از یک دسته خازن سری گرفته می شود. حالت اول برای ایجاد یک جریان بالا با ولتاژ پایین تر و حالت دوم برای ایجاد یک ولتاژ بالا تر با جریان پایین مشابه عملکرد ژنراتور مارکس مورد استفاده قرار می گیرد. می توان با اضافه کردن تعدادی کلید به مدارات CDVM پایه، و کنترل زمان روشن و خاموش بودن این کلید ها توپولوژی های مختلفی از مولد های توان پالسی بر مبنای مدارات CDVM ایجاد نمود [1].

در رابطه با توسعه مولد های توان پالسی چالش های متعددی نظیر افزایش دامنه ولتاژ، کاهش پهنای پالس و زمان صعود، افزایش نرخ تکرار، افزایش بازده، افزایش قابلیت اطمینان، افزایش طول عمر، فشرده سازی و کاهش هزینه ها مطرح گردیده اند. با توجه به این موضوع که برخی از چالش های مطرح شده در تضاد کامل با یکدیگر می باشند، امکان دستیابی به تمام اهداف بصورت همزمان وجود ندارد، در نتیجه با در نظر گرفتن اهداف اصلی یک طرح برخی از چالش ها مورد توجه بیش تری قرار می گیرند. در رابطه با کاهش زمان صعود پالس به طور کلی می توان گفت زمان صعود پالس دارای نسبت معکوس با اندوکتانس معادل مدار تولید پالس می باشد. لذا یکی از راه های کم کردن زمان صعود پالس استفاده از خازن ها و کلید های دارای اندوکتانس پایین می باشد. از آنجایی که ساخت خازن ها و کلید های با اندوکتانس پایین دارای محدودیت است از روش های دیگری جهت کم کردن زمان صعود پالس استفاده می شود. استفاده از خازن و کلید پیکینگ در خروجی ژنراتور مارکس یکی از روش هایی است که در صورت طراحی دقیق و کلید زنی مناسب با زمانبندی بسیار دقیق زمان صعود پالس را به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. اما در عمل به دلیل پیچیدگی های موجود در مراحل طراحی و ساخت و همچنین دشوار بودن کلید زنی با زمانبندی بسیار دقیق، نتایج بدست آمده در نمونه های کاربردی اختلاف بسیاری با نتایج تئوری دارند [2].

خصوصیات منحصر بفرد کلید های حالت جامد منجر به بهبود برخی از ویژگی های مولد های توان پالسی نظیر فشرده سازی خروجی، منقطع افزایش نرخ تکرار کاهش زمان صعود و طول عمر بیشتر گردیده است. اما بزرگترین مشکل مولد های توان پالسی حالت جامد که در ساختار آن ها از کلید های نیمه هادی استفاده شده است کم بودن دامنه پالس های خروجی می باشد. با توجه به سطح ولتاژ و جریان کلید های نیمه هادی، دامنه و توان پالس های تولید شده توسط مولد های حالت جامد به هیچ عنوان قابل مقایسه با مولد های توان پالسی کلاسیک که از کلید های توان بالا نظیر اسپارک گپ ها استفاده می کنند نمی باشد [3].

در این مقاله طرح جدیدی به منظور تولید پالس های ولتاژ بالا با زمان صعود بسیار سریع پیشنهاد گردیده است. در این طرح از یک مدار SSVM پایه به همراه کلید اسپارک گپ به عنوان جایگزین ژنراتور مارکس استفاده گردیده است. خازن ها در مدار SSVM بر خلاف ژنراتور مارکس که در ابتدا به صورت موازی شارژ و سپس از طریق تعدادی کلید به صورت سری تخلیه می شوند از همان ابتدا به صورت سری در کنار یکدیگر قرار گرفته اند و با توجه به نحوه چیدمان شبکه دیود خازن تا سطح ولتاژ مورد نظر شارژ می گردند. در نتیجه در این ساختار با حذف کلید های مورد نیاز برای اتصال خازن ها به صورت سری و با حذف اندوکتانس و امپدانس ناشی از این کلید ها علاوه بر کاهش زمان صعود پالس و افزایش پیک پالس، بازده سیستم نیز بهبود پیدا می کند. از طرف دیگر دامنه ولتاژ مورد نیاز برای شارژ خازن های مدار SSVM نصف دامنه ولتاژ مورد نیاز برای شارژ خازن های ژنراتور مارکس تا یک سطح ولتاژ یکسان می باشد و همچنین به دلیل شارژ خازن های مدار SSVM از طریق ولتاژ AC نیاز به استفاده از منبع تغذیه DC جهت شارژ خازن ها حذف می گردد. نمای کلی مدار پیشنهادی در شکل (1) نمایش داده شده است. صحت طرح پیشنهادی نیز از طریق شبیه سازی در محیط MATLAB SIMULINK تایید گردیده است [4-5].



