

ملاحظات فیزیکی طراحی دوقطبی کننده پالس بلوملین

امین فرج زاده^۱، شهریار کابلی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی شریف
(دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۹)

چکیده

دوقطبی کننده پالس بلوملین برای تولید پالس های ولتاژ بالا با عرض فوق باریک و دوقطبی شده در حد چند نانوثانیه و کمتر مورد توجه صنایع امروزی می باشد. در دوقطبی کننده پالس بلوملین با استفاده از خطوط انتقال و انعکاس امواج در خطوط انتقال، ولتاژ تولید شده به صورت متقارن دوقطبی درمی آید. ساختار واقعی مولد پالس بلوملین بر اساس ترکیب تودرتوی چند خط انتقال است. مشکلی که مشاهده می شود این است که ولتاژ خروجی این ترکیب تودرتو نسبت به ولتاژ خروجی مدل مداری آن کیفیت پایین تری دارد. این مقاله در مورد نتایج طراحی و شبیه سازی یک دوقطبی کننده پالسی ولتاژ بالا با ولتاژ ۳۰۰kV و عرض پالس ۲nS با امپدانس بار 50Ω می باشد. این مقاله با بررسی انواع عوامل فیزیکی ساختار تودرتو به بررسی تأثیر آنها بر شکل موج پالس دوقطبی شده می پردازد. نتایج شبیه سازی برای اعتبارسنجی تحلیل های انجام شده ارائه می شوند.

کلیدواژه ها: انعکاس امواج، پالس تک قطبی، پالس دوقطبی، خطوط انتقال، مولد پالسی

۱. مقدمه

کند و این منجر به حذف لامپ های خلأ به عنوان مولدهای موج الکترومغناطیسی می شود. منظور از عرض پالس کم در اینجا مقداری در حدود ۲nS است.

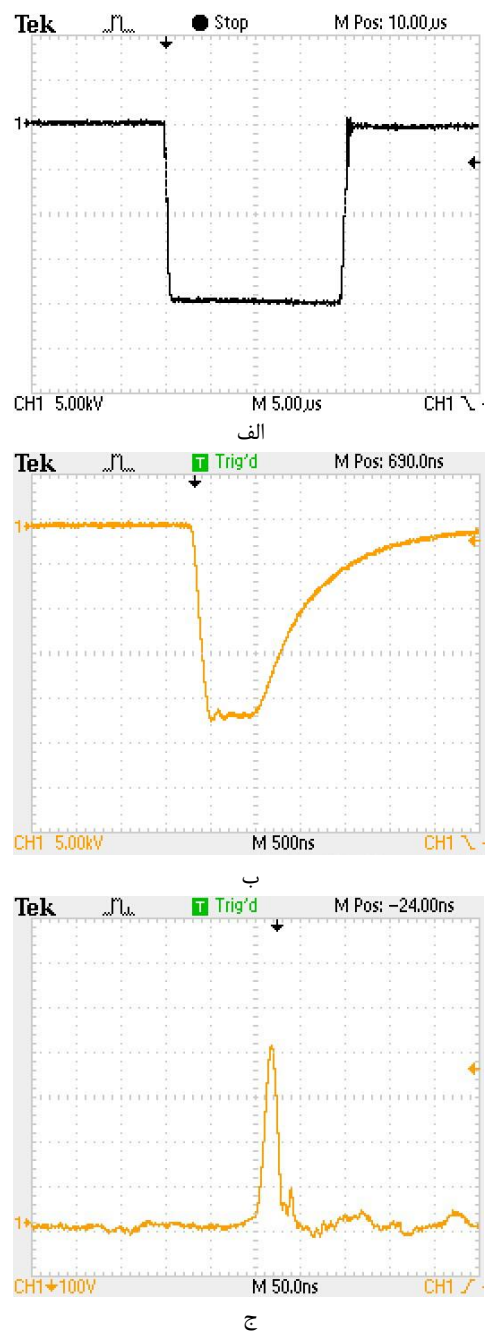
برای دستیابی به عرض پالس های در حد چند نانو ثانیه و کمتر، استفاده از کلیدهای نیمه هادی و ترانسفورمرهای پالس مناسب نمی باشند [۹]. علت آن تأخیر زمانی زیاد کلیدهای نیمه هادی و عناصر پراکندگی قابل توجه ترانسفورمرهای پالس است. به همین دلیل مولدهای پالس با عرض پالس فوق باریک عموماً از روش های نامتعارف استفاده می کنند. برخی از این روش ها بر مبنای استفاده از ویژگی های مواد خاص است [۱۰]. استفاده از پدیده های تندگذر در قطعات الکترونیکی یک روش دیگر تولید پالس های با عرض کم است [۱۱]. با وجود به کارگیری این روش ها باز هم دستیابی به پالس هایی با عرض پالسی در حدود چند نانوثانیه فقط در ولتاژهای پایین ممکن است. شکل (۱) مقایسه ای بین ولتاژ خروجی چند نمونه مولد پالس را نشان می دهد. شکل (۱-الف) ولتاژ خروجی یک مولد پالس را نشان می دهد که در آن از کلید نیمه هادی به عنوان کلید و ترانسفورمر افزایش ولتاژ به عنوان افزایش دهنده سطح ولتاژ استفاده شده است [۱۲]. مشاهده می شود که حتی زمانه ای گذرای ابتدا و انتهای پالس هم بیشتر از چند نانوثانیه می باشند. شکل (۱-ب) ولتاژ خروجی یک مولد پالس از نوع کلید مستقیم را نشان می دهد که در آن ترانسفورمر پالس حذف شده است و از

مولدهای با توان لحظه ای بالا که عمدتاً در رژیم پالسی کار می کنند در صنایع مختلفی مانند سامانه های نظامی [۱]، مواد غذایی [۲]، تصفیه فاضلاب [۳] و پزشکی [۴] مورد استفاده قرار می گیرند. منبع تغذیه ولتاژ بالای پالسی بخش مهم یک مولد توان بالای پالسی می باشد [۵]. قابلیت های ولتاژ بالا، نرخ تکرار بالا، عرض پالس کم که معنی آن توان لحظه ای بالاتر است [۶]، پایداری کارکرد در طول زمان و اندازه کوچک [۷] از جمله شاخص های کیفیت یک مولد توان پالسی است. یکی از پارامترهای مهم یک مولد توان پالسی امروزی عرض پالس آن است. با پذیرش محدودیت انرژی در سامانه، هرچه قدر که عرض 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 نمی توانند انرژی زیادی داشته باشند در توان های بالا ممکن می شود. این توان بالا که باعث ایجاد ولتاژ زیاد و در نتیجه میدان الکتریکی قوی می شود 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 می تواند به عنوان تولید کننده موج الکترومغناطیسی توان بالا عمل

