

طراحی خط شکل دهی پالس الکترومغناطیسی بلوملین و بررسی رفتار آن در برابر اغتشاش پارامترها

کاظم پوربدخشان

استادیار - دانشگاه صنعتی قوچان - قوچان - ایران

k.poorbadakhshan@qiet.ac.ir

چکیده: در مقاله پیش روی شما، پارامترهای مدل خط شکل دهی پالس بلوملین با استفاده از پدیده انعکاس موج ولتاژ در خطوط انتقال به طور دقیق محاسبه شده است. تأثیر اغتشاش پارامترهای مختلف این مدل از جمله شعاع هادی، طول خط، امپدانس بار و دی الکتریک خط، بر شکل پالس ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس برای داشتن یک پالس تیز و صاف پارامترهای خط به صورت بهینه طراحی شده اند. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی طراحی کمک گرفته شده است. در نهایت برای تأیید درستی پارامترهای مدل به دست آمده، پالس خروجی خط طراحی شده با پالس های ایده آل و نرمال در یک خط واقعی مقایسه شده اند. پالس های خروجی این سیستم دارای کاربردهای فراوانی در حوزه های صنعتی، زیست محیطی، پزشکی و نظامی هستند.

واژه های کلیدی: پالس الکترومغناطیسی، خط شکل دهی پالس بلوملین، اغتشاش پارامترها، طراحی، بهینه سازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۶

نام نویسنده ی مسئول: کاظم پوربدخشان

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - قوچان - دانشگاه صنعتی قوچان - گروه برق

اما این انرژی باید در طول ده نانو ثانیه (10^{-9}) به سوخت منتقل شود. این مقدار برابر صد تراوات (10^{12}) است. تولید و کنترل پالس‌های توان بالا و پر قدرت الکترومغناطیسی، نوعی فناوری پیشرفته و پیچیده به شمار می‌رود [۱۲ و ۱۳].

یک پالس الکترومغناطیس در مقیاس بزرگ می‌تواند از یک انفجار هسته‌ای بزرگ در جو به وجود آید. این روش به‌عنوان پالس الکترومغناطیس با توان بالا نامیده می‌شود [۱۴ و ۱۵]. نمونه‌های مشابه پالس توان بالای الکترومغناطیسی در مقیاس کوچکتر، می‌توانند بدون استفاده از دستگاه‌های هسته‌ای و یا مواد رادیواکتیو ایجاد شوند. این روش مایکروویو/میکروویو توان بالا نامیده می‌شود. برای تولید این پالس‌ها اغلب از ژنراتور مارکس، بار غیرخطی یا دیود و خط انتقال هم‌محور استفاده می‌شود. خطوط انتقال، توانایی تغییر شکل پالس مورد نظر را دارند. افزون بر این، بارهای غیرخطی و کلیدهای خاصی نیز در سیستم تولید پالس پر قدرت الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند که می‌توانند به‌نوبه‌ی خود به تولید و شکل‌دهی پالس مطلوب کمک کنند. عوامل بسیاری از جمله ساختار هندسی خط، ثابت دی‌الکتریک، ظرفیت شکست الکتریکی و همچنین عوامل خارجی مانند امیدانس بار و نوع آن، روی شکل EMP خروجی و بازده خط مؤثر هستند [۱۶].

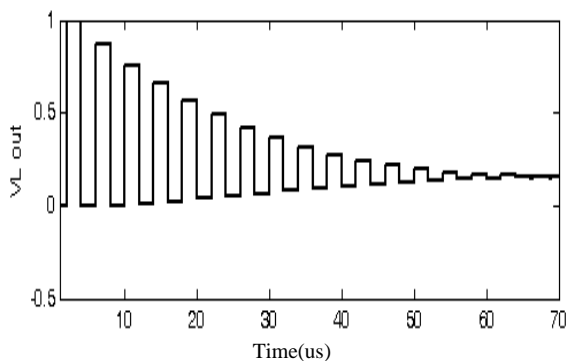
برای طراحی یک خط انتقال با خروجی مطلوب از نظر شکل ظاهری پالس توان بالا، مقدار ولتاژ و توان خط لازم است ابتدا متغیرهای پارامترهای تأثیرگذار بر خروجی و شکل پالس شناسایی شوند. در ادامه این مقاله تأثیر هر یک از پارامترها بر روی شکل پالس ولتاژ خروجی بررسی و شبیه‌سازی می‌گردند. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA^*) پارامترهای خط شکل‌دهی پالس بلوملین ($BFPL^*$) طراحی و بهینه‌سازی می‌شود. دلیل استفاده از این الگوریتم میزان دقت و اعتبار آن و سهولت بکارگیری آن در نرم‌افزار است. متغیرهای مسئله بهینه‌سازی مورد نظر، پارامترهای اجزای اصلی مدار از جمله مولد مارکس، کلید، بار غیرخطی و پارامترهای فیزیکی خط از جمله طول، شعاع، دی‌الکتریک و امیدانس بار هستند. در انتها برای تأیید صحت نتایج طراحی و سنجش درستی آن، خروجی خط طراحی‌شده با خروجی ایده‌آل و خروجی نرمال یک خط واقعی مقایسه می‌شود.