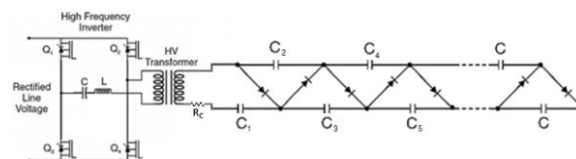
شکل (1): نمای کلی طرح پیشنهادی

2. ژنراتور پالس ولتاژ بالا بر مبنای مدار SSVM

در مدار نمایش داده شده در شکل (1) می توان با استفاده از یک منبع تغذیه AC با دامنه V خازن های مدار را تا سطح $2V$ شارژ نمود. مقاومت R_c به منظور محدود کردن جریان شارژ مورد استفاده قرار گرفته است. افزایش فرکانس منبع تغذیه AC موجب کاهش زمان مورد نیاز جهت شارژ خازن ها می گردد. با استفاده از یک مبدل رزونانسی می توان یک ولتاژ AC با فرکانس بالا جهت شارژ خازن های مدار SSVM فراهم نمود. مزیت اصلی استفاده از مبدل رزونانسی، کاهش تلفات کلید زنی بخش متناوب ساز با استفاده از پروسه کلید زنی نرم از طریق کلید زنی در جریان صفر و کلید زنی در ولتاژ صفر می باشد. پس از شارژ کامل خازن ها و با تریگر شدن کلید اسپارک گپ همزمان با بسته شدن کلید انرژی ذخیره شده در خازن ها بصورت پالسی بر روی بار تخلیه می گردد. کلید S که قبل از تریگر کردن اسپارک گپ بسته می شود وظیفه حفاظت از منبع تغذیه به هنگام تخلیه مدار SSVM را بر عهده دارد [6-7].

1.2. عملکرد مدار SSVM در مرحله شارژ

بهترین روش برای شارژ خازن های ذخیره کننده انرژی به عنوان مثال خازن های یک ژنراتور مارکس استفاده از مبدل DC-DC رزونانسی به عنوان یک منبع تغذیه می باشد. در این روش، جریان شارژ از طریق کنترل فرکانس کلید زنی قسمت متناوب ساز کنترل می گردد. همزمان با بیشتر شدن میزان شارژ خازن، فرکانس کلید زنی نیز افزایش می یابد. در نتیجه با افزایش میانگین ولتاژ خروجی، جریان شارژ تقریباً ثابت باقی می ماند. استفاده از روش شارژ با جریان ثابت موجب کوتاه تر شدن زمان شارژ می گردد. مزیت اصلی استفاده از مبدل DC-DC رزونانسی، کاهش تلفات کلید زنی بخش متناوب ساز با استفاده از پروسه کلید زنی نرم از طریق کلید زنی در جریان صفر و کلید زنی در ولتاژ صفر می باشد. اما شارژ خازن های مدار SSVM از طریق یک ولتاژ AC صورت می گیرد و افزایش فرکانس ولتاژ منبع تغذیه موجب کاهش زمان شارژ می گردد. برای تامین یک ولتاژ AC با فرکانس بالا می توان از یک مبدل DC-DC رزونانسی که بخش یکسوساز خروجی آن حذف شده است استفاده نمود. با استفاده از یک ولتاژ AC با دامنه V می توان خازن های مدار SSVM را تا سطح $2V$ شارژ نمود [8].



شکل (2): شارژ مدار SSVM با استفاده از مبدل رزونانسی

در طرح نمایش داده شده در شکل (2) اولین خازن زنجیره پایین تا سطح ولتاژ منبع تغذیه و سایر خازن ها تا دو برابر سطح ولتاژ منبع تغذیه شارژ می گردند. برای تنظیم فرکانس کلید زنی در بخش متناوب ساز منبع تغذیه دو رویکرد فرکانس ثابت و فرکانس متغیر وجود دارد. در رویکرد اول فرکانس کلید زنی با توجه به محدودیت جریان قابل تامین توسط منبع تغذیه انتخاب می گردد و در نتیجه با افزایش شارژ خازن ها مقدار جریان شارژ کاهش می یابد. اما در رویکرد دوم با کنترل فرکانس کلید زنی و افزایش آن در طول شارژ خازن ها جریان شارژ تقریباً ثابت نگه داشته می شود و در نتیجه زمان مورد نیاز برای شارژ کامل خازن ها کاهش می یابد [9-10].

