

تحلیل اثر شکل کلید جرقه زن بر شکل موج ولتاژ خروجی دوقطبی کننده پالس بلوملین

امین فرج زاده^۱، شهریار کابلی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۹۸/۰۷/۰۶، پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۴)

چکیده

تولید پالس‌های ولتاژ بالا با عرض فوق باریک و دوقطبی شده در حد چند نانو ثانیه و کمتر مورد توجه صنایع امروزی می‌باشد. امروزه به دلیل اهمیت بالای ابعاد کوچک مولدهای پالسی، دوقطبی نمودن پالس‌های تک‌قطبی جهت کاهش ابعاد مولد مورد نیاز، بسیار حائز اهمیت است. این مقاله در مورد نتایج طراحی و شبیه‌سازی یک دوقطبی کننده پالسی ولتاژ بالا با ولتاژ ۳۰۰ kV و عرض پالس ۲ nS می‌باشد. در این مولد پالس با استفاده از خطوط انتقال و موضوع انعکاس امواج در خطوط انتقال، ولتاژ تولید شده به صورت متقارن دوقطبی درمی‌آید. ساختار واقعی مولد پالس بلوملین بر اساس ترکیب تو در تو چند خط انتقال است. ولتاژ خروجی این ترکیب تودرتو نسبت به ولتاژ خروجی مدل مداری آن کیفیت مناسبی ندارد. یکی از عوامل کیفیت نامناسب ولتاژ خروجی این مولد پالس، عناصر پراکندگی کلیدهای جرقه زن آن است. این مقاله با بررسی انواع مختلف الکترودهای کلیدهای جرقه زن به بررسی تأثیر عنصرهای پراکندگی آنها بر شکل موج پالس دوقطبی شده می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی برای نمایش کارایی طرح پیشنهادی ارائه می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: انعکاس امواج، پالس تک‌قطبی، پالس دوقطبی، خطوط انتقال، مولد پالسی

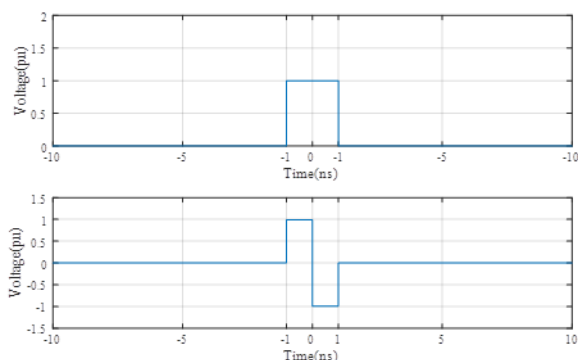
۱. مقدمه

پالس کمتر باشد توان بیشتری در بازه زمانی عرض پالس قابل دسترس است. به این ترتیب ساخت مولدهای پالسی فشرده و کوچک که به دلیل محدودیت ابعاد نمی‌توانند انرژی زیادی داشته باشند در توان‌های بالا ممکن می‌شود. این توان بالا که باعث ایجاد ولتاژ زیاد و در نتیجه میدان الکتریکی قوی می‌شود کاربردهای زیادی در مولدهای پلاسما دارد که امروزه خیلی مورد توجه قرار دارند [۸]. یک نکته مثبت دیگر در کاهش عرض پالس این است که در مولدهای با عرض پالس کم خود مولد پالس می‌تواند به عنوان تولیدکننده موج الکترومغناطیسی توان بالا عمل کند و این منجر به حذف لامپ‌های خلأ به عنوان مولدهای موج الکترومغناطیسی می‌شود. منظور از عرض پالس کم در اینجا مقداری در حدود ۲ nS است.

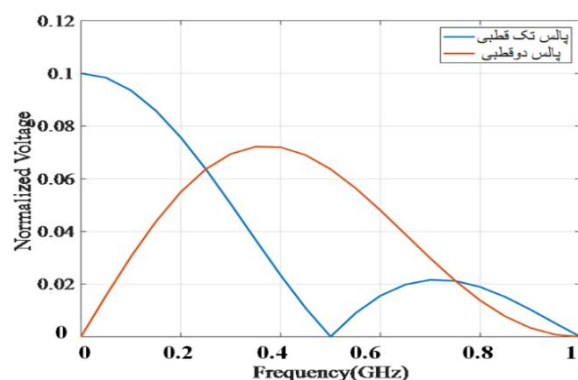
برای دستیابی به عرض پالس‌های در حد چند نانو ثانیه و کمتر، روش‌های کلاسیک تولید پالس فشار قوی مانند استفاده از سوئیچ‌های نیمه‌هادی و ترانسفورمرهای پالس ناکارآمد می‌باشند [۹]. علت آن تاخیر زمانی زیاد کلیدهای نیمه‌هادی و عناصر پراکندگی قابل توجه ترانسفورمرهای پالس است. به همین دلیل مولدهای پالس با عرض پالس فوق باریک عموماً از روش‌های نامتعارف استفاده می‌کنند. برخی از این روش‌ها بر مبنای استفاده از ویژگی‌های مواد خاص است [۱۰]. استفاده از پدیده‌های تندگذر در قطعات الکترونیکی یک روش دیگر تولید پالس‌های با

فناوری در حال گسترش روزافزون توان پالسی به صورت بسیار گسترده در زمینه‌های مختلفی مانند شتاب‌دهنده‌های الکترونی، تخلیه گازی حالت پلاسما، سامانه‌های با پهنای باند زیاد [۱]، صنعت مواد غذایی [۲]، تصفیه فاضلاب [۳] و پزشکی [۴] مورد استفاده قرار می‌گیرد. مولد ولتاژ بالای پالسی بخش مهم یک تجهیز توان بالای پالسی الکترو-فیزیکی می‌باشد [۵]. مولدهای توان پالسی سنتی نمی‌توانند نیازهای امروزی مصرف‌کننده‌های توان پالسی مانند ولتاژ بالا، نرخ تکرار بالا و عرض پالس کم را برآورده کنند [۶]. امروزه توسعه مولدهای پالسی توان بالا با قابلیت‌های ذکر شده تبدیل به موضوع پژوهش در زمینه فناوری توان پالسی شده است. از دیدگاه عملی مهم است که این مولد دارای پارامترهای ثابت با زمان، اندازه کوچک و از لحاظ فناوری قابلیت تولید مجدد داشته باشد [۷]. علاوه بر این برخی کاربردها مانند آزمون با اشعه ایکس و تغذیه لامپ‌های میکروویو در حالت پالسی محدودیت‌هایی بر شکل پالس، مقدار مجاز نویز الکترومغناطیسی و فشرده بودن عنصرها اعمال می‌نماید. یکی از پارامترهای مهم یک مولد توان پالسی امروزی عرض پالس آن است. با پذیرش محدودیت انرژی در سامانه، هرچقدر که عرض

اثر عناصر پراکندگی ساختار بر شکل موج ولتاژ خروجی است.



شکل (۱): نمونه پالس تک قطبی و دوقطبی در حوزه زمان.



شکل (۲): طیف فرکانسی نمونه پالس‌های تک قطبی و دوقطبی نشان داده شده در شکل (۱).

اگر در عمل از سه خط انتقال جدا از هم و نه به صورت تو در تو استفاده می‌شد و آنها به هم اتصال داده می‌شدند، سلف پراکندگی اتصالات مقداری می‌گرفت که مولد پالس امکان کار در عرض پالس‌های نانو ثانیه‌ای را به دلیل افزایش زمان برخاست پالس نداشت. با تو در تو کردن ساختار بخشی از مشکلات ناشی از اتصالات حذف می‌شود. اما هنوز پالس خروجی مولد از شکل ایده‌آل فاصله دارد. در حالت کلی یکی از عوامل اختلاف بین شکل موج واقعی مبدل بلوملین و شکل موج ایده‌آل خروجی از مدل مداری آن، وجود بخش‌هایی با ماهیت غیر خط انتقال یکنواخت در طرح است. یکی از این نقاط کلید جرقه‌زن است. در این مقاله به این بررسی پرداخته شده است که شکل کلید جرقه‌زن چه تاثیری بر این اختلاف ولتاژ خروجی نسبت به شکل ایده‌آل آن دارد. پژوهش‌هایی که تا به حال انجام شده است بیشتر بر افزایش توان مولد پالس بلوملین تمرکز داشته‌اند و موضوع کیفیت شکل موج ولتاژ خروجی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در ادامه این بخش و در بخش دوم این مقاله به بررسی روش به‌کار رفته در مولد بلوملین برای تولید پالس دو قطبی می‌پردازد.