۲- مدل‌سازی BPFL

استفاده از انواع سری و موازی BPFL در مقایسه با PFL های معمولی دارای این مزیت هستند که می‌توانند خطوط مناسب‌تر و صاف‌تری تولید نمایند [۱۷]. در سامانه‌های مولد پالس EMP اغلب از یک ژنراتور مارکس برای شارژ BPFL استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای بررسی و مدل‌سازی BPFL به کار گرفته می‌شوند [۱۸ و ۱۹]. در این مقاله با استفاده از کنترل پدیده انعکاس موج ولتاژ در خطوط انتقال این خط مدل می‌گردد. در این روش، موج منتشرشده در طول خط با برخورد به قسمت انتهایی خط به سه حالت مختلف منعکس می‌شود. این حالت‌ها عبارت‌اند از حالت تطبیق امیدانس، حالت اتصال

پالس‌های الکترومغناطیسی (EMP^1) در زیرشاخه‌های صنعتی، زیست‌محیطی، پزشکی و نظامی کاربردهای فراوانی دارند. اگرچه ژنراتورهای تک ضربه‌ای توان پالسی^۲ که داری قله جریان بالا هستند، ابتدا برای مقاصد نظامی و گداخت هسته‌ای استفاده می‌شدند [۱]. اما با گذشت زمان ژنراتورهای توان پالسی دارای قدرت تکرار و با توان متوسط برای کاربردهای صنعتی و زیست‌محیطی به‌صورت گسترده مورد مطالعه و استفاده قرار گرفتند [۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶]. معمولاً در اکثر این موارد از انرژی ذخیره‌شده برای تولید میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌شود و نهایتاً از می‌توان این میدان‌ها را برای شتاب دادن ذرات باردار، تولید اثرات گرمایی، شیمیایی، مکانیکی، امواج الکترومغناطیسی استفاده نمود. افزون بر این، میدان‌های الکترومغناطیس عامل حمل انرژی به‌صورت اشعه‌ی ایکس، میکرو موج و لیزر می‌باشند و می‌توانند فشارهایی در محدوده‌ی یک‌دهم گیگا پاسکال و بیشتر را امکان‌پذیر سازند. پیشرفت‌های کنونی در فناوری توان پالسی و کاربرد آن در زمینه‌های زیست‌محیطی و صنعتی از نقطه‌نظر اقتصادی نیز به این فناوری اهمیت بخشیده است. هم‌اکنون پیشرفت‌های فراوانی در این زمینه انجام‌شده و اکنون آزمایشگاه‌های معتبری مجهز به ابر ماشین‌های تولید پالس پر قدرت EMP در چندین کشور در حال فعالیت هستند. به‌عنوان مثال در کشور آلمان از سال ۱۹۹۰ تحقیقات زیادی در زمینه‌های تجاری‌سازی توان پالسی آغاز شده است که این تحقیقات خبر از پتانسیل ویژه‌ی توان پالسی در بازارهای اقتصادی می‌دهد [۷]. همه‌ی این اثرات را می‌توان برای کاربردهایی نظیر تغییرات مولکولی، تغییر شکل، تغییر فشار، تغییر نقطه ذوب، خرد کردن یا تبدیل مواد به اجزای ریزتر مانند تولید پودر و ماسه از بتن مستعمل یا شکستن ذرات سنگین مواد نفتی و همچنین تخریب مواد یا نابودسازی یک ماده خاص مانند نابودی یک صخره به کار گرفت [۸]. همچنین برای تغییر سطح مواد آلی و غیر آلی نیز قابل استفاده هست. پالس‌های الکترومغناطیس به‌عنوان سلاحی برای جنگ سایبری یا تروریسم سایبری برای مختل کردن ارتباطات و سایر بخش‌ها و زیرساخت‌های حیاتی قابل استفاده هستند [۹]. در جنگ جهانی دوم برای نخستین بار از فناوری EMP در رادارها نیز استفاده شد [۱۰].