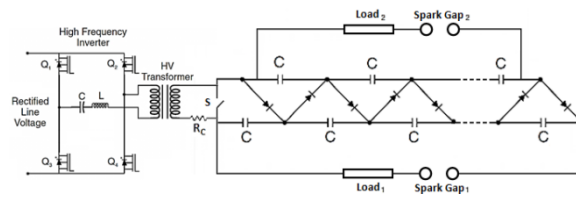
نحوه شارژ شدن خازن های مدار SSVM را می توان با توجه به تغییرات پتانسیل گره های مدار نمایش داده شده در شکل (2) توضیح داد. با این فرض که توان خروجی منبع تغذیه برای شارژ خازن C_1 تا سطح ولتاژ $+V$ در ربع سیکل اول به اندازه ی کافی بزرگ باشد در ربع سیکل اول پتانسیل تمام گره ها به سطح ولتاژ $+V$ می رسد. با توجه به اختلاف پتانسیل ایجاد شده در دو سر هر خازن تنها خازن C_1 شروع به شارژ شدن می نماید. همزمان با شروع کاهش دامنه ولتاژ منبع AC تا زمان رسیدن به پایین ترین سطح طی ربع سیکل های دوم و سوم، به دلیل اختلاف پتانسیل ایجاد شده، خازن C_1 به طور کامل در خازن C_2 تخلیه می گردد. طی ربع سیکل چهارم با افزایش دامنه ولتاژ منبع AC از مقدار $-V$ ، انرژی ذخیره شده در خازن C_2 به خازن های C_1 و C_3 منتقل می شود. با شروع سیکل بعدی طی ربع سیکل اول، مجدداً خازن C_1 تا سطح ولتاژ $+V$ شارژ شده و سپس انرژی ذخیره شده از خازن C_1 به خازن C_2 ، و به طور همزمان از خازن C_3 به خازن C_4 انتقال می یابد. با آغاز ربع سیکل چهارم، انرژی ذخیره شده در خازن C_2 به خازن های C_1 و C_3 و انرژی ذخیره شده در خازن C_4 به خازن C_5 منتقل می شود. با ادامه این روند تمام خازن ها طی چند سیکل به صورت کامل شارژ می گردند. به طور کلی می توان گفت در هر سیکل طی ربع سیکل اول، خازن C_1 تا سطح ولتاژ $+V$ شارژ شده و طی ربع سیکل های دوم و سوم، انرژی ذخیره شده در خازن های زنجیره پایین به خازن های زنجیره بالا منتقل می شود. سپس در ربع سیکل چهارم، بخشی از انرژی ذخیره شده در خازن های زنجیره بالا، به خازن های زنجیره پایین منتقل شده و در میان خازن های این زنجیره توزیع می گردد. در نتیجه طی هر سیکل، میزان شارژ خازن های مدار افزایش پیدا می کند. پس از شارژ کامل مدار، دامنه ولتاژ خازن C_1 به سطح ولتاژ $+V$ و دامنه ولتاژ سایر خازن ها به سطح ولتاژ $+2V$ می رسد.

2.2. عملکرد مدار SSVM در مرحله تخلیه

پس از شارژ کامل خازن ها و با تریگر شدن کلید اسپارک گپ همزمان با بسته شدن کلید انرژی ذخیره شده در خازن ها بصورت پالسی بر روی بار تخلیه می گردد. مدار معادل تخلیه SSVM را بطور تقریبی می توان بصورت دو مدار RLC سری که بصورت همزمان و به طور موازی بر روی بار تخلیه می شوند در نظر گرفت. حد اکثر دامنه ولتاژ پالس ایجاد شده برابر با مجموع ولتاژ خازن های زنجیره پایین بوده و جریان عبوری از بار نیز برابر با مجموع جریان های تخلیه شده از خازن های زنجیره بالا و خازن های زنجیره پایین می باشد [11-12].

3. طرح پیشنهادی برای تغذیه دو بار بصورت مستقل

در سیستم های توان پالسی با توان بسیار بالا، معمولاً از چند مولد توان پالسی مانند ژنراتور مارکس برای شارژ چند خازن ذخیره ساز واسط و یا چند خط شکل دهی پالس بصورت همزمان استفاده می گردد. مدار SSVM قابلیت تغذیه همزمان دو بار مجزا و یا شارژ همزمان دو بخش ذخیره ساز انرژی واسط را دارا می باشد. همانطور که در شکل 3 مشاهده می گردد می توان انرژی ذخیره شده در خازن های زنجیره بالا و خازن های زنجیره پایین یک مدار SSVM را به صورت همزمان بر روی دو بار مستقل به صورت پالسی تخلیه نمود. در این طرح در مرحله تخلیه با تریگر شدن همزمان کلید های اسپارک گپ خازن های زنجیره بالا و خازن های زنجیره پایین به صورت جداگانه بر روی بار های شماره 1 و شماره 2 تخلیه می گردند. در این حالت مدار SSVM را می توان به صورت دو مدار RLC سری مستقل که به صورت همزمان بر روی دو بار مجزا تخلیه می گردند معادل سازی نمود.