عرض کم است [۱۱]. به‌کارگیری مفاهیم انعکاس و ترکیب امواج در خطوط انتقال یکی از روش‌های مهم ایجاد پالس‌های با عرض کم است. از جمله ماشین‌های پالسی که قابلیت ایجاد پالس‌های با عرض فوق‌باریک را دارند می‌توان به ماشین‌های پالسی رادان^۱ و سینوس^۲ اشاره نمود. ماشین‌های توان پالسی گروه رادان و سینوس شامل ترکیبی از مولدهای ولتاژ بالای پالسی و شتاب‌دهنده‌های الکترونی جریان بالا می‌باشند. قسمت ولتاژ بالای اصلی این سامانه‌ها در داخل ساختار هم‌محوری^۳ یک خط انتقال می‌باشد که توسط یک عنصر شارژکننده موثر (بر خلاف اکثر مولدهای پالسی که برای شارژ شدن متکی به ژنراتور مارکس می‌باشند) به نام ترانسفورمر تسلا شارژ می‌گردند [۱۲-۱۳]. ولتاژ خروجی این مولدها عموماً به صورت تک قطبی است. یکی از چالش‌های مهم در مولدهای پالس با عرض فوق‌باریک تبدیل پالس تک قطبی به پالس دو قطبی است. مزیت‌های پالس دوقطبی نسبت به پالس تک قطبی شده آن در زیر گفته شده است:

(۱) کاهش خطر شکست عایقی: مؤلفه‌های فرکانس پایین پالس تک قطبی به دلیل عدم تطابق امپدانسی آنتن به داخل مولد پالسی برگشته و این برگشت ناخواسته در پالس دوقطبی وجود ندارد. دقت شود که در صورت وجود موج برگشتی ولتاژ به دلیل وجود عدم تطابق امپدانسی و سوار شدن این موج برگشتی بر موج رونده، ولتاژ آن نقطه افزایش یافته و احتمال وقوع شکست عایقی را افزایش می‌دهد [۱۴-۱۵].

(۲) صفر تا بیشینه ولتاژ پالس دوقطبی برابر دامنه ولتاژ پالس تک قطبی است ولی بیشینه منفی تا بیشینه مثبت پالس دوقطبی دو برابر دامنه پالس تک قطبی می‌باشد [۱۶-۱۷].

(۳) پالس دوقطبی هیچ مؤلفه DC ندارد که این به ایمنی کاربر کمک می‌نماید زیرا دیگر خطر تجمع بار در بازوهای آنتن وجود نخواهد داشت (شکل‌های ۱ و ۲).

(۴) با دوقطبی شدن پالس تک قطبی پهنای فرکانسی آن افزایش می‌یابد (شکل ۲).

ساختار مولد پالس بلوملین از نظر مدل مداری طرح ساده‌ای است و پالس خروجی آن شکل مناسب مستطیلی متقارن دو قطبی دارد. ساختار واقعی مولد پالس بلوملین به صورت یک ترکیب تو در تو از سه بخش استوانه‌ای است که تشکیل سه خط انتقال را می‌دهند. این ترکیب تو در تو به ظاهر برای فشرده‌سازی ابعاد مولد پالس ابداع شده است اما در واقع راه حلی برای مشکل

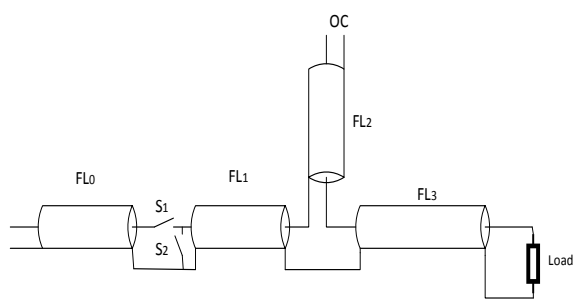
¹ RADAN

² SINUS

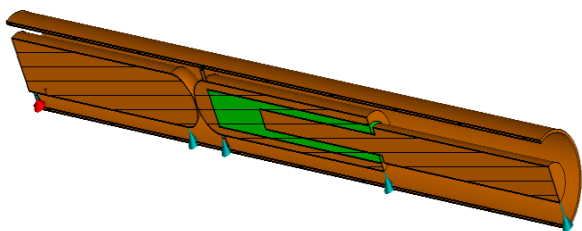
³ Coaxial

خط انتقال می‌رسد. با رسیدن این پالس به ابتدای خط FL_1 کلید موازی S_0 وصل شده و ابتدای این خط را اتصال کوتاه می‌نماید. با اتصال کوتاه شدن ابتدای خط FL_1 موجی که از سمت انتهای FL_1 برگشته بود با علامت منفی دوباره به سمت انتهای خط روانه می‌شود. این موج در لحظه $3T$ به انتهای خط FL_1 می‌رسد و با موجی که در لحظه T در طول خط FL_2 به سمت انتهای آن روانه شده بود و در این لحظه برگشته است دوباره جمع می‌گردد و قسمت منفی پالس را تشکیل می‌دهد. دقت شود موجی که در لحظه T در خط FL_2 به سمت انتهای خط روانه شده بود در لحظه $2T$ به انتهای این خط رسیده و به دلیل مدارباز بودن انتهای این خط، بدون هیچ تغییری برمی‌گردد. این موج در لحظه $3T$ دوباره به ابتدای این خط می‌رسد [۲۱-۱۸].

مدل واقعی ساختار بلوملین دوقطبی‌کننده مطابق شکل‌های (۴-۵) است.



شکل (۳): مدار معادل دوقطبی‌کننده پالس.



شکل (۴): شکل سه‌بعدی و واقعی از دوقطبی‌ساز پالسی بلوملین.

در این ساختار مغزی خط FL_1 پوسته خط FL_2 می‌باشد یا به عبارتی خط FL_2 در درون خط FL_1 قرار داده می‌شود. مطابق شکل، مغزی خط FL_2 با مغزی خط FL_3 یکی می‌باشد. مزیت قرار گرفتن خط انتقال FL_2 در داخل خط انتقال FL_1 ساختار دوقطبی‌کننده نسبت به ساختاری که خطوط به صورت مستقل باشند (مانند شکل ۳) این است که علاوه بر کم کردن عناصر پراکندگی ناشی از اتصالات بین خطوط انتقال، به شدت در فشردگی و کم کردن حجم ساختار واقعی کمک می‌نماید. در شکل (۵) رفت‌وبرگشت امواج در داخل خطوط انتقال نشان داده شده است.

در این بخش یک ساختار مفهومی و یک ساختار واقعی از دوقطبی‌کننده بلوملین ارائه می‌گردد. نحوه رفت‌وبرگشت امواج و نحوه تولید پالس دوقطبی توضیح و به صورت تصویری نشان داده می‌شود. در بخش سوم مدل مداری دوقطبی‌کننده بلوملین در نرم‌افزار Pspice و ساختار واقعی آن در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داده می‌شود. در بخش چهارم به بررسی اثر خازن پراکندگی ناشی از کلیدهای مولد پرداخته می‌شود. در ادامه بخش چهارم به بررسی انواع مختلف الکترودهای کلید جرقه‌زن و اثر آنها روی شکل موج ولتاژ خروجی مولد بلوملین پرداخته می‌شود. در بخش پنجم یک نتیجه‌گیری کلی از کارهای انجام شده در این مقاله ارائه می‌شود.