در حالت عادی، توان الکتریکی به‌صورت پیوسته و با توان کم تولید و به‌صورت آهسته و پیوسته به سمت بار حرکت می‌کند. به‌طور مثال، در یک دستگاه تلویزیون در طول سه ساعت حدود یک مگا ژول (10^6) انرژی مصرف می‌شود. این مقدار مصرف برابر ۱۰۰ وات (ژول بر ثانیه) است [۱۱]. اما در کاربردهای خاص، همچون پروژه‌های گداخت هسته‌ای و برنامه سلاح‌های انرژی مستقیم، انرژی باید با سرعت زیاد به بار منتقل شود. به‌طور مثال در عملیات گداخت هسته‌ای، به یک مگا ژول انرژی نیاز است (همان مقدار لازم برای کار تلویزیون در سه ساعت)،

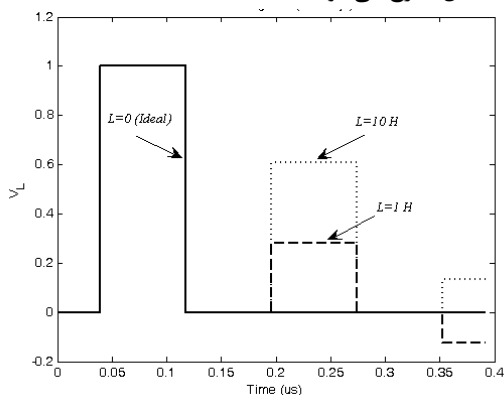


شکل (۲): ولتاژ بار برای امپدانس غیر خطی

همان گونه که دیده می‌شود، ولتاژ خروجی، پالس‌هایی تکراری با مقدار نرمال شده متناسب می‌باشند. به عبارتی موج در طول خط حالت رفت و برگشتی دارد. زمان هر دوره تناوب، متناسب با سرعت حرکت موج در سیال و همچنین طول خط است.

اثر بار سلفی

در شکل (۲) بار غیر خطی Z به صورت امپدانس مقاومتی خالص در نظر گرفته شده است. حال اگر امپدانس بار به صورت مقاومتی-سلفی باشد، ولتاژ انعکاس ابتدای خط و ولتاژ خروجی BPFL به صورت شکل (۳) خواهد بود. این شکل موج نشان می‌دهد با افزایش مقدار سلف، پالس از حالت ایده‌آل خارج می‌شود.



شکل (۳): تأثیر امپدانس سلفی در ولتاژ خروجی

اثر تغییر ثابت دی‌الکتریک محیط واسط

همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شد، BFPL از چند خط معمولی یا هم‌محور تشکیل شده است. هر یک از این کابل‌ها از دو هادی هم‌محور و دی‌الکتریک داخل آن‌ها تشکیل شده‌اند. پارامتر ثابت دی‌الکتریک (ϵ)، یکی از پارامترهای اساسی در طراحی BPFL است. این پارامتر به طور صریح مقدار سرعت موج در سیال و زمان انتقال پالس یا به عبارتی ثابت زمانی را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو انتظار داریم با تغییر ϵ در خط انتقال ایده‌آل، زمان

کوتاه و حالت اتصال باز، در حالت تطبیق امپدانس موج ارسال شده، هیچ برگشتی ندارد. در حالت اتصال کوتاه، ولتاژ نقطه اتصال کوتاه صفر است در نتیجه موج با علامت منفی برمی‌گردد. اما در حالت اتصال باز، ولتاژی با همان دامنه و علامت برمی‌گردد. در این حالت ولتاژ این نقطه برابر ولتاژ پالس است. برای جلوگیری از تداخل امواج باید مشخصات BPFL به گونه‌ای انتخاب شود که طول پالس خروجی، کوچک‌تر از طول پالس موج ولتاژ شارژ شده اولیه باشد. از این حالت‌ها برای تطبیق امپدانس و معکوس سازی پالس‌ها نیز استفاده می‌شود. نمای BPFL به صورت ساده با ترکیبی از خط، کلید و بار در شکل (۱) ترسیم شده است [20]. قابلیت ساخت این سامانه بر روی PCB نیز وجود دارد [21].