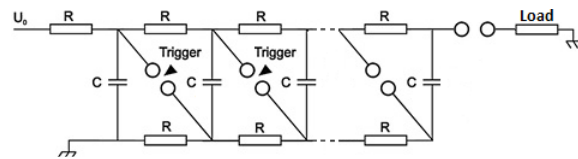
شکل (3): طرح پیشنهادی بمنظور تغذیه همزمان دو بار مستقل

4. شبیه سازی

برای اثبات مزیت های مدار پیشنهادی نسبت به ژنراتور مارکس از شبیه سازی در محیط MATLAB SIMULINK استفاده شده است. در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی یک ژنراتور مارکس کلاسیک و یک ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی با نتایج حاصل از شبیه سازی طرح پیشنهادی مقایسه گردیده اند. برای مقایسه صحیح نتایج بدست آمده شبیه سازی ها تحت شرایط یکسان صورت گرفته است. در تمام شبیه سازی ها ابتدا حدود $0.5KJ$ انرژی ذخیره گردیده و سپس به صورت پالسی با پیک ولتاژ کمتر از $100KV$ بر روی یک بار 10 اهمی تخلیه گردیده است. برای انجام شبیه سازی ها از اطلاعات خازن های سری S ساخته شده توسط شرکت General Atomics استفاده شده است. خازن شماره 31158 با ظرفیت $1\mu F$ و خازن شماره 31150 با ظرفیت $0.5\mu F$. ولتاژ نامی خازن ها $40KV$ و اندوکتانس آن ها $20nH$ می باشد. مقدار مقاومت صفحات و اتصالات خازن ها نیز برابر با 0.1Ω در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی شارژ خازن ها از اطلاعات منبع تغذیه سری 402 شرکت TDK که یک منبع تغذیه DC با توان خروجی $4KJ/Sec$ یا $4KW$ و ولتاژ خروجی $50KV - 1KV$ می باشد استفاده گردیده است. برای شبیه سازی کلید ها نیز از اطلاعات مربوط به اسپارک گپ های تریگر شونده ساخت شرکت Excelitas Technologies استفاده شده است. اسپارک گپ GP-46B با رنج ولتاژ کاری $20KV - 8KV$ و ولتاژ شکست استاتیکی $25KV$ و اندوکتانس $15nH$ و اسپارک گپ GP-74B با رنج ولتاژ کاری $100KV - 40KV$ و ولتاژ شکست استاتیکی $120KV$ و اندوکتانس $30nH$. مقاومت هدایت اسپارک گپ ها نیز برابر با 0.05Ω در نظر گرفته شده است. در یک ژنراتور مارکس با در نظر گرفتن اندوکتانس بخش های مختلف می توان مدار تخلیه را به صورت یک مدار RLC سری مورد بررسی قرار داد. بر اساس معادلات مدار RLC سری شکل موج جریان با توجه به مقادیر مختلف پارامتر ها می تواند نوسانی یا غیر نوسانی باشد. در صورتی که مقدار R از $2\sqrt{L/C}$ بزرگتر باشد شکل موج جریان غیر نوسانی بوده و زمان صعود بصورت تقریبی از رابطه $t_r \approx 2.3L/R$ بدست می آید.