به کارگیری مفاهیم انعکاس و ترکیب امواج در خطوط انتقال یکی از روش‌های مهم ایجاد پالس‌های با عرض کم و دامنه پالس زیاد 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. قسمت ولتاژ بالای اصلی این سامانه‌ها در داخل ساختار هم‌محوری^۳ یک خط انتقال می‌باشد که توسط یک عنصر تغذیه‌کننده مؤثر (بر خلاف اکثر مولدهای پالسی که برای تغذیه شدن متکی به مولد مارکس می‌باشند) به نام ترانسفورمر تسلا شارژ می‌شوند [۱۵]، [۱۶]. ولتاژ خروجی این مولدها عموماً به صورت تک‌قطبی است. یکی از چالش‌های مهم در مولدهای پالس با عرض فوق‌باریک تبدیل پالس تک‌قطبی به پالس دوقطبی است. از مزیت‌های پالس دوقطبی نسبت به پالس تک‌قطبی می‌توان به کاهش خطر شکست عایقی [۱۷]، [۱۸]، دو برابر بودن اختلاف ولتاژ بیشینه منفی تا بیشینه مثبت پالس دوقطبی نسبت به دامنه ولتاژ پالس تک‌قطبی [۱۹]، [۲۰]، عدم وجود مؤلفه DC در پالس دوقطبی، امکان ارسال ساده‌تر آن نسبت به پالس تک‌قطبی و افزایش پهنای باند فرکانسی پالس دوقطبی اشاره کرد.

ساختار دوقطبی‌کننده پالس بلوملین از نظر مدل مداری طرح ساده‌ای است و پالس خروجی آن شکل مناسب مستطیلی متقارن دوقطبی دارد. در عمل این ساختار به صورت یک ترکیب تودرتو از سه بخش استوان‌های است که تشکیل سه خط انتقال را می‌دهند. این ترکیب تودرتو به ظاهر برای فشردگی ابعاد مولد پالس ابداع شده است اما در واقع راه‌حلی برای مشکل اثر عناصر پراکندگی ساختار بر شکل موج ولتاژ خروجی است. اگر در عمل از سه خط انتقال جدا از هم و نه به صورت تودرتو 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 صعود پالس نداشت. با تودرتو 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. پژوهش‌هایی که تا بحال انجام شده است بیشتر بر افزایش توان مولد پالس بلوملین تمرکز داشته‌اند و موضوع کیفیت شکل موج ولتاژ خروجی کمتر مورد توجه قرار

سری‌سازی کلیدهای نیمه‌هادی برای افزایش سطح ولتاژ پالس استفاده شده است [۱۳]. با وجود بهبود نسبی نسبت به شکل (۱-الف) ولی باز هم امکان دستیابی به عرض پالس‌های در حد نانو ثانیه وجود ندارد. شکل (۱-ج) ولتاژ خروجی یک مولد پالس از نوع مبتنی بر زمان بازیابی معکوس دیود را نشان می‌دهد [۱۴]. ملاحظه می‌شود که امکان پالس با عرض پالس کم تا حدی فراهم شده است ولی دامنه پالس در حد حداکثر چند صدولت است.



شکل (۱): مقایسه‌ای بین ولتاژ خروجی چند نوع مولد پالس، الف) مولد پالس با استفاده از ترانسفورمر پالس، ب) مولد پالس از نوع کلید مستقیم، ج) مولد پالس از نوع مبتنی بر زمان بازیابی معکوس دیود

¹ RADAN

² SINUS

³ Coaxial

دوقطبی کننده پالس بلوملین توضیح داده می‌شود.

ساختار مداری دوقطبی کننده پالس بلوملین در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. این ساختار خود از سه خط انتقال FL_1, FL_2, FL_3 تشکیل شده است. در ابتدای این دوقطبی کننده خط انتقال FL_0 قرار دارد که توسط مولد 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. خط FL_3 تنها وظیفه اتصال دوقطبی کننده پالس به بار را بر عهده دارد. با فرض اینکه امپدانس بار به‌عنوان بار برابر $Z_2 -$ باشد برای داشتن تطبیق امپدانس، خط FL_3 باید دارای امپدانس Z_2 و خطوط FL_0, FL_1, FL_2 باید دارای امپدانس Z_1 باشند. دو کلید جرقه‌زن S_1 و S_2 در ابتدای این دوقطبی کننده قرار دارند. کلید S_1 به‌صورت سری بین خط انتقال FL_0 و FL_1 قرار دارد که این دو خط را به همدیگر متصل می‌نماید. کلید S_2 به‌صورت 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 Z_0 روبرو می‌شود و با توجه به قوانین رفت و برگشت 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 خط انتقال می‌رسد. با رسیدن این پالس به ابتدای خط FL_1 کلید موازی S_2 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 مدار باز بودن انتهای این خط، بدون هیچ تغییری برمی‌گردد. این موج در لحظه $3T$ دوباره به ابتدای این خط می‌رسد [۲۴-۲۱].

گرفته است. در حال حاضر صرف ایجاد یک پالس ولتاژ زیاد با عرض پالس کم کمال مطلوب فناوران در دنیا است. اما پیش‌بینی می‌شود که مانند دیگر مولدهای پالس سنتی که آنها هم در ابتدا فقط صرف ایجاد توان برایشان مهم بود، در آینده نزدیک و با فراگیر شدن کاربرد پالس‌هایی با عرض فوق باریک مسئله کیفیت شکل موج به یک موضوع مهم تبدیل شود. از جمله مواردی که کیفیت ولتاژ تولیدشده در مولد پالس اهمیت زیادی دارد می‌توان به کاتد لامپ‌های خلأ در توان‌های زیاد اشاره کرد. در لامپ‌های خلأ سنتی بدلیل اهمیت هم‌زمانی بین باریکه الکترونی و موج الکترومغناطیسی، ولتاژ کاتد باید کاملاً ثابت باشد که بتواند این هم‌زمانی را برآورده سازد. در لامپ‌های جدید مانند لامپ با کاتد مجازی^۱ نیز کیفیت ولتاژ به مناسب بودن طیف فرکانسی موج الکترومغناطیسی تولید شده منجر می‌شود. در این مقاله به تأثیر مشخصات فیزیکی ساختار تودرتوی دوقطبی کننده بلوملین بر کیفیت شکل موج ولتاژ خروجی آن پرداخته شده است.

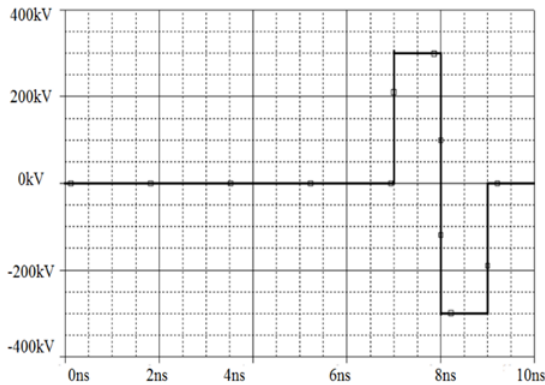
در بخش دوم این مقاله به بررسی روش به‌کار رفته در مولد بلوملین برای تولید پالس دوقطبی می‌پردازد. در این بخش یک ساختار مفهومی و یک ساختار واقعی از دوقطبی کننده بلوملین ارائه می‌گردد. نحوه رفت و برگشت امواج و نحوه تولید پالس دو-قطبی توضیح داده می‌شود. در این بخش مدل مداری دوقطبی کننده بلوملین در نرم‌افزار Pspice و ساختار واقعی آن در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با هم مقایسه می‌شوند. در بخش سوم به بررسی اثر مشخصات فیزیکی ساختار بر روی شکل موج ولتاژ خروجی مولد بلوملین پرداخته می‌شود. در بخش چهارم یک نتیجه‌گیری کلی از کارهای انجام‌شده در این مقاله ارائه می‌شود.