شکل (۱): ترسیم ساده‌ای از خط شکل‌دهی پالس BPFL دو حالتی

۱-۲- تأثیر پارامترهای مختلف BPFL بر پالس

خروجی

پالس EMP مورد انتظار با تغییر پارامترهای BPFL تغییر می‌یابد [۲۲]. عمده این تغییرات در اثر تغییر بار غیر خطی، دی‌الکتریک داخل خط، شعاع هادی‌ها و طول خطوط است. در این قسمت ضمن معرفی هر یک از این پارامترها، تأثیر اغتشاش آن‌ها بر توپولوژی پالس ولتاژ خروجی بررسی می‌شود [۱۷]. فرض کلی در مدل‌سازی این است که هیچ‌گونه پیش‌داوری نسبت به متغیرها و اهمیت آن‌ها وجود ندارد. با این فرض لازم است تمامی متغیرها از لحاظ اهمیت مورد بررسی قرار گیرند.

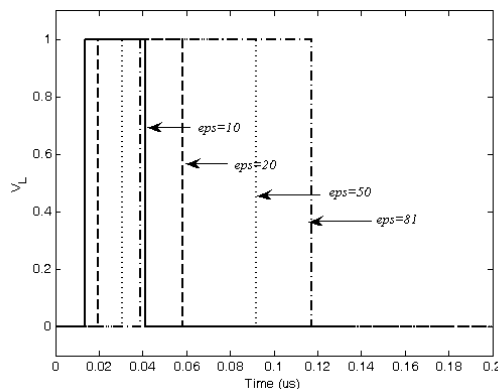
اثر بار غیر خطی متغیر بازمان

در BPFL منظور از بار غیر خطی متغیر بازمان، دیودی با امپدانس مشخصه زیر است [12]:

$$Z = \frac{427}{\sqrt{V}} \left(\frac{d^2}{A} \right) (\Omega) \quad (1)$$

که در آن Z امپدانس دیود، A مساحت کاتد، d اندازه شکاف کاتد-آند، V ولتاژ اعمال شده به شکاف بر حسب مگاولت (MV) است. با اتصال این دیود به BPFL، مقدار امپدانس بار با ولتاژ دو سر آن از رابطه غیر خطی متغیر بازمان (۱) پیروی خواهد کرد. حال برای بررسی بیش‌تر تأثیر این امپدانس بر ولتاژ خروجی BPFL رسم می‌شود.

سیر موج در طول خط و طول پالس تغییر کنند. شکل (۴)، این مطلب را به طور واضح بیان می کند.



شکل (۴): تأثیر تغییر پارامتر ثابت دی الکتریک بر ثابت زمانی پالس خروجی

تأثیر شعاع هادی‌ها

در این قسمت تأثیر تغییر شعاع هادی‌ها بر ولتاژ خروجی بررسی می شود. با توجه به این که مقدار امپدانس هر خط با لگاریتم نسبت شعاع هادی‌های به صورت زیر است [11]:

$$Z_1 = 60\sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \cdot \ln(r_2 / r_1)$$

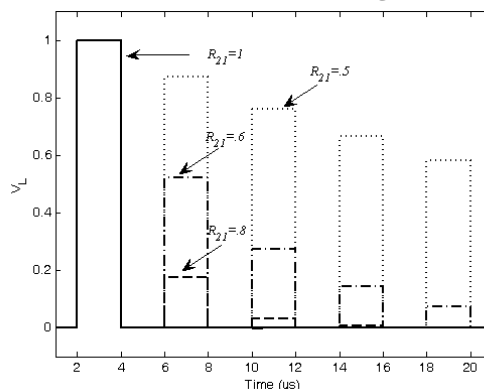
$$Z_2 = 60\sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \cdot \ln(r_3 / r_2)$$

که در I_1 و I_2 شعاع بیرونی و درونی هادی خارجی ر I_2 و I_3 همین مقادیر برای هادی داخلی در خط انتقال می باشند. همچنین برای تطبیق یک خط با امپدانس‌های متفاوت باید مقدار امپدانس بار برابر مجموع مزدوج مختلط امپدانس‌های دو خط باشد.

$$Z_c = Z_1 + Z_2$$

$$Z_{L_match} = Z_c$$

از این رو انتظار داریم با تغییر نسبت شعاع هادی‌ها به یکی از حالت‌های تطبیق امپدانس نزدیک شویم. شکل (۵) تغییر ولتاژ بار نسبت به تغییر (r_2 / r_1) را نشان می دهد.



