مولد پالس ولتاژ بالای سوئیچینگ با هدف راه‌اندازی مولد پلاسمای کانونی J200

INC29-1107

حسین جعفری، مرتضی حبیبی*

آزمایشگاه‌گداخت‌هسته‌ای، دانشکده مهندسی‌انرژی‌وفیزیک، دانشگاه‌صنعتی امیرکبیر؛ صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران-ایران

چکیده:

در این پژوهش، اقدام به ارائه‌ی طرحی نوین در ساخت شارژر ولتاژ بالای مبتنی بر فناوری سوئیچینگ رزونانسی kVDC15/VAC220 و بانک خازنی ولتاژ بالای یک مولد پلاسمای کانونی J200/Fμ2 گردید. در طراحی بانک خازنی، تقارن در توزیع خازن‌ها و جانمایی سوئیچ تریگر در فضای داخلی بانک خازنی با هدف کاهش اندوکتانس و مقاومت داخلی که منجر به بیشینه‌ی جریان تخلیه در بیشترین مقدار ممکن شود، در نظر گرفته شد. ملاحظات فنی مربوط به ساخت شارژر ولتاژ بالای سوئیچینگ به‌طور کامل تشریح شد. پس از ساخت مولد پالس، اقدام به اندازه‌گیری ولتاژ خروجی و شکل موج‌های ولتاژ و جریان سوئیچ‌های قدرت گردید. نتایج نشان دادند ضمن دستیابی به عملکرد دقیق مدارهای کنترل و نمونه‌برداری منبع تغذیه سوئیچینگ و پایین بودن ریپل ولتاژ خروجی (کمتر از ۰/۲ درصد)، زمان شارژ بانک خازنی نیز در حدود ms500 به دست آمد که منجر به نرخ تخلیه‌ی کاری Hz2 می‌شود. لذا، از این مولد پالس ولتاژ بالای سوئیچینگ می‌توان به‌عنوان تغذیه‌کننده‌ی دستگاه‌های پلاسمای کانونی مینیاتوری به‌صورت یک سیستم کم‌هزینه، سبک‌وزن، قابل‌حمل و کارآمد با هدف بهبود بهره تولید تابش‌های پرانرژی استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: مولد پالس ولتاژ بالا، منبع تغذیه سوئیچینگ رزونانسی، پلاسمای کانونی مینیاتوری، بانک خازنی.

Switched-Mode High Voltage Pulse Generator for the Purpose of Setting up a 200J Plasma Focus Generator

H. Jafari*, M. Habibi

Nuclear Fusion Lab., Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology; P.O. Box: 15875-4413, Tehran- Iran.

Abstract:

In this research, a new design was presented in the construction of a 220VAC/15kVDC high voltage charger based on resonant switched-mode power supply technology and a 200J/2μF high voltage capacitor bank for setting up a miniature plasma focus generator. In the design of the capacitor bank, symmetry in the distribution of capacitors and placement of the trigger switch in the internal space of the capacitor bank were considered with the aim of reducing the inductance and internal resistance that lead to the maximum discharge current in the highest possible amount. The technical considerations related to the construction of the switched-mode high voltage charger were fully explained. After constructing the pulse generator, the output voltage and the voltage and current waveforms of the power switches were measured. The results showed that while achieving the precise performance of the control and sampling circuits of the switched-mode power supply and the low ripple of the output voltage (less than 0.2%), the charging time of the capacitor bank was met at about 500 ms, which leads to a working discharge rate of 2 Hz. Therefore, this switched-mode high voltage pulse generator can be used as a feeder for miniature plasma focus devices as a low-cost, light-weight, portable and efficient system with the aim of improving the efficiency of producing high-energy radiations.

Keywords: High voltage pulse generator, Resonant switched-mode power supply, Miniature plasma Focus, Capacitor bank.