۲. مروری بر ساختار بلوملین

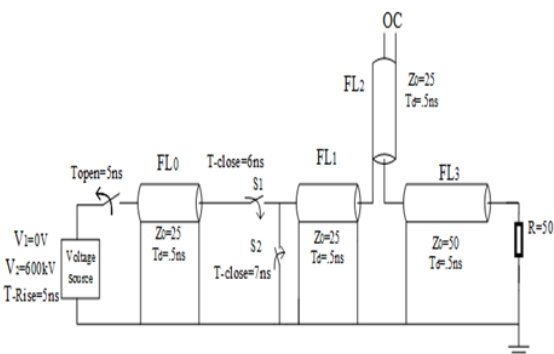
ساختار مداری دوقطبی‌کننده پالس بلوملین در شکل (۳) نشان داده شده است. این ساختار خود از ۳ خط انتقال FL_1 , FL_2 , FL_3 تشکیل شده است. در ابتدای این دوقطبی‌کننده خط انتقال FL_0 قرار دارد که توسط ژنراتور پالسی تا ولتاژ $2V_0$ شارژ می‌گردد. طول الکتریکی خطوط FL_1 و FL_2 با هم مساوی و برابر T می‌باشد. طول الکتریکی خط FL_0 باید از T بزرگتر باشد و محدودیتی برای طول الکتریکی خط FL_3 وجود ندارد. دقت شود خط FL_3 تنها وظیفه اتصال دوقطبی‌کننده پالس به آنتن را بر عهده دارد. با فرض این که امپدانس آنتن برابر $2Z$ باشد برای داشتن تطبیق امپدانس، خط FL_3 باید دارای امپدانس $2Z$ و خطوط FL_0 , FL_1 , FL_2 باید دارای امپدانس Z باشند. دو کلید جرقه‌زن S_1 و S_2 در ابتدای این دوقطبی‌کننده قرار دارند. کلید S_1 به صورت سری بین خط انتقال FL_0 و FL_1 قرار دارد که این دو خط را به همدیگر متصل می‌نماید. کلید S_2 به صورت موازی قرار دارد که برای اتصال کوتاه کردن هادی داخلی خط FL_1 با هادی بیرونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. خط FL_0 تا ولتاژ $2V_0$ توسط مولد پالسی شارژ می‌گردد. سپس با وصل شدن کلید سری S_1 در زمان صفر و با توجه به برابر بودن امپدانس خطوط FL_0 و FL_1 یک پالس با دامنه V_0 در طول خط FL_1 شروع به حرکت می‌نماید تا بعد مدت‌زمان T به انتهای خط FL_1 برسد. با رسیدن به انتهای خط این پالس با امپدانس $3Z_0$ روبرو می‌شود و با توجه به قوانین رفت‌وبرگشت امواج، پالس $V_1=V_0/2$ به سمت ابتدای خط FL_1 برمی‌گردد. هم‌زمان پالس $V_2=-V_0/2$ در طول خط FL_2 به سمت انتهای آن به حرکت درمی‌آید و یک پالس دیگر با دامنه $V_3=V_0$ در طول خط FL_3 به سمت بار به حرکت درمی‌آید. پالس برگشتی با دامنه $V_1=V_0/2$ در خط FL_1 در لحظه $2T$ به ابتدای

خروجی انجام می شود. در ادامه بررسی وابستگی شکل موج ولتاژ خروجی به مشخصات هندسی ساختار با نرم افزار CST انجام می شود. هدف ایجاد پالس دوقطبی با عرض ۲ nS و با دامنه ۳۰۰ kV می باشد. برای رسیدن به این هدف باید طول الکتریکی خطوط انتقال FL₁ و FL₂ برابر ۰/۵ nS و با در نظر گرفتن امپدانس ۵۰ Ω، برای آنتن، امپدانس مشخصه هر کدام از این دو خط انتقال باید برابر ۲۵ Ω شود. مدار معادل این مولد طراحی شده در نرم افزار Pspice شبیه سازی شده و مدار شبیه سازی شده در شکل (۶) نشان داده است. نتایج شبیه سازی در شکل (۷) آورده شده است. مشاهده می شود که عرض پالس دوقطبی خروجی برابر ۲ nS می باشد. نحوه کار این مدار بدین صورت می باشد که ابتدا خط FL₀ را با یک منبع به صورت خطی در مدت زمان ۵ nS تا ولتاژ ۶۰۰ kV شارژ می شود و پس از آنکه خط تا ولتاژ مطلوب شارژ گشت در لحظه ۶ nS کلید جرقه زن S₁ وصل می شود. با توجه به تحلیل توضیح داده شده در بالا، کلید جرقه زن S₂ با تأخیر زمانی برابر با دو برابر طول الکتریکی خطوط انتقال FL₁ و FL₂ وصل می گردد و مغزی خط انتقال FL₁ را زمین می نماید. لازم به ذکر است که برای داشتن ولتاژ دوقطبی کاملاً متقارن و نزدیک به حالت ایده آل بحث شده در تحلیل بالا باید شرایط زیر حتماً در طراحی دوقطبی کننده رعایت گردند:

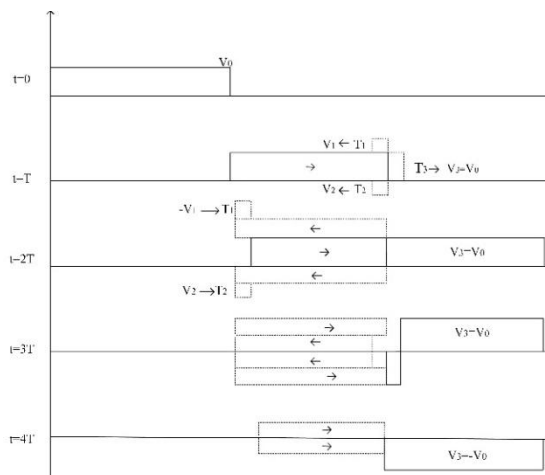
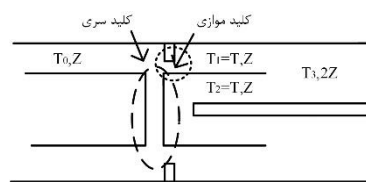
(۱) طول الکتریکی خطوط FL₁ و FL₂ باید کاملاً با هم دیگر برابر باشند.

(۲) کلید جرقه زن موازی باید با تأخیری برابر با دو برابر طول الکتریکی خط انتقال FL₁ و یا FL₂ نسبت به کلید جرقه زن سری وصل گردد.

(۳) امپدانس های خطوط مطابق با تطبیق امپدانس توضیح داده شده در بالا انجام گیرد. در غیر این صورت سبب به هم ریختگی شکل موج خروجی خواهد شد.



شکل (۶): مدار معادل ایده آل دوقطبی کننده بلوملین شبیه سازی شده در نرم افزار Pspice



شکل (۵): نمونه ای از ساختار بلوملین برای دوقطبی کردن پالس به همراه شکل موج های رفت و برگشتی داخل این ساختار.

در این شکل پالس با دامنه V₀ در لحظه صفر وارد دوقطبی کننده می شود و تا لحظه t=4T ولتاژ نقاط مختلف این دوقطبی کننده نشان داده شده است. روابط مربوط به رفت و برگشت امواج در داخل این دوقطبی کننده در جدول (۱) آورده شده است.

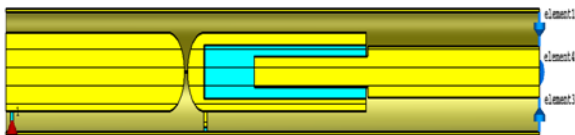
جدول (۱): روابط موج های رفت و برگشتی در خطوط انتقال تشکیل دهنده دوقطبی کننده بلوملین.

$V_1 = \frac{2Z + Z_2 - Z_1}{2Z + Z_2 + Z_1} V_0 = \frac{V_0}{2}$	دامنه موج برگشتی در خط انتقال FL ₁ در لحظه T:
$V_2 = -\frac{2Z_2}{2Z + Z_2 + Z_1} V_0 = -\frac{V_0}{2}$	دامنه موج شروع شده در خط انتقال FL ₂ در لحظه T:
$V_3 = \frac{2 \times 2Z}{2Z + Z_2 + Z_1} = V_0$	دامنه موج شروع شده در خط انتقال FL ₃ در لحظه T:

۳. طراحی و شبیه سازی ساختار بلوملین در نرم افزار Pspice و CST

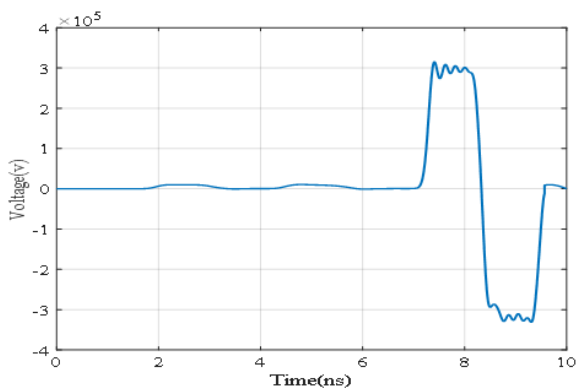
در این بخش مولد پالس بلوملین با استفاده از دو نرم افزار مداری Pspice و عنصر محدود CST مورد بررسی قرار گرفته است. علت استفاده از دو نرم افزار این است که تحلیل های نرم افزار CST بسیار وقت گیر هستند. بنابراین، در این جا با استفاده از نرم افزار Pspice بررسی تاثیر عناصر پراکندگی ساختار بر شکل موج ولتاژ

مدار دوقطبی‌کننده بلوملین به صورت ۳ بعدی در نرم‌افزار عنصر محدود CST مطابق شکل (۸) شبیه‌سازی شده است.