شکل (۵): تغییر رفتار ولتاژ بار نسبت به تغییر نسبت شعاع

$$R_{21} = (r_2 / r_1)$$

به طور مشابه تغییر نسبت (r_3 / r_2) همین رفتار را برای خروجی خواهد داشت. شکل (۵) نشان می دهد که در حالت تطبیق امپدانس برای ایجاد پالس ایده آل زمانی اتفاق می افتد که نسبت طول خطوط به یکدیگر برابر یک باشد. با افزایش این نسبت به نمایش شکل (۲) نزدیک می شود.

تأثیر تغییر طول خطوط

یکی دیگر از پارامترهای موجود در طراحی خط انتقال بلومین طول خط است. با توجه به این که مقدار اثر خازنی هر خط با طول خط نسبت مستقیم دارد و این نسبت در رابطه

$$C_1 = l_1 \sqrt{\epsilon_r} / Z_0 c$$

$$C_2 = l_2 \sqrt{\epsilon_r} / Z_0 c$$

$$C = C_1 + C_2$$

نشان داده شده است، که در آن c سرعت نور و C_i ظرفیت خازن متناسب با خط است. افزون بر آن با توجه به تأثیر مقدار خازن خط در رفتار مدارهای معادل با تلفات و بدون تلفات، انتظار داریم تغییر طول در ولتاژ تخلیه بلومین نیز مؤثر باشد. در این صورت بهترین حالت می تواند تساوی دو خط باشد.

۳- طراحی و شبیه سازی

در این قسمت مسئله طراحی BPFL مورد توجه قرار می گیرد [۱۶]. متغیرهای مسئله طراحی چهار پارامتر BPFL یعنی طول خطوط، شعاع آن‌ها، مقدار بار و دی الکتریک است. برای تأیید کارایی طراحی چند معیار تعریف می شود:

۱. زمان گذرا (نانوثانیه): زمانی که تغییرات پالس صفر می شود. هر چه این زمان کمتر باشد، به حالت بهینه نزدیک تر است.
۲. بازه انرژی (درصد): مقدار انرژی تلف شده را نشان می دهد. نزدیک شدن به صد درصد حالت بهینه مسئله است.
۳. ضریب تبدیل ولتاژ (بدون بعد): این معیار در حالت بهینه باید نزدیک یک باشد.

در این تحقیق برای بهینه سازی از GA و نرم افزار MATLAB استفاده شده است. عملگرهای تولید مثل و جهش و از تابع هزینه جریمه برای شناسایی میزان نزدیک شدن جواب‌های تولید شده توسط الگوریتم به پالس ایده آل بهره گیری شده است. این الگوریتم به لحاظ قدرت تکنیکی و شناسایی نقطه بهینه سراسری، یکی از بهترین الگوریتم‌های و کاربردی جامعه مهندسی امروز است. نقطه کلیدی و حساس این تحقیق استفاده از این الگوریتم در یافتن پاسخ‌های بهینه است. نتایج بهینه سازی برای پارامترهای یک خط واقعی انجام شده است. جدول (۱) معیارهای مورد نظر را برای مسئله بهینه سازی کامل و مسائل زیر بهینه که با پارامترهای کمتر انجام شده، مقایسه می کند.

جدول (۱): مقایسه نتایج بهینه‌سازی برای مسائل مختلف

نوع مسئله	زمان گذرا (ns)	بازده انرژی (%)	ضریب تبدیل ولتاژ
بدون بهینه‌سازی	6.1505	95.2896	0.89384
دی‌الکتریک	8.8549	98.8866	1.09255
طول خطوط	6.1505	95.8873	1.03439
شعاع خطوط	6.1505	95.9991	1.00225
بار	6.1505	98.8872	1.09284
تمام موارد	7.7933	99.9991	1.0013