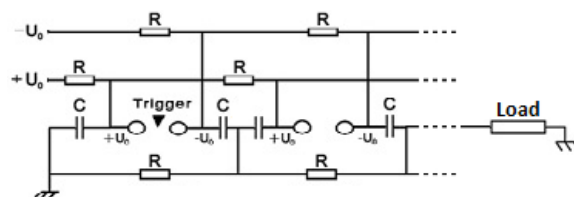
1.4. مارکس کلاسیک و مارکس دو قطبی

برای شبیه سازی ژنراتور مارکس کلاسیک که طرح کلی آن در شکل (4) نمایش داده شده است از $10\mu F$ و 10 اسپارک گپ GP-46B استفاده گردیده است. پس از شارژ خازن ها توسط منبع تغذیه DC تا سطح ولتاژ $10KV$ اختلاف پتانسیل دو سر تمامی اسپارک گپ ها به سطح ولتاژ $10KV$ می رسد. با تریگر کردن اولین اسپارک گپ و وصل شدن آن اختلاف پتانسیل اسپارک گپ بعدی به $20KV$ افزایش می یابد. با تریگر کردن این اسپارک گپ و وصل شدن آن اختلاف پتانسیل کلید بعدی تا سطح $30KV$ افزایش می یابد و با عبور از سطح پتانسیل شکست استاتیکی سایر اسپارک گپ ها بدون نیاز به تریگر خارجی وصل می شوند. در نهایت پس از وصل شدن تمامی اسپارک گپ ها پالسی با پیک ولتاژ $79.9KV$ و پیک جریان $7.99KA$ با زمان صعود $54n.Sec$ و پهنای پالس $900n.Sec$ بر روی بار 10 اهمی تخلیه می گردد. راندمان انتقال انرژی ذخیره شده به بار نیز تقریباً برابر با 86% می باشد.



شکل (4): نمای کلی ژنراتور مارکس کلاسیک

برای شبیه سازی ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی که طرح کلی آن در شکل (5) نمایش داده شده است از 10 خازن $1\mu F$ و 5 اسپارک گپ GP-46B استفاده شده است. در این ساختار با استفاده از دو منبع تغذیه DC مستقل نیمی از خازن ها تا سطح ولتاژ $+10KV$ و نیمی دیگر تا سطح ولتاژ $-10KV$ شارژ می گردند. پس از شارژ خازن ها اختلاف پتانسیل دو سر تمامی اسپارک گپ ها به سطح ولتاژ $20KV$ می رسد. با تریگر کردن اولین اسپارک گپ و وصل شدن آن اختلاف پتانسیل اسپارک گپ بعدی به $30KV$ افزایش می یابد. در نتیجه سایر اسپارک گپ ها بدون نیاز به تریگر خارجی وصل می شوند. در ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی با نصف شدن تعداد کلید های مورد نیاز و در نتیجه نصف شدن اندوکتانس و مقاومت هدایت مربوط به کلید ها انتظار می رود که علاوه بر افزایش راندمان انتقال انرژی به بار و افزایش پیک ولتاژ زمان صعود پالس نیز کاهش یابد. با وصل شدن تمامی اسپارک گپ ها پالسی با پیک ولتاژ $83.3KV$ و پیک جریان $8.33KA$ با زمان صعود $45n.Sec$ و پهنای پالس $870n.Sec$ بر روی بار 10 اهمی تخلیه می گردد. راندمان انتقال انرژی ذخیره شده به بار نیز تقریباً برابر با 89% می باشد.

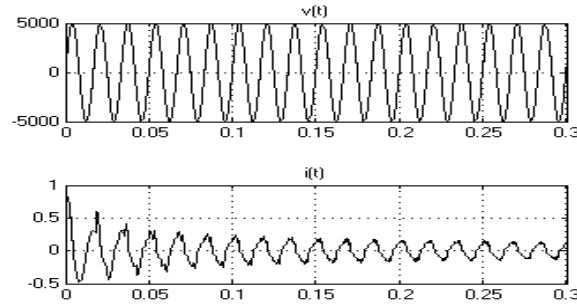


شکل (5): نمای کلی ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی

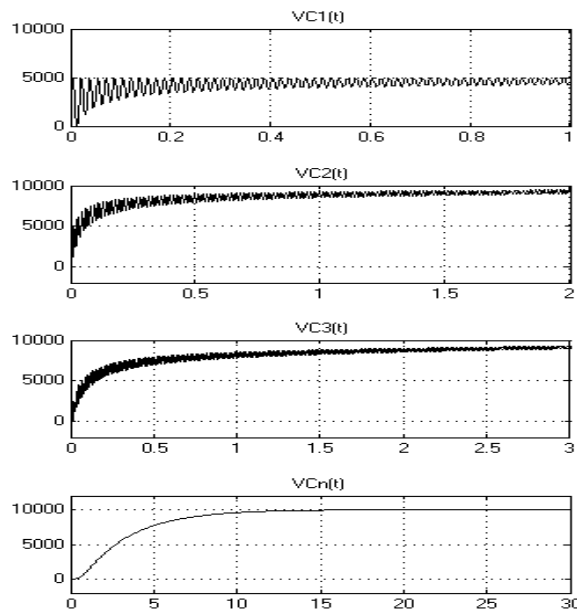
هر دو ژنراتور شبیه سازی شده مارکس کلاسیک و مارکس با ساختار شارژ دو قطبی در مرحله شارژ $0.5KJ$ انرژی در خازن های خود ذخیره می نمایند و این انرژی ذخیره شده را بصورت پالسی با پیک ولتاژ کم تر از $100KV$ بر روی بار 10 اهمی تخلیه می کنند. برای مقایسه صحیح نتایج حاصل از شبیه سازی ها مدار SSVM باید طوری طراحی گردد که انرژی ذخیره شده در خازن های آن در مرحله شارژ و پیک ولتاژ پالس ایجاد شده توسط آن مشابه با ژنراتور های مارکس کلاسیک و مارکس با ساختار شارژ دو قطبی شبیه سازی شده باشد.