۲. ساختار بلوملین

ساختار مولد پالس بلوملین از نظر مدل مداری طرح ساده‌ای است و پالس خروجی آن شکل مناسب مستطیلی متقارن دوقطبی دارد. ساختار واقعی مولد پالس بلوملین به‌صورت یک ترکیب تودرتو از سه بخش استوان‌های است که تشکیل سه خط انتقال را می‌دهند. این ترکیب تودرتو به ظاهر برای فشرده‌سازی ابعاد مولد پالس ابداع شده است اما در واقع راه‌حلی برای مشکل اثر پارامترهای پارازیت ساختار بر شکل موج ولتاژ خروجی است. در ادامه ابتدا در مورد مدل مداری و سپس در مورد ساختار واقعی

¹ Viricator

امپدانس مشخصه هر کدام از این دو خط انتقال باید برابر 25Ω شود. نتیجه شبیه‌سازی شکل مداری (۲ - الف) در شکل (۳) آورده شده است و مشاهده می‌شود که دوقطبی کننده به خوبی کار میکند و شکل موج ولتاژ خروجی مطلوب است.



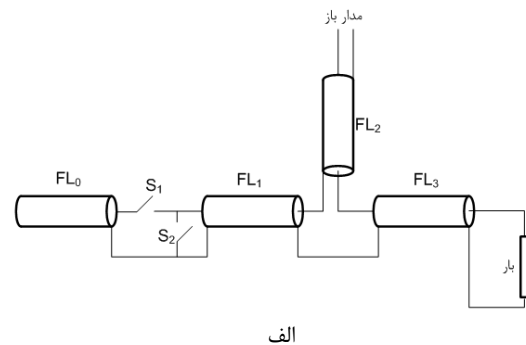
شکل (۳): شکل موج پالس دوقطبی‌شده در نرم‌افزار Pspice.

اکنون دوقطبی‌کننده پالس بلوملین فوق را با استفاده از نرم‌افزار CST تحلیل می‌کنیم. در این حالت ساختار واقعی تودرتو در نرم‌افزار CST پیاده‌سازی می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که امپدانس موجی یک خط انتقال هم‌محور و تأخیر زمانی آن به ترتیب طبق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردد [۲۵]. که در این روابط شعاع داخلی پوسته و شعاع خارجی مغزی می‌باشد. l طول خط انتقال و ϵ_r ثابت دی‌الکتریک به کار رفته بین مغزی و پوسته می‌باشد.

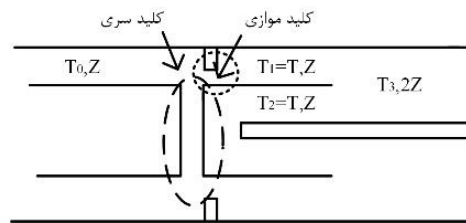
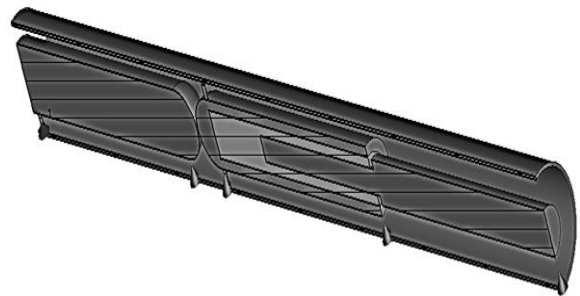
$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \times Ln \frac{r_{out}}{r_{in}} \quad (1)$$

$$T = \frac{l \times \sqrt{\epsilon_r}}{C} \quad (2)$$

در طراحی مدل سه‌بعدی واقعی میدل بلوملین دو رابطه (۱) و (۲) باید به ازای پارامترهای ابعادی هر یک از خطوط FL_0 تا FL_3 حل شوند. شکل (۴ - الف) پارامترهای ابعادی این چهار خط انتقال را نشان می‌دهد. با استفاده از روابط (۱) و (۲)، مشخصات دوقطبی‌کننده طراحی‌شده دوقطبی‌کننده بلوملین در جدول (۱) آورده شده است. دقت شود که اختلاف دو شعاع پوسته و مغزی توسط استقامت الکتریکی عایق آن خط تعیین می‌شود که به‌عنوان یک پارامتر مستقل به‌عنوان معادله سوم برای حل سه پارامتر شعاع مغزی، شعاع پوسته و طول هر یک از خطوط انتقال علاوه بر معادلات (۱) و (۲) به کار می‌رود. مدار دوقطبی‌کننده بلوملین به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار عنصر محدود CST مطابق شکل (۴ - ب) شبیه‌سازی شده است.



الف



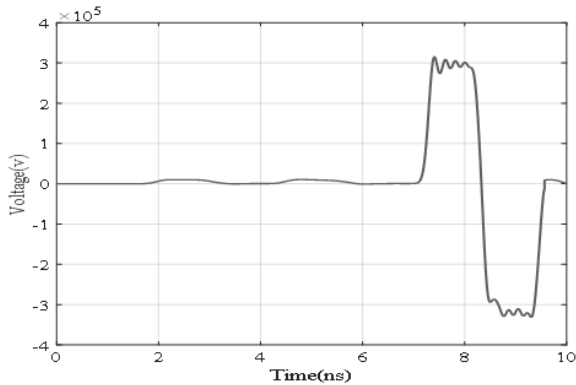
ب

شکل (۲): ساختار دوقطبی‌کننده پالس بلوملین، الف) مدل مداری ایده‌آل ب) شکل سه‌بعدی و واقعی و معادل دو بعدی آن [۲۱].

مدل واقعی ساختار بلوملین دوقطبی‌کننده مطابق شکل (۲ - ب) است. در این ساختار مغزی خط FL_1 پوسته خط FL_2 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 به‌صورت مستقل باشند (مانند شکل (۲ - الف)) این است که علاوه بر کم کردن عناصر پراکندگی ناشی از اتصالات بین خطوط انتقال، شدت در فشرده و کم کردن حجم ساختار واقعی کمک می‌نماید.

برای نشان دادن تفاوت شکل موج خروجی مدل مداری دوقطبی‌کننده بلوملین با شکل موج خروجی ساختار واقعی آن که به‌صورت تودرتو است، با استفاده از دو نرم‌افزار مداری Pspice و عنصر محدود CST شبیه‌سازی انجام شده است. هدف ایجاد پالس دوقطبی با عرض 2ns و دامنه 300kV می‌باشد. برای رسیدن به این هدف باید طول الکتریکی خطوط انتقال FL_1 و FL_2 برابر 5ns و با در نظر گرفتن امپدانس 50Ω برای بار،

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 این که طول الکتریکی این خط باید برابر $0.5nS$ باشد، با جای گذاری این مقادیر در رابطه (۲) طول خط FL_1 به دست می‌آید.



