



بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران

۱۵ و ۱۶ فروردین ۱۳۹۵ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

سیستم مجتمع اسپارک گپ مناسب برای دستگاه پلاسمای کانونی تا انرژی های محدوده یک مگاژول

بشیری سپیده^(۱)، اسماعیلی عبدالرضا^(۱)، صدیق زاده اصغر*^(۱)، دامپیده وحید^(۱)

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

برای تولید پلاسمای مؤثر با روش‌های مختلف، پالسهای سریع و کوتاه مورد نیاز می‌باشند. در این مقاله یکی از حیاتی‌ترین المان‌های تولید پلاسما توصیف شده است: سوئیچ اسپارک گپ. سوئیچ با مدار تریگر *Inductor Capacitor Resistor (LCR)* استفاده شده است. با روش ترانسفورماتور خط انتقال برای سیستم همزمانی و دسترسی به مقادیر بالای جریان میسر می‌شود. در این مقاله یک سیستم توان پالسی خازنی ۱ مگا ژول طراحی و شبیه سازی گردیده است. بررسی نتایج شبیه سازی به ما نشان می‌دهد که هر چه فاصله هوایی کلیدها کمتر شود خاصیت سلفی مدار کمتر شده و پالس جریان خروجی دارای زمان صعود کمتر و جریان پیک بالاتری می‌شود.

کلمات کلیدی: سیستم توان پالسی، کلید اسپارک گپ، کلیدزنی، تریگرینگ، ترانس خط انتقال

مقدمه:

برای کاربردهایی در مقیاس بزرگ صنعتی که از ادوات توان پالسی با پالسهای بسیار کوتاه نانو ثانیه ای استفاده می‌شود، معمولاً کلیدهای اسپارک گپ به کار می‌رود. کلید اسپارک گپ خود به دو گروه با تریگرینگ خودکار و یا با تریگرینگ اجباری تقسیم می‌شوند. برای کلیدهای اسپارک گپ طول عمر عامل اصلی محدود کننده می‌باشد. از دیگر محدودیتهای کلید اسپارک گپ محدودیت نرخ تکرار پالس و خوردگی شدید الکترودها، تخریب عایق، خاصیت سلفی بالای قوس جرقه، ولتاژ آستانه و تریگرینگ پر هزینه را می‌توان نام برد. با توجه به این محدودیت‌ها ساختار انحراف میدان گزینه‌ی پیشنهادی مناسبی برای اسپارک گپ با سه الکتروده می‌باشد. در ساختار انحراف میدان، الکتروده تریگر روی یک سطح هم پتانسیل در میدان قرار داده می‌شود. اسپارک گپ‌های هم‌محور نوع جدیدی از ساختار انحراف میدان است که مناسب کاربرد در دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی بالا است. برای یک کلید زنی قابل اطمینان کلید از یک مدار تریگرینگ LCR استفاده می‌کند [۱]. به منظور تولید توانهای پالسی سطح بالا از توپولوژی سوئیچهای چند گانه (ترانسفورماتور خط انتقال) استفاده می‌گردد. از این توپولوژی برای تولید پالس ولتاژ یا جریان بالا یا ترکیبی از هر دو و همچنین برای همزمانی سوئیچها استفاده می‌شود [۲].

روش کار:

شکل ۱ نمای کلی از کلید اسپارک گپ که با کابل هم محور طراحی شده را نشان می دهد. به دلیل فاصله‌ی کوتاه الکتروود تریگر اندوکتانس سوئیچ کم است. فاصله بین الکتروودها و حداکثر فشار به وسیله حداکثر ولتاژ قابل تحمل کلید مشخص می شود. برای یک کلید هم محور اختلاف ولتاژ بین آند و تریگر و بین کاتد و تریگر نزدیک به نصف ولتاژ کلید زنی می باشد. از آنجا که کلید باید در مدار مولد پالس با سرعت بالا مورد استفاده قرار گیرد، خاصیت سلفی باید تا حد ممکن پایین نگه داشته شود. مشکلات در رابطه با طول عمر کلید اسپارک گپ مربوط به خوردگی الکتروودها می شود. اغلب الکتروود تریگر در نتیجه کوچک بودنش حیاتی ترین بخش می باشد. افزایش طول عمر کلید با روشهای گوناگون به دست می آید. اولاً حجم الکتروودی که اجازه تبخیر شدن دارد باید افزایش یابد، دوم اینکه جنس الکتروودها از موادی با نرخ تبخیر پایین استفاده گردد و سوم اینکه برای هر پالس انرژی کمتری در نظر بگیریم. جز روش سوم همه راه حل هایی که ذکر شد در کلید حال حاضر وجود دارند. آخرین نکته طراحی کلید، مربوط به عملکرد پایدار کلید می باشد. عمومی ترین راه اطمینان از عملکرد پایدار کلید اسپارک گپ استفاده از سیگنال تریگر میباشد. برای این کلید تریگرینگ با یک مدار LCR اجراء شده است که قابلیت اطمینان کلید زنی را بالا می برد [۱]. شکل ۱ (a) ساختمان یک کلید اسپارک گپ هم محور را نشان می - دهد (فلشها در پایین قسمت مسیر جریان هوا را مشخص می کنند). قسمت (b) قسمت بار و مدار راه انداز تریگرینگ را نشان می دهد.

روش سیستم تریگرینگ پیشنهادی LCR:

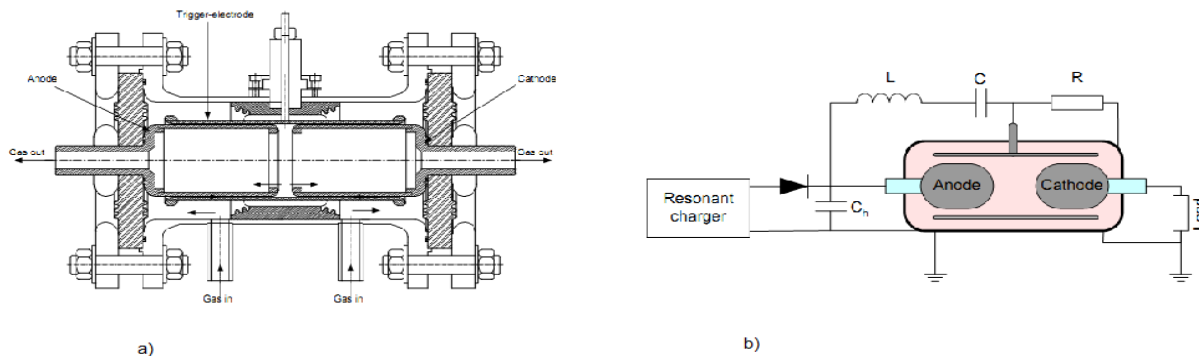
خازن ذخیره کننده C_h به صورت تشدید با مدار تغذیه بار دار می شود. ولتاژ باردار کردن روی آند با معادله زیر بیان می شود:

$$V(t) = \frac{V_{Max}}{2} (1 - \cos(\omega t)) \quad (1)$$

V_{Max} بیشترین ولتاژ بر روی C_h و ω فرکانس تشدید باردار کردن منبع می باشد. در خلال بار دار کردن C_h ولتاژ

V_T بر روی الکتروود تریگر با رابطه زیر تغییر می کند:

$$V_T(t) = \frac{V_{Max}}{2} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau_{LCR}^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau_{LCR}^2} \cdot [\exp(1 - \frac{t}{\tau_{LCR}}) - \cos(\omega t)] + \frac{V_{Max}}{2} \cdot \frac{\omega \cdot \tau_{LCR}}{1 + \omega^2 \cdot \tau_{LCR}^2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$



شکل (۱): ساختمان یک کلید اسپارک گپ هم محور و مدار تریگر آن [۱].