2.4. طرح پیشنهادی

برای شبیه سازی مدار SSVM نمایش داده شده در شکل (1) از 10 خازن $0.5\mu F$ برای زنجیره خازنی بالایی و از 11 خازن $0.5\mu F$ برای زنجیره ی خازنی پایینی استفاده شده است. برای محدود کردن جریان شارژ به زیر 0.8 آمپر از یک مقاومت یک کیلو اهمی در خروجی منبع تغذیه استفاده شده است. شارژ خازن های مدار SSVM با استفاده از یک ولتاژ AC با دامنه $5KV$ و فرکانس ثابت $60Hz$ در کمتر از 30 ثانیه انجام می پذیرد.

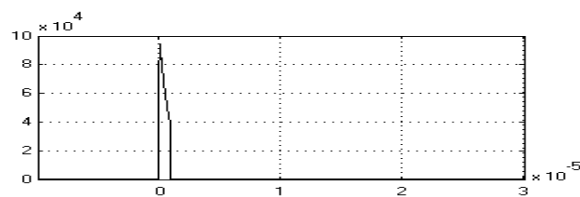


شکل (6): منحنی ولتاژ و جریان منبع تغذیه متناوب با فرکانس ثابت



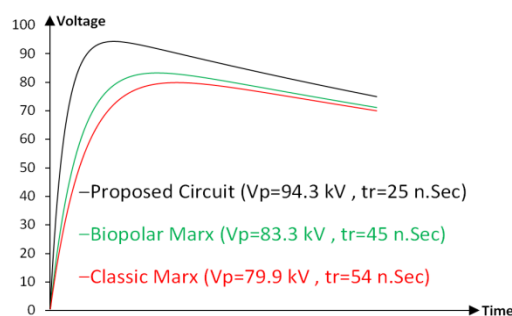
شکل (7): منحنی ولتاژ تعدادی از خازن های مدار SSVM در طول

بنابراین، اولین خازن زنجیره پایین تا سطح $5KV$ و سایر خازن ها تا سطح $10KV$ شارژ می گردند. در نتیجه تقریباً مقدار $0.506KJ$ انرژی در خازن های مدار SSVM شبیه سازی شده ذخیره گردیده است. همچنین می توان با استفاده از کنترل فرکانس منبع تغذیه، جریان منبع را در طول شارژ در محدوده مجاز ثابت نگاه داشت و در نتیجه زمان مورد نیاز برای شارژ کامل خازن های مدار SSVM را کاهش داد. در این حالت با توجه به عدم نیاز به مقاومت شارژ با مقدار بالا، بازده عملیات شارژ خازن ها نیز افزایش پیدا می کند. برای تخلیه مدار SSVM شبیه سازه شده بر روی بار از یک اسپارک گپ GP-74B با ولتاژ شکست استاتیکی $120KV$ استفاده شده است. پس از شارژ کامل خازن ها اختلاف پتانسیل دو سر کلید اسپارک گپ به $105KV$ می رسد. با تریگر کردن اسپارک گپ و بسته شدن کلید، پالسی با پیک ولتاژ $94.3KV$ و پیک جریان $9.43KA$ با زمان صعود $25n.Sec$ و پهنای پالس $740n.Sec$ بر روی بار 10 اهمی تخلیه می گردد. راندمان انتقال انرژی ذخیره شده به بار نیز تقریباً برابر با 96% می باشد.