شکل (۵): نتیجه شبیه‌سازی دوقطبی کننده بلوملین در نرم‌افزار CST.

برای به دست آوردن طول خط FL_2 با توجه به اینکه طول الکتریکی این خط $0.5nS$ می‌باشد و عایق به کار رفته پلاستیک سیلیکونی^۱ در این خط انتقال دارای ضریب گذردهی نسبی $2/4$ می‌باشد طول الکتریکی خط FL_2 نیز به دست می‌آید. طراحی طول خط FL_3 محدودیتی ندارد. نحوه اعمال ورودی‌ها در شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST در [۲۶] توضیح داده شده است.

شکل (۵) نشان می‌دهد که شکل موج پالس دوقطبی حاصل از طراحی سه بعدی با شکل موج مدل مداری آن متفاوت است. عوامل مؤثر بر این اختلاف در بخش بعدی بررسی خواهند شد.

۳. ملاحظات فیزیکی طراحی

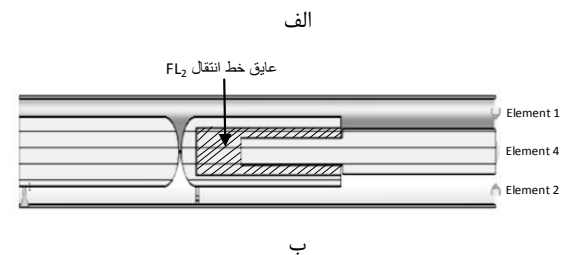
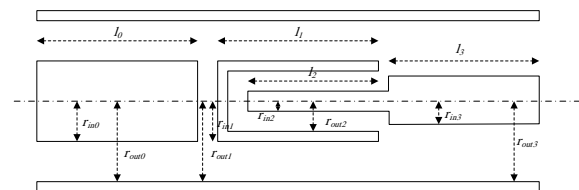
در این بخش به مطالعه عوامل فیزیکی مؤثر بر شکل موج خروجی دوقطبی کننده بلوملین پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که طرح محدودیت‌های دیگری مانند محدودیت‌های الکتریکی نیز دارد که در مرجع [۲۶] به آنها پرداخته شده است.

۳-۱. تغییر طول عایق به کاررفته در FL_2

در ابتدا ساختار شکل (۶) (ساختار ۱) که در آن تمام فضای داخلی خط انتقال FL_2 توسط عایق پر شده است را در نظر بگیرید. با توجه به اینکه عایق به کاررفته در خط انتقال FL_2 پرهزینه و گران می‌باشد بنابراین کم کردن حجم این عایق پراهمیت می‌باشد. با توجه به اینکه یک موج پالسی برای انتقال نیاز به دو هادی دارد به همین دلیل تا جایی که مغزی خط

جدول (۱): ابعاد دوقطبی کننده بلوملین طراحی شده.

طول خط FL_0 (l_0)	۱۵۰ mm
طول خط FL_1 (l_1)	۱۵۰ mm
طول خط FL_2 (l_2)	۹۸/۹ mm
طول خط FL_3 (l_3)	۱۵۰ mm
شعاع مغزی خط FL_1 و FL_0 و r_{in0} (r_{in1})	۱۲/۶ mm
شعاع پوسته خط FL_1 و FL_0 و r_{out0} (r_{out1})	۱۹/۲ mm
شعاع مغزی خط FL_2 (r_{in2})	۴/۸ mm
شعاع پوسته خط FL_2 (r_{out2})	۸/۷۷ mm
شعاع مغزی خط FL_3 (r_{in3})	۸/۳ mm
شعاع پوسته خط FL_3 (r_{out3})	۱۹/۲ mm
تأخیر خطوط FL_0 و FL_1 و FL_2 و FL_3	$0.5nS$
امپدانس خطوط FL_0 ، FL_1 و FL_2	25Ω
امپدانس خط FL_3	50Ω
ثابت دی الکتریک خطوط FL_0 ، FL_1 و FL_3	۱
ثابت دی الکتریک خط FL_2	$2/4$

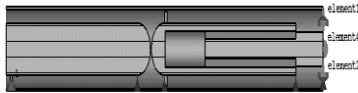


شکل (۴): (الف) پارامترهای ابعادی دوقطبی کننده بلوملین، (ب) مقطع ساختار سه بعدی دوقطبی کننده پالس بلوملین در نرم‌افزار CST.

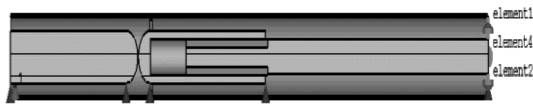
شبیه‌سازی بدین صورت انجام گرفته است که ابتدا خط FL_0 طی مدت زمان $5nS$ (مطابق شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار Pspice) تا $60kV$ شارژ می‌گردد. سپس در لحظه $6nS$ کلید جرقه زن سری وصل شده و با توجه به اینکه تأخیر زمانی خطوط کلید سری وصل می‌گردد. با توجه به رفت و برگشت امواج در داخل خطوط انتقال، بر سر بار یک ولتاژ پالسی دوقطبی مطابق شکل (۵) تشکیل می‌گردد. طراحی ابعاد دوقطبی کننده بدین

¹ Silicone rubber

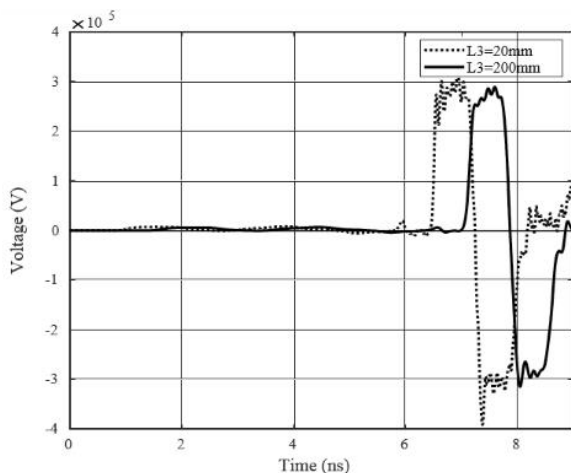
دامنه ولتاژ مقداری تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در شکل (۹) طول خط FL_3 برابر 20 mm و در شکل (۱۰) برابر 200 mm در نظر گرفته می‌شود. در این دو ساختار از مس با تلفات به‌عنوان جنس مغزی و پوسته خطوط انتقال استفاده گردیده است. در ضمن لازم به یادآوری می‌باشد که افزایش طول خط FL_3 باعث تأخیر در رسیدن پالس دوقطبی به خروجی می‌باشد.



شکل (۹): در نظر گرفتن طول خط FL_3 برابر 20 mm ($L_3=20$).



شکل (۱۰): در نظر گرفتن طول خط FL_3 برابر 200 mm ($L_3=200$).



شکل (۱۱): تأثیر افزایش طول خط FL_3 بر شکل موج خروجی.