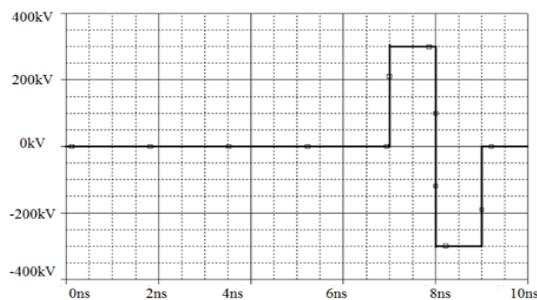
شکل (۸): ساختار سه‌بعدی دوقطبی‌کننده پالس بلوملین در نرم‌افزار CST.

شبیه‌سازی بدین‌صورت انجام‌گرفته است که ابتدا خط FL_0 طی مدت‌زمان ۵ nS (مطابق شبیه‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار Pspice) تا ۶۰۰ kV شارژ می‌گردد. سپس در لحظه ۶ nS کلید جرقه‌زن سری وصل شده و با توجه به این‌که تأخیر زمانی خطوط که هر کدام ۰/۵ nS می‌باشد، کلید موازی ۱ nS با تأخیر نسبت به کلید سری وصل می‌گردد. با توجه به رفت‌وبرگشت امواج در داخل خطوط انتقال، بر سر بار یک ولتاژ پالسی دوقطبی مطابق شکل (۹) تشکیل می‌گردد. طراحی ابعاد دوقطبی‌کننده بدین صورت انجام می‌گیرد که با فرض این‌که عایق خط انتقال FL_1 هوای فشرده می‌باشد و ضریب گذردهی نسبی برای این ماده عدد یک می‌باشد و با توجه به این‌که طول الکتریکی این خط باید برابر ۰/۵ nS باشد، با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه (۲) طول خط FL_1 به‌دست می‌آید.



شکل (۹): نتایج حاصل از شبیه‌سازی دوقطبی‌کننده پالس بلوملین در نرم‌افزار CST.

برای به‌دست آوردن طول خط FL_2 با توجه به این‌که طول الکتریکی این خط ۰/۵ nS می‌باشد و عایق به‌کار رفته در این خط انتقال دارای ضریب گذردهی نسبی ۲/۴ می‌باشد طول الکتریکی خط FL_2 نیز به دست می‌آید. طراحی طول خط FL_3 محدودیتی ندارد. با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که در شکل موج پالس دوقطبی حاصل از طراحی ۳ بعدی، قبل از تشکیل پالس دوقطبی یک‌سری ولتاژهایی پیش‌پالس^۱



شکل (۷): شکل موج پالس دوقطبی‌شده حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Pspice.

لازم به ذکر می‌باشد که امپدانس موجی یک خط انتقال هم‌محور و تأخیر زمانی آن به ترتیب طبق روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد [۲۲]. که در این روابط شعاع داخلی پوسته و r_{in} شعاع خارجی مغزی می‌باشد. L طول خط انتقال و ϵ_r ثابت دی‌الکتریک به‌کار رفته بین مغزی و پوسته می‌باشد.

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \times Ln \frac{r_{out}}{r_{in}} \quad (۱)$$

$$T = \frac{l \times \sqrt{\epsilon_r}}{C} \quad (۲)$$

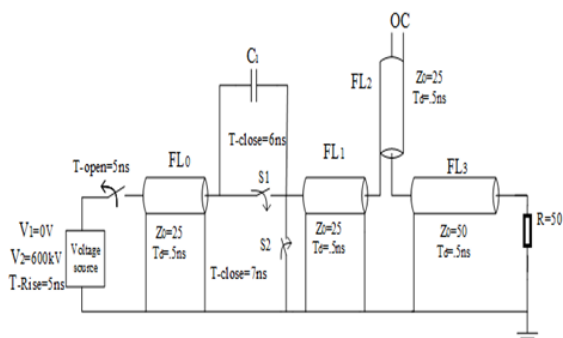
با استفاده از روابط ۱ و ۲، مشخصات دوقطبی‌کننده طراحی‌شده دوقطبی‌کننده بلوملین در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات ابعاد طراحی‌شده دوقطبی‌کننده بلوملین

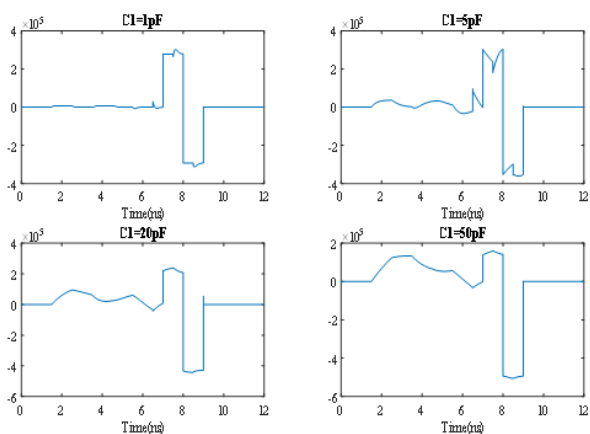
طول خط FL_0	۱۵۰ mm
طول خط FL_1	۱۵۰ mm
طول خط FL_2	۹۸/۹ mm
طول خط FL_3	۱۵۰ mm
شعاع مغزی خط FL_0 و FL_1	۱۲/۶ mm
شعاع پوسته خط FL_0 و FL_1	۱۹/۲ mm
شعاع مغزی خط FL_2	۴/۸ mm
شعاع پوسته خط FL_2	۸/۷۷ mm
شعاع مغزی خط FL_3	۸/۳ mm
شعاع پوسته خط FL_3	۱۹/۲ mm
تأخیر خطوط FL_0 و FL_1 و FL_2 و FL_3	۰/۵ mm
امپدانس خطوط FL_0 ، FL_1 و FL_2	۲۵ Ω
امپدانس خط FL_3	۵۰ Ω

^۱ Prepulse

مقدار این خازن زیادتر می‌گردد قسمت پیش‌پالس پالس دوقطبی افزایش یافته و شکل دوقطبی حاصل نامتقارن تر می‌گردد.

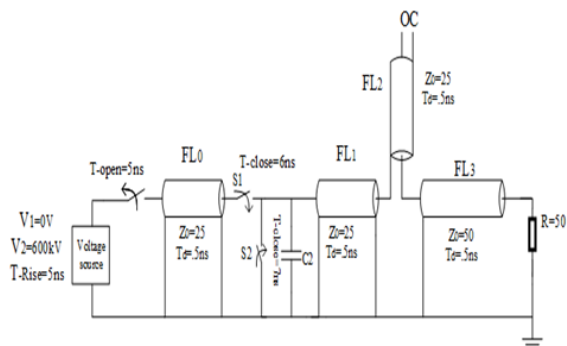


شکل (۱۱): شبیه‌سازی مداری ساختار دوقطبی‌کننده بلوملین به همراه خازن پراکندگی کلید سری (C1) در نرم‌افزار Pspice



شکل (۱۲): تأثیر مقادیر متفاوت خازن پراکندگی کلید سری (C1) در نامتقارن کردن پالس دوقطبی خروجی و پدیده پیش‌پالس.

شبیه‌سازی برای مشاهده تأثیر خازن C2 مطابق شکل (۱۳) انجام می‌گیرد و نتایج شبیه‌سازی به‌ازای ۴ مقدار خازن C2 در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

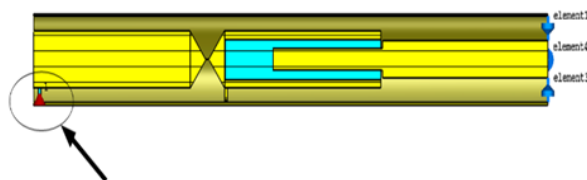


شکل (۱۳): شبیه‌سازی مداری ساختار دوقطبی‌کننده بلوملین و خازن کلید موازی (C2) در نرم‌افزار Pspice

در شکل (۱۴) مشاهده می‌گردد که هرچقدر مقدار این خازن پراکندگی کلید موازی زیادتر می‌گردد، زمان صعود پالس

اجتناب‌ناپذیر با دامنه کم (در این‌جا تقریباً ۱۰ kV) قبل از ایجاد پالس دوقطبی بر روی بار تشکیل می‌شود. در صورت عدم کنترل، این پدیده پیش‌پالس می‌تواند برای بار و فرد کاربر خطرآفرین باشد. علت به‌وجود آمدن این پدیده پیش‌پالس به دلیل وجود خازن پراکندگی کلید جرقه‌زن سری قبل از وصل شدن این کلید می‌باشد که در بخش بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