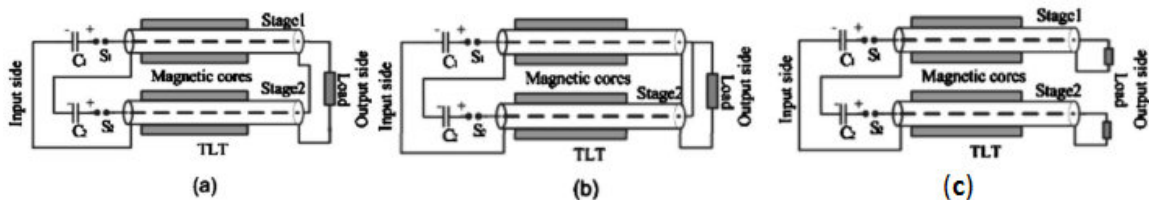
ثابت زمانی مدار تریگر می باشد. ولتاژ بر روی کلید همانند تابع کسینوسی بالا می رود و همچنین ولتاژ بر روی الکتروود تریگر نیز مانند تابع کسینوسی فقط با دامنه کوچکتر و با یک تاخیر زمانی صعود می کند. زمانی که فرآیند بارداری کامل شد ولتاژ آند تا زمانی که $C_n \gg C$ ثابت باقی می ماند. اما ولتاژ بر روی الکتروود تریگر با ثابت زمانی $\tau_{LCR} = R.C$ کاهش می یابد، در نتیجه اختلاف ولتاژ بین آند و تریگر افزایش می یابد که منجر به یک قوس پلاسمایی در مدار تریگر L-C و آند در فاصله هوایی می شود. انرژی ذخیره شده در C اکنون در فاصله هوایی آند-تریگر مستهلک شده است. رساندن انرژی کافی سبب تقویت جرقه می شود. عموماً "اتلاف انرژی در قوس جرقه در حدود چند میلی ژول می باشد، در نتیجه بسته شدن فاصله هوایی بین آند و تریگر اختلاف ولتاژ بین تریگر و کاتد به شدت بالا می رود. آند و کاتد از طریق الکتروود تریگر به صورت الکتریکی به هم متصل شده و کلید بسته می شود. طرز کار تریگر مستقل از شکل الکتروود و ولتاژ بار دار کردن می باشد. در کلید اسپارک گپ مهم است که در خلال باردار شدن اختلاف ولتاژ بین آند و تریگر و بین کاتد و تریگر برابر باشند. در غیر این صورت ممکن است آتش قبل از موقع داشته باشیم [۳].

همزمان سازی سویچ‌ها به روش ترانسفورماتور خط انتقال^۱:

شکل ۲ دیاگرام شماتیکی مدار چند سوییچی با دو اسپارک گپ S_1 و S_2 و یک TLT دو مرحله ای را نشان می دهد. هسته های مغناطیسی در اطراف خطوط انتقال قرار گرفته اند تا امپدانس Z_s که به صورت امپدانس موج بین دو TLT تعریف می گردد و از طرف ورودی مشاهده می گردد، افزایش یابد. در طرف ورودی TLT دو خازن یکسان C_1 و C_2 به صورت موازی تا ولتاژ V_0 شارژ می گردند. آنها به خط انتقال از طریق دو سوییچ متصل می گردند. وقتی که یکی از دو سوییچ بسته می گردد، یک ولتاژ پالس وجود خواهد داشت که بین دو خط انتقال