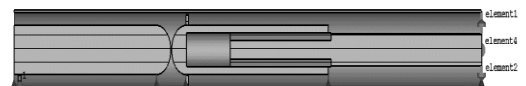
۳-۳. تغییر طول خط FL_0

با توجه به آنچه در قسمت مقدمه گفته شد طول الکتریکی خط FL_0 باید بزرگ‌تر و یا مساوی طول الکتریکی خط انتقال FL_1 و یا FL_2 باشد. شکل (۱۲) به ازای طول FL_0 برابر L_0 و شکل (۱۳) به ازای طول FL_0 برابر $2L_0$ شبیه‌سازی می‌گردد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌صورت یکجا در شکل (۱۴) نمایش داده می‌شود. مشاهده می‌شود که زیاد شدن طول خط FL_0 تأثیری بر شکل موج خروجی ندارد. دلیل این است که کلید موازی بعد مدت زمان خاصی مغزی را زمین کرده و بقیه انرژی خط FL_0 دیگر وارد دوقطبی ساز نشده و وارد زمین می‌شود یا به عبارتی دیگر این انرژی هدر می‌رود. بنابراین در طراحی باید سعی شود طول خط FL_0 با طول خط FL_1 برابر شود زیرا افزایش طول خط FL_0

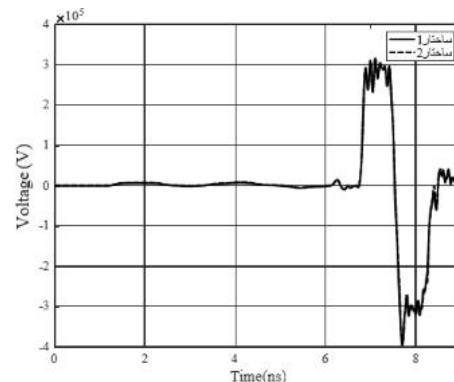
انتقال FL_2 ادامه پیدا می‌کند از عایق استفاده می‌شود و بقیه خالی گذاشته می‌شود. این ساختار در شکل (۷) (ساختار ۲) نشان داده شده است. طبق همین شکل (۷) مشاهده می‌شود در هزینه عایق صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای می‌شود. شکل موج ولتاژ خروجی حاصل از این دو ساختار برای مقایسه بهتر در شکل (۸) نشان داده شده است. با دقت در شکل (۸) مشاهده می‌شود که شکل موج خروجی مطابق انتظار بوده و تفاوت قابل توجهی با حالتی که عایق به‌صورت کامل داخل خط انتقال FL_2 را پر می‌کرد نکرده است. بنابراین برای صرفه‌جویی در هزینه و کم کردن وزن دوقطبی‌کننده می‌توان حجم عایق دوقطبی‌کننده را طبق گفته بالا کم کرد.



شکل (۶): پر شدن تمام فضای داخلی خط انتقال FL_2 توسط عایق (ساختار ۱).



شکل (۷): پر شدن بخشی از فضای داخلی خط انتقال FL_2 توسط عایق (ساختار ۲).

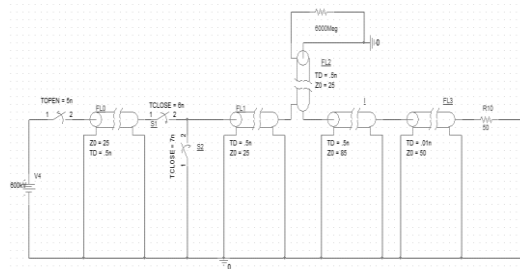
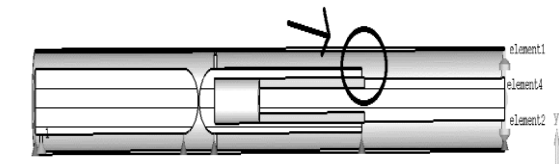


شکل (۸): مقایسه شکل موج ولتاژ خروجی ناشی از دو ساختار ۱ و ۲.

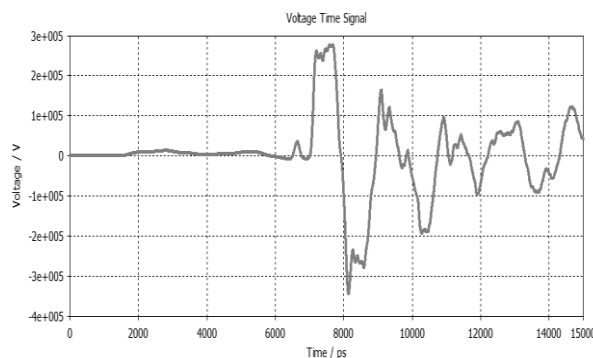
۲-۳. تغییر طول خط FL_3

با توجه به اینکه این خط به‌عنوان متصل‌کننده دوقطبی‌کننده به بار می‌باشد در طراحی با توجه به ملزومات تطبیق امپدانس و فاصله بار از مولد و تلفات این خط، تا حد ممکن سعی بر آن است که طول این خط کم‌تر انتخاب گردد. شکل‌های (۹) و (۱۰) خط انتقال FL_3 به ازای دو طول متفاوت را نشان می‌دهد. برای درک بهتر تأثیر افزایش طول خط FL_3 ، طول این خط تا ده برابر افزایش داده می‌شود. نتایج برای مقایسه بهتر به‌صورت یکجا در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود وقتی که طول خط انتقال FL_3 ده برابر می‌شود به دلیل تلفات خط انتقال تغییراتی در شکل موج دوقطبی به چشم می‌خورد به‌گونه‌ای که

در نظر گرفته شد اما در واقعیت این طول کمتر می‌باشد. با مقایسه شکل (۱۷) که نتیجه شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST و شکل (۱۸) که نتیجه شبیه‌سازی در نرم‌افزار Pspice می‌باشد این نتیجه به دست می‌آید که افزایش طول نقطه اتصال باعث به وجود آمدن ولتاژهای بعد ولتاژ دوقطبی خروجی و کم شدن دامنه شکل موج اصلی می‌گردد.

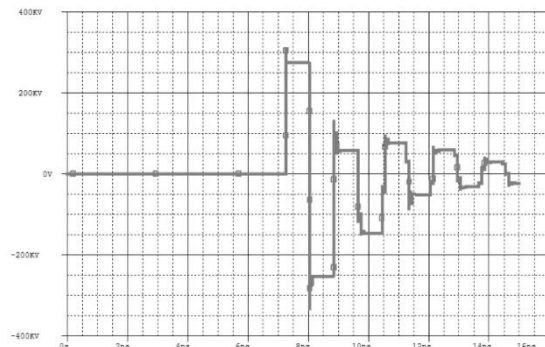


شکل (۱۶): بررسی فاصله بین دو خط انتقال FL_2 و FL_3 در Pspice



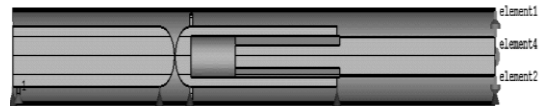
شکل (۱۷): ولتاژ خروجی دوقطبی‌ساز در نرم‌افزار CST وقتی که طول

اتصال بین خط انتقال FL_2 و FL_3 برابر طول خط انتقال FL_1 باشد.