نحوه اعمال ورودی‌ها در شبیه‌سازی بدین‌صورت است که با تعریف یک دهانه^۱ و تعریف یک سیگنال تحریک در قسمت فرکانس بالای این نرم‌افزار، بین مغزی و پوسته خط انتقال FL0 ولتاژ ۶۰۰ kV ایجاد می‌گردد. دهانه و سیگنال اعمال‌شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



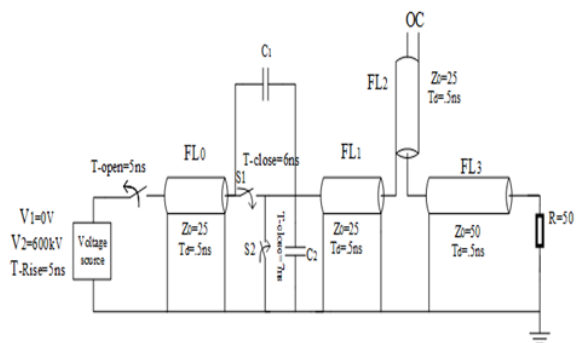
شکل (۱۰): دهانه و سیگنال اعمال‌شده بین مغزی و پوسته در نرم‌افزار CST جهت شارژ مغزی نسبت به پوسته.

۴. تحلیل عنصرهای پراکندگی کلید جرقه‌زن سری S1 و موازی S2

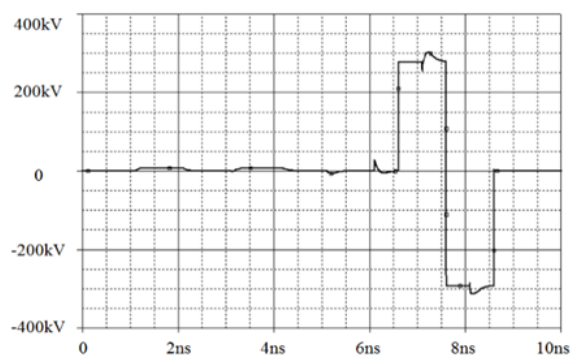
کلید سری S1 شامل یک خازن C1 تشکیل‌شده بین الکترودها می‌باشد و بعد از وصل شدن تشکیل یک سلف سری L1 می‌دهد. کلید S2 نیز شامل خازن C2 تشکیل‌شده بین مغزی و الکترودها زمین و بعد از وصل شدن تشکیل سلف L2 می‌دهد. بین این عنصرهای پراکندگی، خازن C1 بیشترین تأثیر را در به‌هم‌ریختگی شکل پالس دوقطبی دارد به‌طوری‌که اگر مقدار این خازن از حدی زیادتر باشد سبب به‌وجود آمدن پدیده پیش‌پالس و عدم تقارن در شکل پالس دوقطبی می‌گردد. تمرکز این مقاله نیز بیشتر بر روی تأثیر خازن کلید سری بر شکل موج ولتاژ دوقطبی تشکیل‌شده می‌باشد. شکل (۶) در قسمت قبل در حالت ایده‌آل و بدون وجود عنصرهای پراکندگی شبیه‌سازی گردید و نتایج حاصله در شکل (۷) نشان داده شد. در ادامه طبق شکل‌های (۱۱) و (۱۳) مدار ایده‌آل شکل (۶) به همراه خازن‌های پراکندگی C1 و C2 شبیه‌سازی می‌گردد و تأثیر این خازن‌ها به صورت جداگانه در شکل‌های (۱۲) و (۱۴) نشان داده شده است. ابتدا شبیه‌سازی برای مشاهده تأثیر خازن C1 مطابق شکل (۱۱) انجام می‌گیرد و نتایج شبیه‌سازی به‌ازای ۴ مقدار خازن C1 در شکل (۱۲) نشان داده شده است و مشاهده می‌گردد که هرچقدر

¹ Port

گرفته شده بین این دو الکتروود، مقدار خازن پراکندگی این الکتروود تقریباً 0.1 pF به دست می‌آید. لازم به ذکر است چون کلید جرقه‌زن موازی در ولتاژ بالاتری نسبت به کلید جرقه‌زن سری وصل می‌شود بنابراین فاصله بین دو الکتروود آن بیشتر است. با توجه به این که مقدار خازن کلید جرقه‌زن موازی بسیار کمتر از 1 pF می‌باشد می‌توان با توجه به شکل (۱۴) از وجود این خازن صرف‌نظر کرد. در واقع در شکل‌های (۱۱) و (۱۳) خازن‌های کلید سری و موازی به صورت جداگانه مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند تا تأثیر هر کدام از این خازن‌ها به‌ازای مقادیر مختلف مورد مشاهده قرار گیرد و مشاهده گردید که خازن کلید موازی به‌ازای خازن‌های کمتر از 1 pF تأثیر محسوسی بر خروجی پالس دوقطبی نمی‌گذارد. شکل (۱۵) در حضور هر دو خازن پراکندگی کلید سری و کلید موازی در نرم‌افزار Pspice مورد شبیه‌سازی می‌گیرد و نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



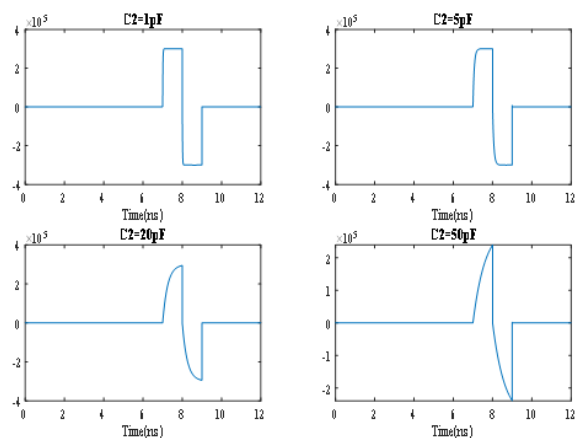
شکل (۱۵): شبیه‌سازی مداری ساختار دوقطبی‌کننده بولوملین به همراه هر دو خازن پراکندگی کلید موازی و سری در نرم‌افزار Pspice.



شکل (۱۶): نتایج شبیه‌سازی دوقطبی‌کننده بولوملین به همراه هر دو خازن پراکندگی کلید موازی و سری در نرم‌افزار Pspice.

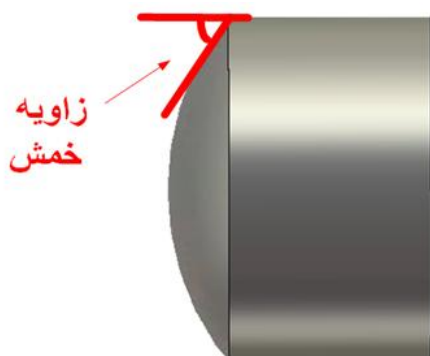
در این شبیه‌سازی مقدار خازن پراکندگی برای کلید سری برابر 1 pF و برای کلید موازی برابر 0.1 pF در نظر گرفته می‌شود. طبق شکل (۱۶) و مقایسه آن با شکل‌های (۱۲) و (۱۴) مشاهده می‌شود که خازن پراکندگی کلید سری، تعیین‌کننده شکل موج نهایی دوقطبی‌کننده بولوملین می‌باشد.

دوقطبی‌افزایش می‌یابد به طوری که افزایش بیش‌ازحد مقدار این خازن، دامنه پالس دوقطبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



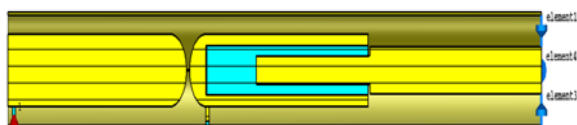
شکل (۱۴): تأثیر مقادیر خازن پراکندگی کلید موازی (C_2) در شکل پالس دوقطبی.