برای تولید باکیفیت این گونه پالس‌ها استفاده از BFPL توصیه می‌گردد. با تغییر مشخصات فیزیکی خط و دی‌الکتریک آن می‌توان به انواع جالبی از پالس‌ها با اندازه‌ها و طول موج‌های گوناگون دست یافت. در این مقاله تأثیر اغتشاش‌های مختلف بر هر یک از این پارامترها شبیه‌سازی شد. هرچند ممکن است بسیاری از متغیرهای شناسایی شده در این مقاله بدیهی به نظر آیند، اما فرآیند مدل‌سازی حکم می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که بار سلفی اثر نامطلوبی بر خروجی ایجاد می‌نماید. پارامتر ثابت دی‌الکتریک اثر شدیدی بر طول پالس دارد. نسبت شعاع هادی‌ها به یکدیگر نزدیک شدن به حالت تطبیق امپدانس را در پی دارد. همچنین برای رسیدن به پالس صاف و ایده‌آل باید طول خطوط هم‌اندازه باشند. استفاده از GA برای طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای BFPL نتیجه بسیار مثبتی در مقدار دستیابی به راندمان و ضریب تبدیل ولتاژ مناسب دارد. در مقایسه خط طراحی شده با GA، خط واقعی و پالس ایده‌آل نزدیک بودن طراحی به مقدار ایده‌آل و برتری مناسب آن نسبت به خط واقعی را نشان می‌دهد.

مراجع

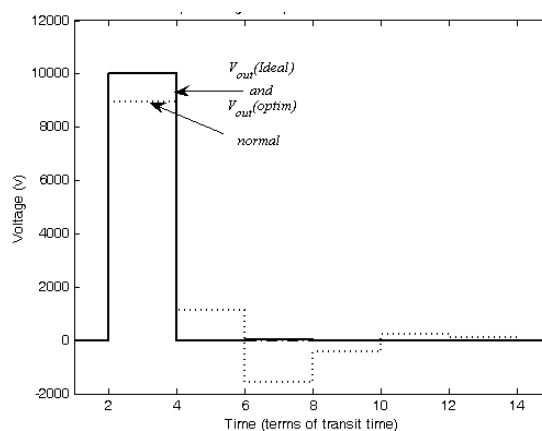
- [1] M. Abdelsalam; Y. Eyss, "Pulsed magnetic energy storage for space applications," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 23, no. 2, pp. 533 - 536, 1987.
- [2] A. H. El-hag, S.H jayaram, M,W Griffiths, "inactivation of naturally grown microorganisms in orange juice using pulsed electric fields," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 34, pp. 1413-1415, 2005.
- [3] C. E. Pollock, "Electromagnetic Effects on the Natural Hydrodynamic Instability of Stretching, High Velocity Metallic Jets," in Proceedings of Mega gauss VI, Mega gauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications, Nova Science Publishers, 1994.
- [4] K. L. Felch, B. G. Danly, H. R. Jory, K. E. Kreischer, W. Lawson, B. Levush, R. J. Temkin, "Characteristics and Applications of Fast-Wave Gyrodevices," Proc. of the IEEE, vol. 87, 1999.
- [5] M. Fincan, "Processing Fluid foods with high intensity pulsed electric field," M.Sc. thesis, Lund Institute of Technology, 1998.
- [6] E. J. M. Heesch, "Pulsed corona for gas and water treatment," in 11th IEEE International pulsed power conf..
- [7] T. H. G. G. Weise, M. J. Löffler, "Overview on Pulsed Power Applications. In Germany," in the International Conference on Pulsed Power Applications, Gelsenkirchen, Germany, 2001.
- [8] H. Inoue, I. V. Lisitsyn, H. Akiyama, I. Nishzawa, "Drilling of Hard Rocks by pulsed power," IEEE Electer. Insul. Mag., vol. 16.
- [9] E. Schamiloglu, "High Power Microwave Sources and Applications," IEEE MTTs, 2004.
- [10] R. J. Baker, J. H. Broske, N. C. Luhman, G. S. Nusinovich, Modern Microwave and Millimeter wave Power Electronics, Piscataway: IEEE Press, 2004.
- [11] S. T. Pai, Q. Zhang, Introduction to High Power Pulse Technology, World Scientific, 1995.
- [12] A. Charlton, P. Ewart, A. Simple, "High Power,