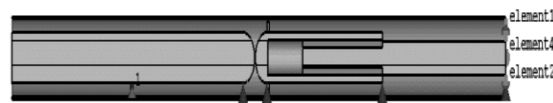


شکل (۱۸): ولتاژ خروجی دوقطبی‌ساز شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Pspice در صورتی که طول نقطه اتصال بین خط انتقال FL_2 و FL_3 برابر طول خط انتقال FL_1 باشد.

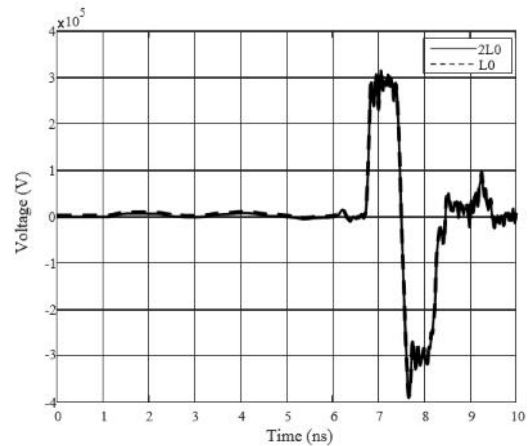
تأثیری بر شکل موج خروجی نداشته و باعث کاهش بازده مولد می‌گردد. در ضمن با توجه به اینکه در مولدهای پالسی خط تولید پالس FL_0 قبل از دوقطبی‌ساز و بعد از فشرده‌ساز پالس قرار می‌گیرد بنابراین برای بالا بودن ولتاژ این خط سعی بر کم بودن طول این خط می‌باشد. بنابراین در طراحی باید طول خط FL_0 بزرگ‌تر یا مساوی L_0 و تا حد ممکن نزدیک به L_0 باشد.



شکل (۱۲): طول خط انتقال FL_0 برابر L_0 می‌باشد.



شکل (۱۳): طول خط انتقال FL_0 برابر $2L_0$ می‌باشد.

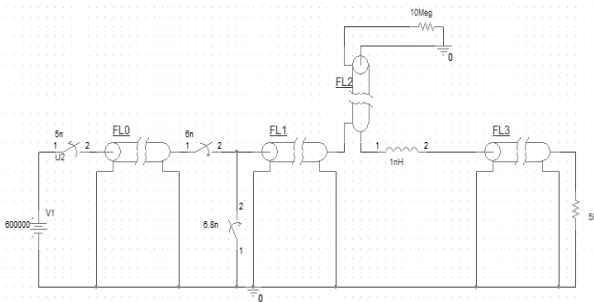


شکل (۱۴): تأثیر افزایش طول خط FL_0 بر شکل موج خروجی.

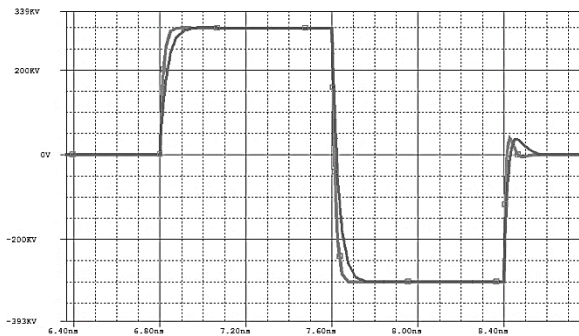
۳-۴. تحلیل فاصله بین نقطه اتصال مغزی خط FL_2 و FL_3

با توجه به اینکه این فاصله خود تشکیل یک خط انتقال مجزا می‌دهد که بین خط FL_2 و FL_3 قرار می‌گیرد، در صورت زیاد بودن طول این خط سبب به هم‌ریختگی شکل موج خروجی می‌گردد. با توجه به رابطه (۱)، امپدانس این خط برابر 85Ω می‌باشد و بسته به طول آن سبب تأخیر معینی می‌گردد. ساختار مورد نظر با فرض طول الکتریکی این اتصال برابر $0.5nS$ و امپدانس 85Ω توسط نرم‌افزارهای CST و Pspice مطابق شکل‌های (۱۵) و (۱۶) شبیه‌سازی می‌گردد. در شبیه‌سازی‌های این قسمت برای بهتر دیده شدن تأثیر زیاد شدن فاصله بین دو خط انتقال FL_2 و FL_3 ، فاصله بین دو خط برابر طول خط FL_1

با شبیه‌سازی اتصال هر دو ساختار در نرم‌افزار CST مقدار خودالقای نقطه اتصال ساختار ابتدایی برابر $1/\Delta nH$ و برای ساختار بهبود یافته $1nH$ به دست می‌آید. مقادیر به دست آمده برای خودالقا به ساختار دوقطبی کننده شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Pspice مطابق شکل (۲۲) افزوده شده و به ازای دو مقدار خودالقا فوق شبیه‌سازی انجام داده شده و نتایج شبیه‌سازی برای مقایسه بهتر در شکل (۲۳) رسم شده‌اند. نمودار با رنگ قرمز مربوط به شبیه‌سازی با خودالقا با مقدار $1/\Delta nH$ و نمودار با رنگ سبز مربوط به خودالقا با مقدار $1nH$ می‌باشد. این شکل از لحاظ زمان صعود با دقت خوبی منطبق بر شکل (۲۱) می‌باشد.



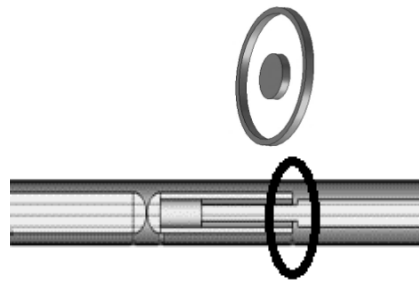
شکل (۲۲): اضافه شدن خودالقاهای به دست آمده بین خطوط انتقال FL_2 و FL_3 در ساختار دوقطبی کننده شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Pspice



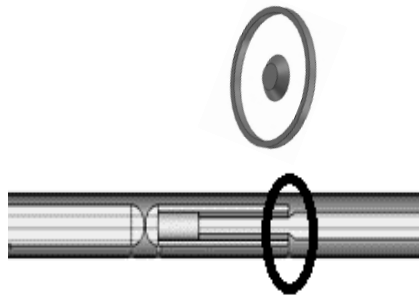
شکل (۲۳): نتایج شبیه‌سازی شکل (۲۲).