با توجه به این که در واقعیت در این مقادیر ولتاژ عملکردی فاصله بین الکتروودهای کلیدهای سری و موازی خیلی کم می‌باشد هنگام وصل شدن این کلیدها سلف این مسیر در حدود چند صد پیکوهرنی می‌شود. با این ترتیب تأثیر سلف فقط در زمان صعود و نزول پالس می‌باشد. چون امپدانس ناشی از این مقادیر سلفها بسیار کم می‌باشد، تأثیرشان در پالس دوقطبی خروجی نسبت به عنصرهای پراکندگی خازنی کم می‌باشد. با توجه به این که حساسیت پالس دوقطبی به خازن کلید سری بسیار زیاد است و این خازن به‌شدت به نوع کلید جرقه‌زن بستگی دارد در ادامه به بررسی انواع ساختارهای موجود کلیدهای جرقه‌زن می‌پردازیم. از عوامل مهمی که باعث افزایش مقدار این خازن کلید سری می‌گردد می‌توان به شکل الکتروود (الکتروود با زاویه خمش، مخروط-مخروط، صفحه-صفحه و ...)، فاصله الکتروودها از همدیگر و شعاع الکتروودها اشاره نمود. در ادامه به بررسی عوامل اشاره‌شده بر روی شکل پالس و پدیده پیش‌پالس پرداخته می‌شود. روند محاسبه خازن پراکندگی کلید جرقه‌زن سری در نرم‌افزار CST بدین صورت است که ابتدا در قسمت الکترواستاتیک نرم‌افزار، به مغزی خط انتقال FL_0 در غیاب پوسته‌اش یک ولتاژ نسبت داده و به مغزی خط انتقال FL_1 در غیاب پوسته‌اش ولتاژ صفر نسبت داده می‌شود. با محاسبه انرژی بین این دو هادی و با توجه به اختلاف ولتاژ بین دو الکتروود مقدار خازن بین این دو مغزی مشخص می‌گردد. بسته به نوع الکتروودها و فاصله بین این دو الکتروود مقدار این خازن تا 5 pF در طراحی‌های این مقاله متغیر می‌باشد. محاسبه خازن بین دو الکتروود کلید موازی نیز مشابه خازن کلید سری بین دو الکتروود انجام می‌پذیرد. با توجه به سطح مقطع و فاصله 3 mm در نظر



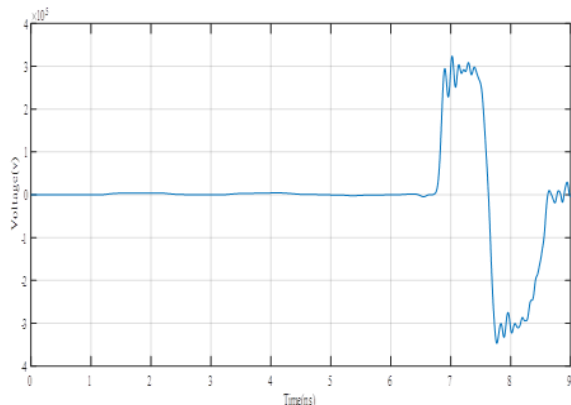
شکل (۱۹): تعریف زاویه خمش در الکتروند انحنادار.

در شکل (۲۰) الکتروندهای بین کلید جرقه‌زن سری با زاویه خمش ۶۰ درجه قرار گرفته‌اند. با شبیه‌سازی الکترواستاتیکی این ساختار در نرم‌افزار CST خازن بین دو الکتروند کلید جرقه‌زن برابر $1/5 \text{ pF}$ به دست می‌آید که نسبت به خازن حالت مخروط-مخروط افزایش یافته است.



شکل (۲۰): ساختار دوقطبی‌کننده بلوملین با بهره بردن از کلید جرقه‌زن با زاویه خمش ۶۰ درجه.

با شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و در نظر گرفتن 2 mm فاصله بین دو الکتروند مقدار سلف بین این دو الکتروند بعد وصل شدن کلید جرقه‌زن سری تقریباً برابر $0/9 \text{ nH}$ به دست می‌آید. شکل موج پالس دوقطبی مورد نظر در شکل (۲۱) نشان داده شده است و طبق همین شکل مشاهده می‌شود که پدیده پیش‌پالس در این حالت نسبت به حالت مخروط-مخروط به دلیل افزایش خازن کلید جرقه‌زن سری، افزایش پیدا کرده است.



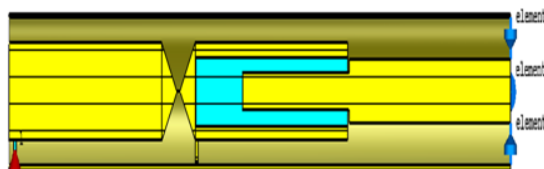
شکل (۲۱): پالس دوقطبی شده با بهره بردن از کلید جرقه‌زن با زاویه خمش ۶۰ درجه.

۱-۴. بررسی ساختارهای مختلف الکتروندهای کلید جرقه‌زن سری و خازن پراکندگی آن‌ها

در این بخش به بررسی و شبیه‌سازی ۳ ساختار متفاوت کلید جرقه‌زن پرداخته می‌شود. کلیدهایی که بررسی می‌شوند الکترودهایی به شکل‌های مخروط-مخروط، الکترودهای با زاویه خمش و صفحه-صفحه دارند.

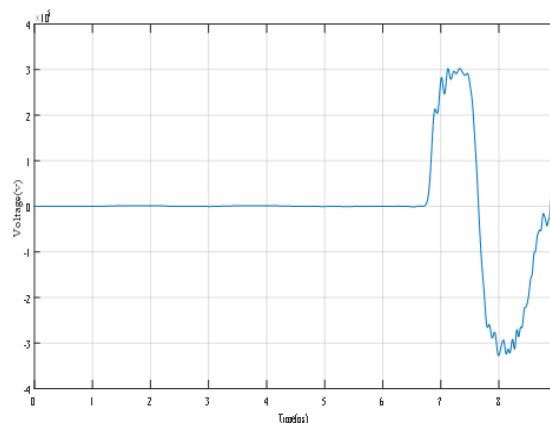
ساختار (۱) کلید جرقه‌زن مخروط-مخروط:

در شکل (۱۷) الکتروندهای بین کلید جرقه‌زن سری به صورت مخروط-مخروط قرار گرفته‌اند. با شبیه‌سازی الکترواستاتیکی این ساختار در نرم‌افزار CST خازن بین دو الکتروند کلید جرقه‌زن برابر $0/8 \text{ pF}$ به دست می‌آید و با شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و در نظر گرفتن 2 mm فاصله بین دو الکتروند مقدار سلف بین این دو الکتروند بعد از وصل شدن کلید تقریباً برابر 1 nH به دست می‌آید.



شکل (۱۷): ساختار دوقطبی‌کننده بلوملین با بهره بردن از کلید جرقه‌زن مخروط-مخروط.

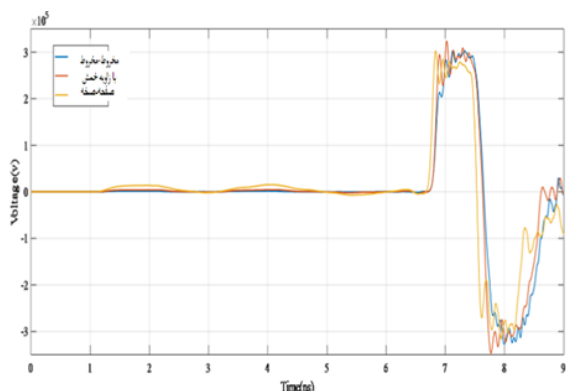
شکل موج پالس دوقطبی شده مورد نظر در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



شکل (۱۸): پالس دوقطبی شده با بهره بردن از کلید جرقه‌زن مخروط-مخروط.

ساختار (۲) کلید جرقه‌زن با زاویه خمش ۶۰ درجه:

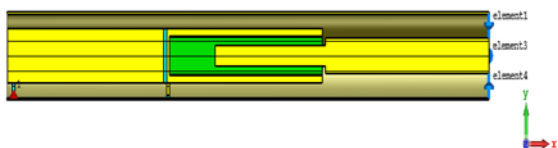
منظور از زاویه خمش در این قسمت، زاویه بین سطح الکتروند انحنادار و مغزی خط انتقال در نقطه اتصال‌شان مطابق شکل (۱۹) می‌باشد.



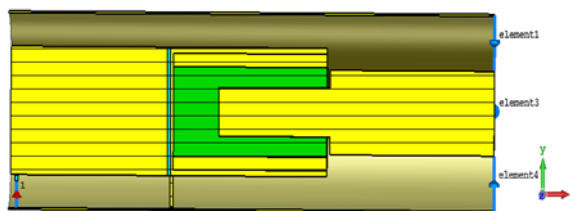
شکل (۲۴): مقایسه پالس دوقطبی خروجی بر حسب الکترودهای متفاوت بکار رفته در ساختار بلوملین.