¹Transmission-Line-Transformer

حرکت می کند. در نتیجه اضافه ولتاژ بر روی سویچ دیگر ایجاد می گردد و موجب اعمال بسته شدن به آن می گردد. در طرف خروجی، خط انتقال می تواند به طرق مختلف وصل گردد. (۱) به صورت سری تا موجب ایجاد ولتاژ پالسی سطح بالا گردد. (۲) به صورت موازی تا موجب ایجاد یک پالس جریانی بزرگ گردد. (۳) به صورتی که دو بار مستقل را درایو کند. در شکل ۲ (a) TLT به صورت سری به خروجی متصل شده است. امپدانس خروجی، ولتاژ و جریان به ترتیب $2Z_0, 2V_0, I_0$ می باشند. که I_0 جریان سویچینگ و Z_0 امپدانس هر خط انتقال می باشد در شکل ۲ (b) TLT به صورت موازی در طرف خروجی متصل شده است در نتیجه امپدانس TLT ولتاژ و جریان به ترتیب $Z_0/2$ و V_0 و $2I_0$ می باشند. در شکل ۲ (c) TLT به دو بار مستقل متصل شده است تا آنها را به صورت همزمان درایو کند [۷]. سه مدار نشان داده شده در شکل ۲ توان خروجی یکسانی را می دهند اما در ولتاژ و جریان خروجی متفاوت.



شکل (۲): شماتیک دیاگرام توپولوژی مداری با دو سویچ و یک TLT دو مرحله ای. (a) TLT به صورت سری در طرف خروجی مورد استفاده قرار می گیرد. (b) TLT به صورت موازی در طرف خروجی مورد استفاده قرار می گیرد. (c) TLT برای دو بار مستقل بکار میرود [۲].

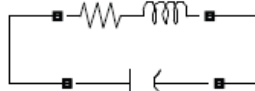
مدار نهایی برای شبیه سازی سیستم ده کلیده:

در این قسمت یک کلید چندگانه را بر اساس یک نمونه اولیه شرح می دهیم. کلیدهای اسپارک گپ فشار بالا ($S_1 - S_{10}$) برای سیستم استفاده شده است. مدل مداری سوئیچ و مقادیر آن برای ۶۰KV در شکل ۳ نشان داده شده است. در مقایسه با اسپارک گپها با فشار اتمسفر اسپارک گپهای فشار بالا دارای مزایای مقاومت هدایتی کمتر، خاصیت سلفی کمتر، زمان کلید زنی کوتاهتر به دلیل فاصله هوایی کمتر و قدرت میدان بزرگتر می باشد. برای یک فاصله هوایی یکنواخت یا نزدیک یکنواخت ولتاژ شکست V_B تابعی از فشار هوای P و فاصله هوایی d می باشد:

$$V_B = 24.4pd + 6.7\sqrt{pd} \quad (3)$$

که در آن p فشار هوا به بار و d فاصله هوایی به سانتی متر می باشد. ۱۹ سلف $L_1 - L_9$ برای باردار کردن خازنهای ولتاژ بالای $C_{H1} - C_{H10}$ به صورت موازی استفاده شده است. در همان حال در طی فرآیند همزمان کردن ده کلید اسپارک گپ این سلفها امپدانس بالایی را ایجاد می کنند که از تخلیه بار خازنهای ولتاژ بالا

جلوگیری می کند. برای اطمینان از همزمانی مناسب مقدار سلفها باید $L \gg \frac{Z_S \Delta T_S}{2}$ باشد. ΔT_S فاصله زمانی برای همزمان کردن همه کلیدهاست.