با شبیه‌سازی در این قسمت این نتیجه به دست می‌آید که ساختار شکل (۱۹) نسبت به ساختار شکل (۲۰) به دلیل کم شدن خودالقای مسیر بهتر است و کم شدن خودالقای مسیر باعث بهبود زمان صعود پالس دوقطبی می‌گردد. برای جلوگیری از رخ دادن شکست عایقی و یا رخ دادن جرقه بین پوسته خط و مغزی FL_3 این فاصله در راستای محوری خطوط انتقال اجباری می‌باشد. در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) چون فاصله بین پوسته خط انتقال FL_2 و مغزی خط انتقال FL_3 کمتر از $3mm$

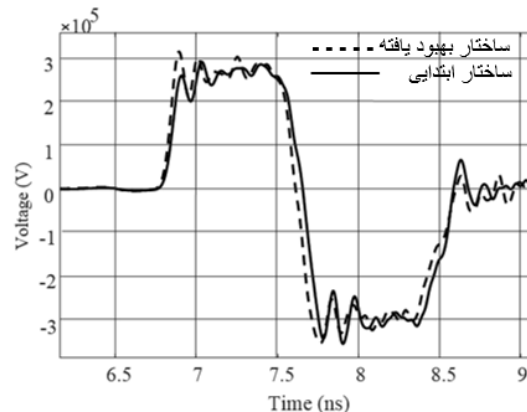
در واقعیت طول نقطه اتصال نسبت به طول خطوط FL_1 و FL_2 بسیار کم می‌باشد و می‌توان تأثیر این خط را به صورت یک المان فشرده (خودالقا^۱) در نظر گرفت. در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) دو ساختار برای این قسمت ارائه گردیده که شکل (۲۰) بهبود یافته شکل (۱۹) می‌باشد به گونه‌ای که خودالقا مسیر کمتری دارد. طول این اتصال برای هر دو ساختار $3mm$ می‌باشد. برای مقایسه این دو ساختار شکل موج خروجی این دو ساختار در شکل (۲۱) رسم گردیده است. در شکل (۲۱) موج با رنگ آبی مربوط به ساختار ابتدایی (شکل (۱۹)) و موج با رنگ قهوه‌ای مربوط به ساختار بهبود یافته (شکل (۲۰)) می‌باشد. مشاهده می‌شود که شکل موج حاصل از ساختار بهبود یافته دارای زمان صعود بهتری می‌باشد.



شکل (۱۹): ساختار دوقطبی کننده ابتدایی.



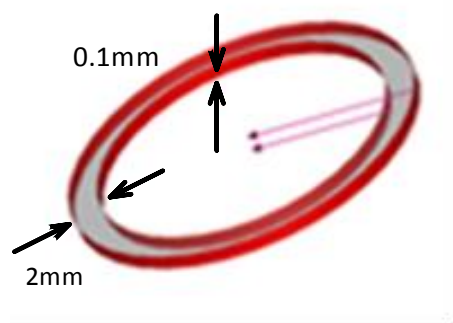
شکل (۲۰): ساختار دوقطبی کننده بهبود یافته.



شکل (۲۱): شکل موج ولتاژ خروجی ناشی از دو ساختار ابتدایی (نمودار آبی رنگ) و بهبود یافته (نمودار قهوه‌ای رنگ).

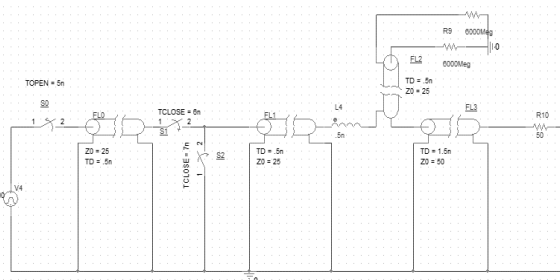
¹ Self-Inductor

به طول ۲mm و ضخامت ۰/۱mm از دوقطبی کننده که اصل بین سطح انتهایی مغزی خط FL_1 و سطح ابتدای پوسته خط FL_2 می‌باشد به صورت جداگانه مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی یک جریان از سطح بیرونی وارد شده و از سطح داخلی خارج می‌شود و از محاسبه انرژی، مقدار این خودالقا برابر $۰/۵nH$ به دست می‌آید.



شکل (۲۶): محاسبه سلف نقطه اتصال مغزی خط انتقال FL_1 و پوسته FL_2 از طریق شبیه‌سازی در قسمت مگنتواستاتیک نرم‌افزار CST.

در ادامه مقدار این خودالقا را در شبیه‌سازی با نرم‌افزار Pspice مطابق شکل (۲۷) بین خط انتقال FL_0 و FL_1 وارد می‌نماییم. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۲۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با وارد کردن این خودالقا در شبیه‌سازی دو تغییر به وجود می‌آید. تغییر اول این است که با قرار گرفتن خودالقا بعد خط انتقال FL_1 تطبیق امپدانسی مورد نظر به هم خورده و سبب به وجود آمدن یک سری ولتاژهایی بعد پالس مورد نظر خروجی و به وجود آمدن رفت و برگشت‌های اضافی موج پالسی می‌گردد. تغییر دوم نیز این است که وجود خودالقا با مقدار $۰/۵nH$ باعث افزایش زمان صعود پالس می‌گردد و مقدار این زمان صعود طبق شکل (۲۸) برابر $۲۰pS$ می‌باشد. بنابراین وجود ۲mm فاصله باعث به وجود آمدن ولتاژهای اضافی بعد پالس دوقطبی خروجی و افزایش ناچیز زمان صعود می‌گردد.

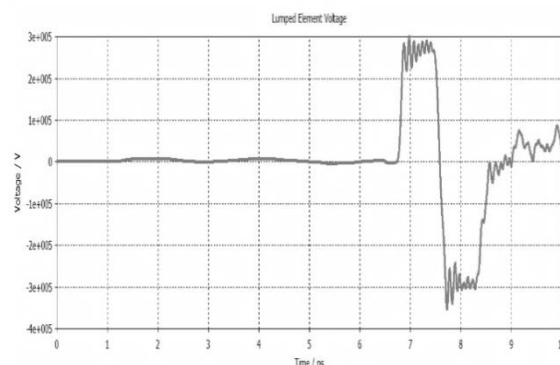


شکل (۲۷): اضافه شدن خودالقا بین خطوط انتقال FL_1 و FL_2 در ساختار دوقطبی کننده شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Pspice.

است احتمال ایجاد جرقه و اتصال کوتاه شدن مسیر در اختلاف ولتاژ $۱۵۰kV$ در بازه زمانی $۱nS$ می‌باشد که در صورت به وجود آمدن اتصال کوتاه خط FL_2 از مسیر پالس ورودی خارج شده و پالس خروجی یک پالس تک‌قطبی با زمان نزول زیاد می‌گردد. بنابراین ساختار شکل (۲۴) پیشنهاد می‌گردد. این ساختار پیشنهادی تا حد ممکن اختلاف فاصله مغزی خط انتقال FL_3 و پوسته FL_2 کم می‌کند یعنی هم‌زمان شعاع مغزی و شعاع پوسته خط انتقال FL_3 را به گونه‌ای کم می‌نماید که این کاهش امپدانس خط FL_3 را در ۵۰Ω ثابت نگه دارد. با کاهش شعاع مغزی FL_3 فاصله آن از پوسته FL_2 بیشتر شده و این به کاهش میدان الکتریکی و در نتیجه کاهش احتمال شکست عایقی کم می‌کند. در ضمن این ساختار علاوه بر کاهش میدان الکتریکی باعث کاهش سلف مسیر نیز می‌گردد. شکل موج خروجی این ساختار در شکل (۲۵) نشان داده شده است.



شکل (۲۴): ساختار ارائه شده برای کاهش میدان الکتریکی بین پوسته خط انتقال FL_2 و مغزی خط انتقال FL_3 .



شکل (۲۵): شکل موج ولتاژ خروجی شکل (۲۴).