۲-۴. بررسی تأثیر افزایش شعاع الکترودهای جرقه‌زن سری بر شکل موج پالس خروجی

با توجه به رابطه (۱) مشاهده می‌شود اگر شعاع داخلی پوسته و شعاع خارجی مغزی به صورت هم‌زمان چند برابر، برای مثال ۳ برابر شوند امپدانس خط تغییری نمی‌کند بنابراین از لحاظ تطبیق امپدانس برای تولید پالس دوقطبی مشکلی به وجود نخواهد آمد و طبق رابطه (۲) بر روی تأخیر خطوط انتقال نیز تأثیری نخواهد داشت. ولی باید دقت کرد که این ۳ برابر شدن سبب افزایش سطح الکترودها گشته و خازن کلید سری را تا ۹ برابر افزایش می‌دهد. در ادامه تأثیر این زیاد شدن با شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST نشان داده می‌شود. دقت شود برای ثابت ماندن عرض پالس دوقطبی طول خطوط انتقال تغییر داده نمی‌شوند. دو ساختار شکل (۲۵) و (۲۶) را در نظر بگیرید.



شکل (۲۵): ساختار استاندارد طراحی شده برای دوقطبی‌کننده بلوملین.



شکل (۲۶): افزایش ابعاد در راستای محورهای Y و Z (راستای شعاعی).

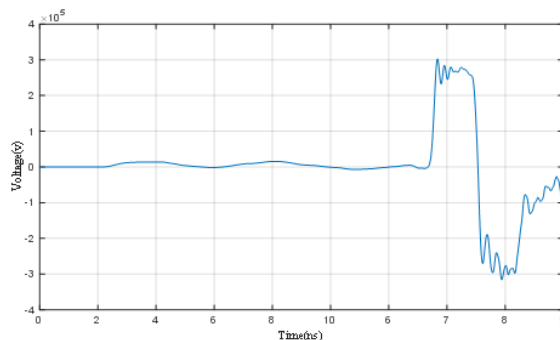
ساختار (۳) کلید جرقه‌زن صفحه- صفحه:

در ساختار شکل (۲۲) الکترودهای بین کلید جرقه‌زن سری به صورت صفحه- صفحه قرار گرفته‌اند. با شبیه‌سازی الکترواستاتیکی این ساختار در نرم‌افزار CST خازن بین دو الکترودهای جرقه‌زن برابر 5 pF به دست می‌آید.



شکل (۲۲): ساختار دوقطبی‌کننده بلوملین با بهره بردن از کلید جرقه‌زن صفحه- صفحه.

با شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و در نظر گرفتن 2 mm فاصله بین دو الکترودهای مقدار سلف بین این دو الکترودها بعد وصل شدن کلید تقریباً برابر 0.3 nH به دست می‌آید. شکل موج پالس دوقطبی مورد نظر در شکل (۲۳) نشان داده شده است.



شکل (۲۳): پالس دوقطبی شده با بهره بردن از کلید جرقه‌زن صفحه- صفحه.

مشاهده می‌شود که طبق شکل (۲۳) بدلیل افزایش خازن بین دو الکترودهای صفحه- صفحه نسبت به خازن بین الکترودهای کلید جرقه‌زن مخروط- مخروط و یا کلید جرقه‌زن با زاویه خمش 60° درجه، پدیده پیش‌پالس شدت یافته است.

در شبیه‌سازی هر ۳ ساختار الکترودهای (با زاویه خمش 60° درجه، صفحه- صفحه، مخروط- مخروط) شعاع الکترودها و فاصله بین الکترودها از همدیگر برای هر ۳ ساختار برابر فرض گردید. شعاع الکترودها برابر $12/6 \text{ mm}$ و فاصله بین الکترودها برابر 2 mm در نظر گرفته شد. برای داشتن مقایسه بهتر، نتایج شبیه‌سازی حاصل از هر ۳ ساختار در شکل (۲۴) رسم گردید.

مشاهده می‌شود که ساختار صفحه- صفحه بیشترین پدیده پیش‌پالس را نسبت به بقیه ساختارها دارد.

طبق انتظار مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن الکترودها به همدیگر خازن کلید سری افزایش یافته و پیش‌پالس ناشی از آن نیز افزایش یافته و شکل موج پالس خروجی نامتقارن می‌گردد.

هدف از این تحلیل‌ها انتخاب ساختار مناسب برای مولد پالس بلوملین است. باید توجه کرد که در الکترودهای با زاویه خمش و یا مخروط- مخروط چون توان انتقالی از طریق یک سطح بسیار کوچک (نوک الکترودها) انجام می‌گیرد در نرخ تکرارهای بالا سطح این الکترودها فرسایش یافته و فاصله الکترودها با گذشت زمان از همدیگر زیادتر شده و ولتاژ وصل شدنشان با گذر زمان افزایش می‌یابد و در صورتی که این ولتاژ شکست از ولتاژ شارژ خط FL_0 بیشتر باشد دیگر این کلیدها وصل نخواهند شد. بنابراین در صورتی که امکان تعویض الکترودها در نرخ تکرارهای بالا وجود نداشته باشد و عمر الکترودها عامل مهمی در طراحی مولد پالسی باشد استفاده از ساختار صفحه- صفحه ترجیح داده می‌شود. ولی در صورتی که قابلیت تعویض الکترودها بعد از مدت زمان خاصی وجود داشته باشد، ساختار با زاویه خمش و یا مخروط- مخروط به دلیل کم بودن خازن‌های پراکندگی و در نتیجه کم شدن پدیده پیش‌پالس نسبت به الکترودهای صفحه- صفحه ارجحیت دارند. در ادامه مشخصات حاصل از شبیه‌سازی برای ۳ الکترودهای مختلف کلید جرقه‌زن به صورت مقایسه‌ای در جدول (۳) گردآوری شده‌اند. لازم به ذکر است که این داده‌ها با فرض یکسان بودن شعاع الکترودها و فاصله دو الکترودها از همدیگر گردآوری شده است.

جدول (۳): مقایسه مشخصات ۳ الکترودهای مختلف شبیه‌سازی.

نوع الکترودها کلید جرقه‌زن	مخروط- مخروط	با زاویه خمش ۶۰ درجه	صفحه- صفحه
خازن پراکندگی کلید جرقه‌زن سری	۰/۸ pF	۱/۵ pF	۵ pF
پدیده پیش‌پالس	بسیار کم	کم	زیاد
سلف سری	۱ nH	۰/۹ nH	۰/۳ nH
زمان صعود	زیاد	کم	بسیار کم

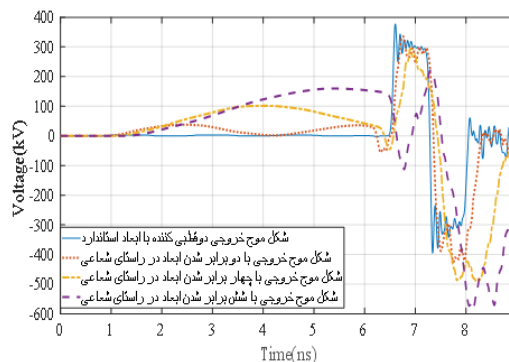
۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل واقعی مولد پالس دوقطبی بلوملین با هدف کیفیت شکل موج ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی به شرح زیر می‌باشد:

۱- شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که پالس دوقطبی شده خروجی

ساختار شکل (۲۶) همان ساختار شکل (۲۵) می‌باشد با این تفاوت که ابعاد آن در راستای محور Y و Z ، چند برابر گشته است (شعاع هادی‌های خطوط انتقال چند برابر گشته است).

شکل موج پالس دوقطبی خروجی حاصل از این دو ساختارها در شکل (۲۷) نشان داده شده است.

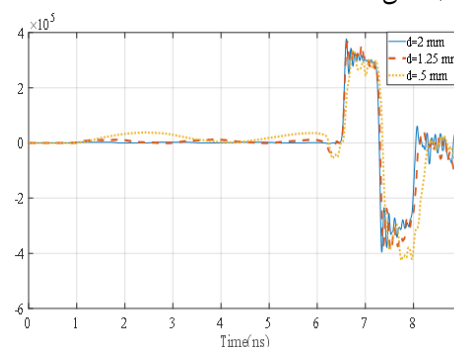


شکل (۲۷): نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختار استاندارد شکل (۲۵) و ساختار شکل (۲۶) (به‌زای دو، چهار و شش برابر شدن ابعاد دوقطبی‌کننده در راستای شعاعی) و مقایسه آن‌ها.