مقایسه نتایج مندرج در جدول (۱) نشان می‌دهد که نگاه کلی و جامع‌نگر به متغیرها تأثیر بهتری از جداسازی و بررسی تک وجهی آن‌ها دارد. افزون بر آن نشان می‌دهد که ضریب دی‌الکتریک در تغییر زمان انتقال بسیار مؤثرتر از پارامترهای دیگر است. تغییر پارامترهای طول خطوط، شعاع آن‌ها، بار و دی‌الکتریک تأثیر بیش‌تری در کنترل ولتاژ خروجی از تغییر پارامتر طول خط دارند. همچنین بهینه‌سازی پارامترها باعث افزایش بازده انرژی تا حدود ۱۰۰ درصد و نزدیکی ضریب تقویت ولتاژ به مقدار واحد می‌گردد. پس از بهینه‌سازی، با کاربرد پارامترهای به‌دست‌آمده از مسئله بهینه‌سازی، خروجی BPFL را برای حالت‌های ایده‌آل، بهینه و بدون بهینه‌سازی در شکل (۶) مقایسه می‌نماییم.

این مقایسه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی با GA خروجی BPFL را تا حد ایده‌آل بالا برده و یک پالس EMP بسیار صاف تولید کرده است.

۴- نتیجه‌گیری

پالس‌های پر قدرت EMP افزون بر کاربردهای فراوان در صنایع، زیست‌محیطی و نظامی، در افزایش سطح و کیفیت زندگی بشر بسیار مفید هستند. ساخت و تولید این پالس‌ها در سطوح مختلف انرژی و توان انجام شده است [23]. به همین ترتیب شبیه‌سازی عملکرد آن در حالت‌های گوناگون راهبرد بسیاری مناسبی برای بهینه‌سازی و ساخت مؤثرتر آن خواهد بود [24-25].



شکل (۶): ولتاژ خروجی BPFL برای حالت‌های ایده‌آل (-)، و طراحی بهینه (-) و معمولی (...)

-
- ² Pulse Power
 - ³ GA: Genetic Algorithm
 - ⁴ BPFL: Blumlein Pulse Forming Lines
 - ⁵ Crossover
 - ⁶ Mutation

- Nanosecond Pulse," Optics Communications, vol. 50, no. 4, pp. 241-244, 1984.
- [13] P. W. Smith, Transient electronics pulsed circuit technology, John Wiley & Sons, 2002.
- [14] C. Wilson, "high altitude electromagnetic Pulse (HEMP) and high power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessment," US Congress, 2007.
- [15] 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.
- [16] B. M. Novac; M. Wang; I. R. Smith; P. Senior, "A 10 GW Tesla-Driven Blumlein Pulsed Power Generator," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 10 , pp. 2876 - 2885, 2014.
- [17] J. Oh; J. Rhee; C. Lee; K. Ko; J. Kim, "Numerical analysis and experiment of Blumlein-nonlinear transmission line," in IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 2015 .
- [18] M. Twati, "A Novel Distributed Parameter Model of a Blumlein-Line Laser Circuit Including the Effect of Time Varying Spark-Gap Inductance and Resistance," in 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2014.
- [19] A. I. Pushkarev; Y. I. Isakova; I. P. Khaylov, "Improvement in the performance statistics of a Blumlein in double pulse mode," in IEEE International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS), 2014.
- [20] Haddad, A., D.F. Warne, Advances in High Voltage Engineering, IET, 2004.
- [21] Y. Mi; J. Wan; C. Bian; Y. Zhang; C. Yao; C. Li, "A Multiparameter Adjustable, Portable High-Voltage Nanosecond Pulse Generator Based on Stacked Blumlein Multilayered PCB Strip Transmission Line,," IEEE Transactions on Plasma Science, no. 99, pp. 1 - 8, 2016.
- [22] J. L. Koriath, "A Computational Analysis of Stacked Blumlein Pulse Generators," PhD Thesis, Univ. of Texas, 1998.
- [23] جلالی تهمینه، بررسی موجبر جداکننده توان بهینه بلور فوتونی، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۳، شماره ۴، ۱۳۹۵.
- [24] عریضی ه.، سلامی ا. و چایچی زاده م.، بهینه سازی و افزایش پهنای باند پیوند خط شاخه ای موجبری مجتمع شده در زیر لایه به روش حداقل، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۲، ۱۳۹۴.
- [25] دل آرام س.، حاج قاسم ح. و عرفانیان ع. و علی احمدی م.، طراحی، شبیه سازی و ساخت سوئیچ خازنی RFMEMS بر روی بستر آلومینا، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۲، ۱۳۹۴.

زیر نویس ها

¹ EMP: Electro-Magnetic Pulse