شکل (8): شکل موج ولتاژ پالس ایجاد شده توسط مدار پیشنهادی

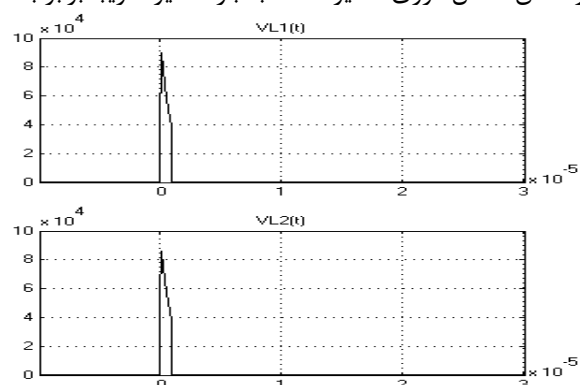
مطمئننا نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام شده با نتایج نمونه های عملی در شرایط واقعی متفاوت می باشد. اما با توجه به این موضوع که در این مقاله ژنراتور مارکس کلاسیک، ژنراتور مارکس دو قطبی و طرح پیشنهادی تحت شرایط یکسان شبیه سازی گردیده اند، در نتیجه نسبت نتایج بدست آمده حتی با در نظر گرفتن سایر پارامترها و در شرایط واقعی نیز تقریباً برقرار خواهد بود.



شکل (9): مقایسه پالس های ولتاژ تولید شده

3.4. طرح پیشنهادی برای تغذیه همزمان دو بار

برای شبیه سازی تغذیه همزمان دو بار مجزا مانند طرح نمایش داده شده در شکل (3) از 10 خازن $1\mu F$ برای زنجیره خازنی بالایی و از 11 خازن $1\mu F$ برای زنجیره ی خازنی پایینی استفاده شده است. پس از شارژ کامل خازن های مدار SSVM با استفاده از یک ولتاژ AC با دامنه $5KV$ ، مقدار انرژی در خازن های زنجیره بالا و مقدار $0.512KJ$ انرژی در خازن های زنجیره پایین ذخیره می گردد. با تریگر کردن همزمان هر دو اسپارک گپ و وصل شدن کلید ها، پالسی با پیک ولتاژ $89.6KV$ و پیک جریان $8.96KA$ با زمان صعود $42n.Sec$ و پهنای پالس $790n.Sec$ بر روی بار 10 اهمی شماره یک و پالسی با پیک ولتاژ $86.1KV$ و پیک جریان $8.61KA$ با زمان صعود $39n.Sec$ و پهنای پالس $820n.Sec$ بر روی بار 10 اهمی شماره دو تخلیه می گردد. راندمان انتقال انرژی ذخیره شده به بار ها نیز تقریباً برابر با 91% می باشد.



شکل (10): شکل موج ولتاژ پالس های ایجاد شده بر روی دو بار مستقل توسط مدار

طرح پیشنهادی بصورت همزمان

جدول (1): مقایسه طرح پیشنهادی با ژنراتور مارکس کلاسیک و ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی

پارامترهای بررسی شده	نتایج حاصل از شبیه سازی های صورت گرفته		
	ژنراتور مارکس کلاسیک	ژنراتور مارکس دو قطبی	طرح پیشنهادی
ولتاژ منبع تغذیه مورد نیاز	10KV DC	±10KV DC	5KV AC
انرژی ذخیره شده در خازن های مدار	0.5KJ	0.5KJ	0.506KJ
ولتاژ زنجیره خازنی سری	100KV	100KV	105KV
پیک ولتاژ پالس ایجاد شده بر روی بار	79.9KV	83.3KV	94.3KV
نسبت پیک ولتاژ پالس به ولتاژ زنجیره خازنی	79.9%	83.3%	90% (↑ 10.1%, ↑ 6.7%)
زمان صعود پالس	54n. Sec	45n. Sec	25n. Sec (↓ 53%, ↓ 44%)
پهنای پالس	900n. Sec	870n. Sec	740n. Sec
بازده تخلیه انرژی ذخیره شده	86%	89%	96% (↑ 10%, ↑ 7%)

۵. نتیجه گیری

در این مقاله طرحی برای تولید پالس های ولتاژ بالا با زمان صعود بسیار سریع بر مبنای مدار ضرب کننده ولتاژ دیود خازن و با استفاده از کلید اسپارک گپ ارائه گردیده است.