نمودار با رنگ آبی مربوط به حالتی است که ابعاد دوقطبی ساز پالس، به‌گونه‌ای می‌باشد که خازن ناشی از الکترودها شکل موج پالس دوقطبی را تغییر نمی‌دهد. نمودار با رنگ‌های دیگر مربوط به حالتی است که ابعاد دوقطبی‌ساز به صورت شعاعی افزایش پیدا کرده است و مشاهده می‌شود که با زیاد شدن ابعاد، قبل از وجود آمدن پالس دوقطبی در خروجی به دلیل زیاد شدن خازن پراکندگی کلید سری، پدیده پیش‌پالس افزایش یافته و شکل موج پالس دوقطبی نامتقارن می‌گردد.

۳-۴. بررسی تأثیر فاصله بین الکترودهای کلید جرقه‌زن سری بر شکل موج پالس خروجی

در این حالت شبیه‌سازی به‌زای سه فاصله بین‌الکترودهای ۲ mm، ۱/۲۵ mm و ۰/۵ mm در نرم‌افزار CST انجام داده می‌شود. الکترودهای به‌کار رفته صفحه- صفحه و نتایج شبیه‌سازی در شکل (۲۸) نشان داده شده است.



شکل (۲۸): تأثیر افزایش فاصله بین الکترودها در شکل پالس دوقطبی خروجی.

- [7] J. Cvetič, "Tesla's high voltage and high frequency generators with oscillatory circuits," *Serbian journal of electrical engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 301-303, 2016.
- [8] V. Pazynin, K. Sirenko, and Y. Sirenko, "High-Power Short Pulses Compression: Analysis and Modeling"; Springer International Publishing, pp. 327-385, 2016.
- [9] J. Rao, K. Liu, J. Qiu, "All solid-state nanosecond pulsed generators based on Marx and magnetic switches," *IEEE Transactions on Dielectric insulation*, vol. 20, no. 4, pp. 1123-1128, 2013.
- [10] J. Mankowski and M. Kristiansen, "A Review of Short Pulse Generator Technology," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 28, no. 1, pp. 102-108, 2000.
- [11] A. Kuthi, P. Gabrielsson, M. R. Behrend, P. T. Vernier and M. A. Gundersen, "Nanosecond Pulse Generator Using Fast Recovery Diodes for Cell Electromanipulation," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 33, no. 4, pp. 1192-1197, aug 2005.
- [12] G. A. Mesyats, S. D. Korovin, V. V. Rostov, V. G. Shpak, M. I. Yalandin, "The RADAN series of compact pulsed power Generators and their applications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 7, pp. 1166-1179, 2004.
- [13] G. A. Mesyats, V. G. Shpak, M. I. Yalandin, S. A. Shunailov, "RADAN-EXPERT portable high-current accelerator," *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 1, pp. 539-543, 1995.
- [14] V. G. Shpak, M. R. Oulmascoulov, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin, "Active former of monocycle high-voltage subnanosecond pulses," *12th IEEE International Pulsed Power Conference*. vol. 2, pp. 1456-1459, 1999.
- [15] B. Martin, P. Delmote, B. Jecko, "Design of an ultra-compact UWB pulse former," *16th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 1, pp. 464-467, 2007.
- [16] V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. R. Ulmaskulov, M. I. Yalandin, "Generation of high-power broadband electromagnetic pulses with PRF of 100 pps," *17th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 1, pp. 666-671, 2009.
- [17] B. Cadilhon *et al.*, "Self-Contained, Hand-Portable, and Repetitive Ultrawideband Radiation Source," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 6, pp. 1549-1559, 2011.
- [18] S. W. Lim, S. Katsuki, Y. S. Jin, C. Cho, Y. B. Kim, "Nanosecond High-Voltage Pulse Generator Using a Spiral Blumlein PFL for Electromagnetic Interference Test," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 10, pp. 2909-2912, 2014.
- [19] Y. A. Andreev *et al.*, "Gigawatt-power-level ultrawideband radiation generator," *12th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 2, pp. 1337-1340, 1999.
- [20] Y. A. Andreev *et al.*, "High-power ultrawideband electromagnetic radiation generator," *11th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 1, pp. 730-735, 1997.
- [21] H. Yazdi, S. R. Ostadzadeh, F. Taheri Astane "Transient Analysis of Single-Conductor Overhead Lines Terminated to Grounded Arrester Considering Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil using Genetic Algorithm," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 3, no. 2, 2015. (in persian)
- [22] J. Lehr and P. Ron, "Foundations of Pulsed Power Technology" Wiley-IEEE Press, 2017.

مولد شامل نوسانات و پدیده پیش‌پالس به دلیل عنصرهای پراکندگی ناشی از کلیدهای جرقه‌زن سری و موازی می‌باشد. با توجه به این‌که مقدار عنصرهای پراکندگی سلفی بسیار کم است تأثیرشان در شکل موج پالس دوقطبی خروجی با عرض پالس 2 nS نسبت به عنصرهای پراکندگی خازنی کم است. مشاهده شد که خازن پراکندگی کلید جرقه‌زن موازی زمان صعود پالس دوقطبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و خازن پراکندگی کلید سری علاوه بر این‌که پالس دوقطبی را نامتقارن می‌کند باعث به وجود آمدن پدیده خطرناک پیش‌پالس می‌شود.

۲- با توجه به اهمیت خازن پراکندگی کلید سری، به بررسی عواملی که روی این خازن پراکندگی تأثیر می‌گذارند پرداخته شد. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار CST تائید کردند که نوع الکتروود (با زاویه خم، صفحه-صفحه و مخروط-مخروط) کلید جرقه‌زن، فاصله الکتروودها از همدیگر و شعاع الکتروودها به‌شدت بر روی خازن پراکندگی تأثیر می‌گذارند. با لحاظ این نکته که هدف فقط بهبود شکل موج ولتاژ خروجی است الکتروودهایی با سطوح غیر مسطح مانند مخروط-مخروط بر الکتروودهای صفحه-صفحه ارجحیت دارند. اما با لحاظ عمر مفید الکتروودها هر چقدر الکتروودها مسطح تر باشند بهتر است.

۳- نتایج تحلیل اثر عناصر پراکندگی ساختار بر شکل موج ولتاژ خروجی و شناسایی عناصر موثرتر این امکان را می‌دهد که از مدل مداری واقعی‌تری در نرم‌افزار Pspice استفاده شود. با این‌کار زمان طراحی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.

۶. مراجع

- [1] V. I. Koshelev, Y. I. Buyanov, Y. A. Andreev, V. V. Plisko, K. N. Sukhushin, "Ultrawideband radiators of high-power pulses," in *28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 2, pp. 1661-1664, 2001.
- [2] K. Saito, K. Hoki, and Y. Minamitani, "Effect of brine and temperature in sterilization using nanosecond pulsed electric fields for packaged fresh foods," in *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, pp. 371-376, 2016.
- [3] S. R. Jang, H. J. Ryoo, Y. S. Jin, S. H. Ahn, G. H. Rim, "Application of pulsed power system for water treatment of the leachate," in *2009 IEEE Pulsed Power Conference*, pp. 980-983, 2009.
- [4] Y. Torigoe, D. Wang, T. Namihira, "Ethylene treatment using nanosecond pulsed discharge," in *2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power*, pp. 1-4, 2017.
- [5] G. A. Mesyats, "Nanosecond and subnanosecond repetitive pulsed power systems," *28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference*, pp. 480-483, 2001.
- [6] E. Schamiloglu, "High power microwave science," in *2014 IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences held with 2014 IEEE International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS)*, pp. 1-1, 2014.

Analysis of Spark Gap Shape Effect on the Output Voltage Waveform of Blumlein Bipolar Pulse Former

A. Farajzadeh, Sh. Kaboli *

Sharif University of Technology

(Received: 28/09/2018, Accepted: 03/02/2020)

Abstract

Nowadays, producing high voltage ultra-narrow bipolar pulse is considered in many applications. Considering the antenna or load, a bipolar pulse generator has many advantages compared to a unipolar pulse generator. Therefore, a high-power bipolar pulse generator has become a goal in the field of pulsed power. To achieve this goal, producing a bipolar pulse from a unipolar pulse is an important issue. Blumlein pulse generator is a widely used bipolar pulse generator with good performance. One of the issues in this pulse generator is the effect of spark gaps' shape on the waveform of the output pulse. In this paper, a Blumlein bipolar pulse former has been considered, simulated and analyzed with different spark gap types. The effect of parasitic capacitance of these spark gaps in the transmission lines has been considered. The results of simulations can be used to design a bipolar pulse generator with acceptable output voltage waveform.

Keywords: Bipolar pulse, Transmission lines, Unipolar pulse, Wave reflections

* Corresponding author E-mail: kaboli@sharif.edu