۳-۵. تحلیل محل اتصال مغزی FL_1 و پوسته FL_2

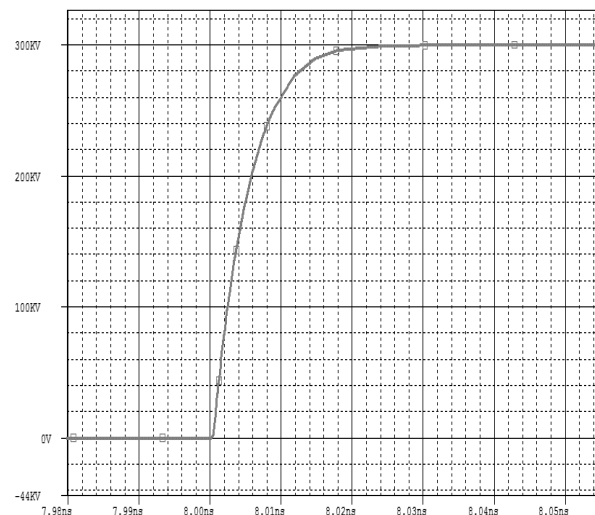
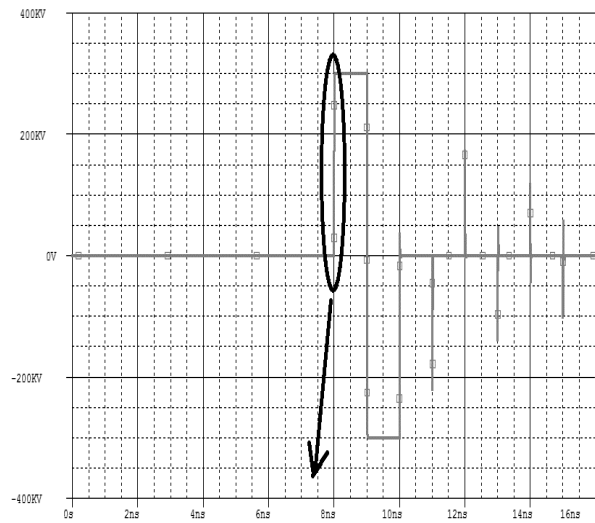
در این قسمت فاصله محل اتصال مغزی FL_1 و پوسته FL_2 مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در دوقطبی طراحی شده طول مسیر مذکور برابر تقریباً ۲mm می‌باشد. با توجه به اینکه تأخیر این مسیر در مقایسه با طول پالس گذرنده از این مسیر خیلی کم است این مسیر را به عنوان یک عنصر فشرده خودالقا در نظر می‌گیریم. شبیه‌سازی برای اندازه‌گیری خودالقای این مسیر در قسمت مگنتواستاتیک نرم‌افزار CST مطابق شکل (۲۶) انجام می‌گیرد. شبیه‌سازی به این صورت انجام گرفته است که قسمتی

در نظر گرفتن خودالقا برای تأثیر این نقطه اتصال کار صحیحی می‌باشد. چون خودالقا باعث به وجود آمدن زمان صعود در پالس دوقطبی خروجی می‌گردد یک ساختار بهبود یافته برای کم کردن خودالقا این مسیر ارائه گردید. در ادامه برای کاهش میدان الکتریکی در نقطه اتصال مغزی خط انتقال FL_2 و مغزی FL_3 تغییراتی در ساختار بهبود یافته داده شد.

د- اتصال مغزی خط انتقال FL_1 و پوسته خط انتقال FL_2 توسط خودالقای آن مورد بررسی قرار گرفت. وجود این خودالقا سبب افزایش در زمان صعود پالس و ایجاد ولتاژهایی بعد از پالس دوقطبی خروجی می‌شود.

۵. 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.
- [7] J. Cvetic, "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. Pazyinin, 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] S. Nayak, T. Kaushik and S. Gupta, "Feasibility and Performance of a Tapered Helical Pulse-Forming Line-Based Pulse Transformer," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 41, no. 4, pp. 980-984, 2013.



شکل (۲۸): نتیجه شبیه‌سازی شده برای دوقطبی کننده شکل (۲۷).

۴. نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر عوامل مختلف فیزیکی روی کیفیت شکل موج ولتاژ خروجی دوقطبی کننده بلوملین پرداخته شد. نتایج این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

الف- نشان داده شد که می‌توان به مقدار قابل توجهی در حجم عایق در خط انتقال FL_2 صرفه‌جویی نمود.

ب- طول FL_0 باید بزرگ‌تر و یا مساوی طول خط FL_1 باشد و افزایش طول FL_3 با لحاظ تلفات هادی استفاده‌شده باعث افت دامنه ولتاژ خروجی می‌گردد.

ج- طول اتصال مغزی خط FL_2 و مغزی خط FL_3 نباید زیاد باشد زیرا باعث افت دامنه و به وجود آمدن ولتاژهایی بعد پالس دوقطبی خروجی می‌گردد. تأثیر این نقطه اتصال به صورت خط انتقال و المان فشرده خودالقا مورد بررسی قرار گرفت. چون این طول نسبت به عرض پالس گذرنده از این نقطه بسیار کمتر است

- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Y. A. Andreev et al., "Gigawatt-power-level ultrawideband radiation generator," *12th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 2, pp. 1337–1340, 1999.
- [23] Y. A. Andreev et al., "High-power ultrawideband electromagnetic radiation generator," *11th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 1, pp. 730–735, 1997.
- [24] 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)
- [25] J. Lehr and P. Ron, "Foundations of Pulsed Power Technology" Wiley-IEEE Press, 2017.
- [26] A. Farajzadeh, S. Kaboli, "Analysis of Spark Gap Shape Effect on the Output Voltage of Blumlein Bipolar Pulse Former," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 7, no. 2, 2020 (in persian).
- [13] S. Ahn, H. Ryoo, J. Gong and S. Jang, "Robust Design of Solid-State Pulsed Power Modulator Based on Modular Stacking Structure," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 30, no. 6, pp. 2570-2577, 2015.
- [14] A. S. Kesar, Y. Sharabani, I. Shafir, S. Zoran, A. Sher, "Characterization of a Drift-Step-Recovery Diode Based on All Epi-Si Growth," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 44, no. 10, pp. 2424-2428, 2016.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] V. G. Shpak, M. R. Oulmasculov, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin, "Active former of monocyte high-voltage subnanosecond pulses," *12th IEEE International Pulsed Power Conference*, vol. 2, pp. 1456–1459, 1999.
- [18] 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.
- [19] 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.

Physical Design Considerations of Blumlein Bipolar Pulse Former

A. Farajzadeh¹, Sh. Kaboli^{*2}

Associate Professor of Sharif University

(Received: 27/02/2020; Accepted: 08/06/2020)

Abstract

Blumlein bipolar pulse former is a widely used bipolar pulse generator with good performance. This structure produces a bipolar pulse from a unipolar pulse using the reflection theorem of the waves in transmission lines. Practical considerations in the design process of Blumlein bipolar pulse former is an important issue from the view point of output voltage waveform quality and construction cost. In this paper, a Blumlein bipolar pulse former has been simulated and analyzed to investigate the effect of different physical parameters on the output voltage waveform. 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