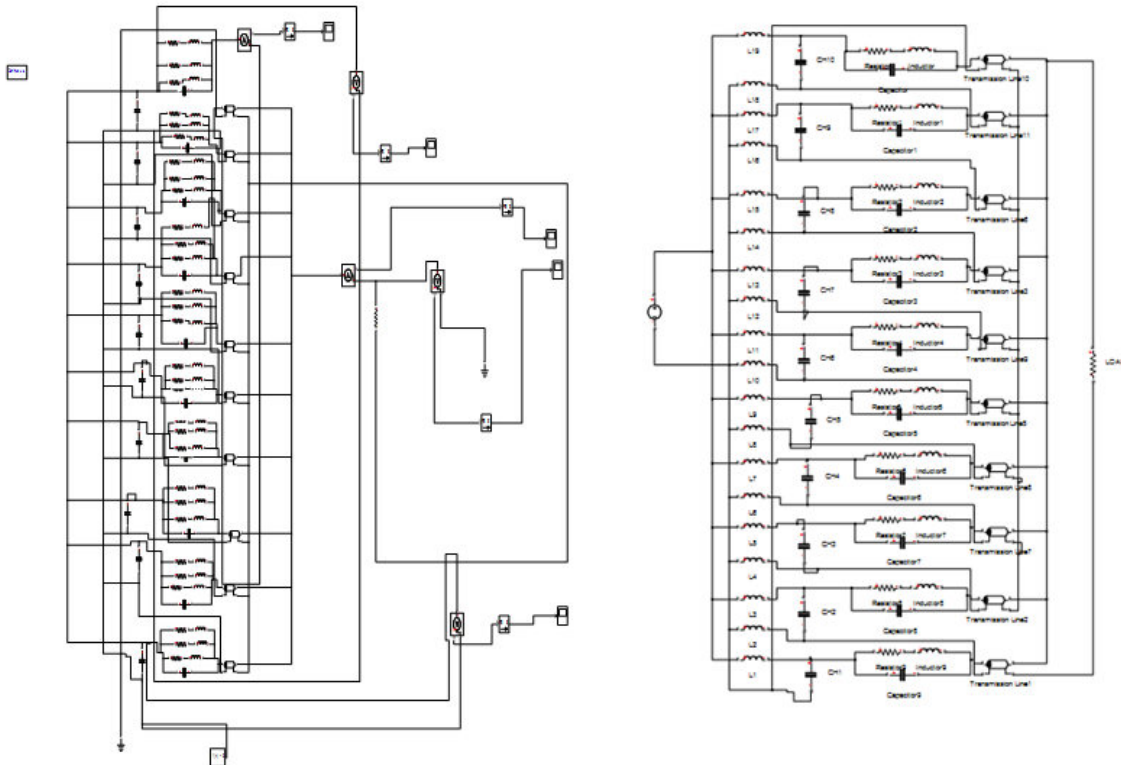
شکل(۳): مدار معادل کلید، مقدار سلف ۲۵ نانو هانری و خازن ۲،۳۳ پیکو فاراد و مقاومت ۰،۳۳ اهم می باشند فاصله ای که کلیدها بار را خود را همزمان در آن تخلیه می کنند دو میلی متر در نظر گرفته شده است. ولتاژ شکست کلیدها با توجه به رابطه V_B به دو عامل فشار گاز داخل کلید و فاصله الکترودها بستگی دارند که در فشار ۱۰ بار ولتاژ شکست کلیدها ۵۸،۲۸ کیلو ولت می شود ولتاژ خازنها را ما ۵۶ کیلو ولت در نظر می گیریم ولتاژی که در ضمن همزمانی بعد از تریگرینگ کلید اول به بقیه کلیدها وارد می شود ۶۳،۲۸ کیلو ولت می باشد، که سبب بسته شدن اتوماتیک همه کلید ها می شود. با توجه به این که انرژی یک مگا ژول از طریق تخلیه بار خازنهای ولتاژ بالا در بار باید حاصل شود وبا جاگذاری در رابطه $W = \frac{1}{2} CV^2$ مقدار خازن مورد نیاز ۶۵۰ میکرو فاراد به دست می آید. ده کلید از نوع کلید اسپارک گپ فشار بالا می باشند. یکی از آنها کلید تریگر می باشد، در حالی که بقیه دارای شکست خود به خودی می باشند. TLT از کابل هم محور $Z_0 = 50\Omega$, RG218 با طول دو متر برای هر مرحله می باشد[۴]. همزمانی این سیستم ده کلید با استفاده از نرم افزار مطلب شبیه سازی شده است(شکل ۴ و ۵). نتایج در جدول (۱) ارائه شده است.

بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله یک سیستم توان پالسی خازنی ۱ مگا ژول برای کاربردهای گوناگون طراحی و شبیه سازی گردیده است. این سیستم از ده بانک خازنی ۱۰۰ کیلو ژول تشکیل شده است که بصورت موازی بهم متصل شده اند نتایج شبیه سازی نشان میدهد که با افزایش سلف شکل دهنده پالس، مقدار جریان پیک بار کاهش یافته است، در عین حال پهنای پالس افزایش پیدا کرده است. زمان صعود پالس جریان نیز بیشتر شده است. رسیدن به مقادیر بالای جریان با استفاده کلید زنی همزمان توسط TLT ممکن می شود بررسی نتایج شبیه سازی به ما نشان می دهد که هر چه فاصله هوایی کلید ها کمتر شود، خاصیت سلفی مدار کمتر شده و پالس جریان خروجی دارای زمان صعود کمتر و جریان پیک بالاتری می شود. در کلید های چند کاناله جریان پیک بالاتری به دست می آید که به دلیل کاهش خاصیت سلفی در این کلید ها میباشد. با افزایش تعداد کلیدها و ایجاد تعداد بیشتر کانال جرقه به توانهای بالاتر در خروجی مدار رسید. برای افزایش طول عمر الکتروود ها آنها را از جنس برنج انتخاب کنیم و اگر

برای کار ویژه ای مد نظر باشد که کاهش هزینه مد نظر نباشد با انتخاب جنس این الکترونها از تنگستن طول عمر آن به میزان قابل توجهی بالا می رود.

نتایج:



شکل (۵): مدار سیمولینک برای کلید زنی ده تایی سه کاناله

شکل (۴): شکل مدار در سیمولینک

جدول (۱): مقایسه نتایج شبیه سازی با نرم افزار مطلب

نوع کلید (یک یا چند کاناله)	جرمان پیک (بار (کیلو آمپر)	ولتاژ پیک بار (کیلو ولت)	زمان صعود (rise time) (%۹۰-۱۰) (میکرو ثانیه)	زمان افت (fall time) (%۹۰-۱۰) (میکرو ثانیه)	زمان جریان پیک (بار (میکرو ثانیه)	زمان محو شدن کامل جریان (بار (میکرو ثانیه)
سه کاناله با فاصله هوایی دو میلی متر	۲۰۷۳٫۶	۲۰٫۷۳۶	۳٫۱۸	۳۰	۵٫۳۶۲	۱۶۰
تک کاناله با فاصله هوایی دو میلی متر	۱۱۷۱٫۳	۱۱٫۷۱۳	۱٫۸۵	۶۵	۴	۳۰۰
تک کاناله با فاصله هوایی دو سانتی متر	۱۱۳۹٫۸	۱۱٫۴	۲٫۹	۵۹٫۱۵	۵٫۳۵	۲۹۲٫۳۸

مراجع:

[1] G.J.J. Winands, Z. Liu, A.J.M. Pemen, E.J.M. van Heesch and K.Yan, "Long life-time, triggered, spark-gap switch for repetitive pulsed power applications", Review of Scientific instruments, accepted for publication July 2005.



بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران



۱۵ و ۴ اسفندماه ۱۳۹۵ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

- [2] Z. Liu, K. Yan, A.J.M. Pemen, G.J.J. Winands, and E.J.M. Van Heesch “Synchronization of multiple spark-gap switches by a transmission line transformer”, published by the AIP Publishing, Review of Scientific instrument 76,113507(2005),doi: 10.1063/1.2132269.
- [3] P. Persephonis, K. Vlachos, C. Georgiades and J. Parthenios. “The Inductance of the discharge in a spark gap”, J. Appl. Phys., 71, pp. 41554762, (1992).
- [4] G.J.J. Winands*, Z. Liu, A.J.M. Pemen, E.J.M. van Heesch and K, Yan, NOVEL SPARK-GAP SWITCH DESIGN FOR PULSED POWER APPLICATIONS, The IEEE Power Conversion & Applications Professional Network.