طرح پیشنهادی در مقایسه با ژنراتور مارکس کلاسیک و ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی دارای مزیت هایی می باشد که این طرح را تبدیل به جایگزین مناسبی برای ژنراتور مارکس می نماید. دامنه ولتاژ AC مورد نیاز برای شارژ خازن های مدار SSVM نصف دامنه ولتاژ DC مورد نیاز برای شارژ خازن های ژنراتور مارکس می باشد. به عبارت دیگر شارژ خازن های مدار SSVM بدون نیاز به منبع DC و با دامنه ولتاژ کمتر صورت می گیرد. همچنین در طرح پیشنهادی به دلیل حذف شدن کلید های مورد نیاز برای سری کردن خازن ها در هنگام تخلیه و در نتیجه کاهش اندوکتانس و مقاومت ناشی از کلید ها، علاوه بر کاهش زمان صعود پالس و افزایش پیک پالس، بازده سیستم نیز بهبود پیدا می کند. طبق نتایج شبیه سازی های صورت گرفته زمان صعود پالس طرح پیشنهادی در مقایسه با ژنراتور مارکس کلاسیک و ژنراتور مارکس با ساختار شارژ دو قطبی به ترتیب 53% و 44% درصد کاهش یافته است. و همچنین نسبت پیک ولتاژ پالس ایجاد شده به ولتاژ خازن های سری در مدار پیشنهادی در مقایسه با ژنراتور مارکس کلاسیک و ژنراتور مارکس دو قطبی به ترتیب 10.1% و 6.7% درصد افزایش یافته است. راندمان انتقال انرژی ذخیره شده به بار نیز به ترتیب 10% و 7% درصد افزایش یافته است. علاوه بر این با افزودن یک کلید اسپارک گپ اضافه به مدار طرح پیشنهادی می توان دو بار مجزا را به صورت همزمان تغذیه نمود و یا دو ذخیره ساز انرژی واسط را به صورت همزمان شارژ نمود. با توجه به مزایای ذکر شده و نتایج شبیه سازی های صورت گرفته که صحت این طرح را تایید می کنند طرح پیشنهادی می تواند جایگزین مناسبی برای ژنراتور مارکس به منظور تولید پالس هایی با ولتاژ بالا و زمان صعود بسیار سریع باشد.

6. منابع و مراجع

- [1] Zeng, W., et al.: A novel high-frequency bipolar pulsed power generator for biological applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 35(12), 12861–12870 (2020)
- [2] Zhang, S., et al.: Dry reforming of methane by microsecond pulsed dielectric barrier discharge plasma: optimizing the reactor structures. *High Volt.* 7(4), 718–729 (2022)
- [3] Zhong, Z., et al.: Review on solid-state-based Marx generators. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 49(11), 3625–3643 (2021)
- [4] Rajabi-Nezhad, A., et al.: Assessment of different compact Marx generator structures on the voltage profile. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 48(1), 189–195 (2020)
- [5] Y. S. Jin and C. Cho, “Generation of plasma activated water by a hybrid plasma source,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 47, no. 10, pp. 4588–4592, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8845777/>
- [6] S.-H. Song and H.-J. Ryoo, “Solid-state bipolar pulsed power modulator for high-efficiency production of plasma activated water,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 11, pp. 10634–10642, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9234768/>
- [7] Z. Zhao, C. Li, X. Zheng, A. Sun, and J. Li, “Periodical discharge regime transitions under long-term repetitive nanosecond pulses,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 31, no. 4, Apr. 2022, Art. no. 045005, doi: 10.1088/1361-6595/ac6050.
- [8] T. Huiskamp and J. J. Van Oorschot, “Fast pulsed power generation with a solid-state impedance-matched Marx generator: Concept, design, and first implementation,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 47, no. 9, pp. 4350–4360, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8812678>
- [9] W. A. Stygar et al., “Impedance-matched Marx generators,” *Phys. Rev. A, Gen. Phys.*, vol. 20, no. 4, pp. 15–20, 2017, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.040402.
- [10] R. Risch, A. Hu, and J. Biela, “Influence of power semiconductor device variations on pulse shape of nanosecond pulses in a solid-state linear transformer driver,” in *Proc. 24th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Sep. 2022, pp. 1–11. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9907478>
- [12] A. Tontini, L. Gasparini, L. Pancheri, and R. Passerone, “Design and characterization of a low-cost FPGA-based TDC,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 65, no. 2, pp. 680–690, Feb. 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8249545>

A high voltage pulse generator (HVPG) based on the Marx generator circuit (Diodes-Capacitor) with high rise time

Ahmad Moradi ¹, Seyyed Mohammad Hasan Hosseini ²,

¹ Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, St_ahmad_moradi@azad.ac.ir

² professor of Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, smhh110@yahoo.com

Abstract

In recent years, coinciding with the advancements in the field of semiconductors and the increase in the power level of solid-state switches, various topologies of solid-state Marx generators and voltage multiplier circuits have been introduced. However, the biggest problem with solid-state pulse power generators, considering the voltage and current level of semiconductor switches, is the limited range of the generated pulses by this type of generator. In this paper, a new scheme is proposed for generating high voltage pulses with a very fast rise time, as a suitable alternative to the Marx generator. In this scheme, a combination of spark gap switch and diode-capacitor voltage multiplier circuit is used. The validity of the proposed scheme is also confirmed by simulation in the MATLAB SIMULINK environment.

Keywords: Pulse Power, Marx Generator, Diode-Capacitor Voltage Multiplier