۱. مقدمه

در روند تحقیقات و بهبود عملکرد مولدهای پلاسمای کانونی ولتاژ بالا/ توان بالا مشخص گردید ضمن اینکه باید از فرایند شارژ و تخلیه بانک خازنی درک مناسبی داشت، باید پایداری سطح ولتاژ و جریان شارژ با زمان خیز مناسب و درعین‌حال متوالی بودن فرایند شارژ/ دشارژ نیز به‌عنوان سایر مشخصه‌های این منابع تغذیه مدنظر باشند. بدین منظور، با توسعه ادوات الکترونیک قدرت در طراحی منابع توان پالسی کم‌حجم، ارزان و با بهره بالای انتقال توان، استفاده از منابع تغذیه سوئیچینگ ولتاژ بالا با امکان کنترل ولتاژ خروجی در شرایط مختلف تحت بار و بی‌باری به‌سرعت افزایش یافت [۱-۳]. تحت این شرایط، مولدهای پلاسمای کانونی مینیاتوری (انرژی کمتر از ۱kJ) با تغذیه توسط منابع تغذیه سوئیچینگ ولتاژ بالای پالسی و قابلیت عملکرد در مد تخلیه‌ی فرکانسی، می‌توانند به‌صورت کم‌حجم، قابل‌حمل و ایمن به لحاظ مسائل حفاظت عایقی و پرتویی، چشم‌انداز روشنی را برای کاربردی نمودن مولد تابش‌های یونده فراهم کنند [۴-۶].

با پیدایش سوئیچ‌های سریع و پرقدرت، تلفات ترانزیستوری به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرد و عمده تلفات در ترانسفورماتورها خلاصه شد که برای غلبه بر این مشکل نیز، فرکانس کاری مدار را تا مقادیری در حدود مگاهرتز افزایش دادند. تحت این شرایط، می‌توان با کاهش هزینه‌ها و با استفاده از توپولوژی مبدل‌های رزونانسی که دارای راندمان بالاتری نسبت به مبدل‌های PWM است، به یک مولد پلاسمای پالسی سوئیچینگ با قابلیت تولید تابش‌های مختلف مانند اشعه ایکس، یون‌های پرانرژی و نوترون‌های سریع دست پیدا کرد [۷-۹]. لذا در این مقاله، به‌منظور راه‌اندازی مولد پلاسمای کانونی ۲۰۰ ژول مینیاتوری با فرکانس تخلیه‌ی تکراری، با هدف بهبود بهره تولید تابش‌های پرانرژی و نیز کاهش ابعاد، فشرده و کم‌وزن شدن سیستم، طراحی و ساخت یک منبع تغذیه ولتاژ بالای سوئیچینگ با توپولوژی رزونانس با طراحی خاص که منجر به دستیابی به یک سیستم کاملاً پرتابل و مینیاتوری شود، ارائه می‌گردد.

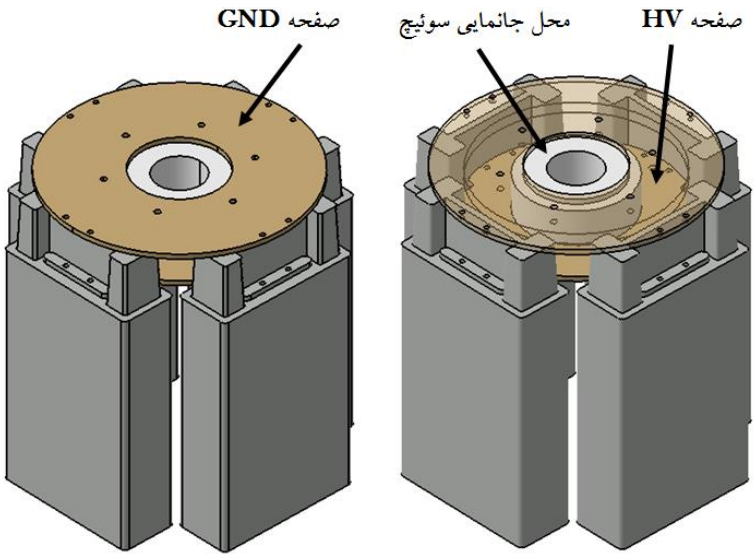
۲. الزامات فنی و طراحی

۱،۲. مشخصات فنی مولد پلاسمای کانونی مینیاتوری

در این پژوهش، از یک مولد پلاسمای کانونی مینیاتوری ۱۵kV/۲۰۰J با قابلیت کار در فرکانس تخلیه‌ی ۱Hz-۲ به‌منظور ارزیابی منبع تغذیه ولتاژ بالا استفاده می‌شود. در ساخت بانک انرژی مربوط به این مولد از چهار خازن ولتاژ بالا و اندوکتانس پایین با فناوری ساخت دی‌الکتریک کاغذ-فیلم (هر خازن ۰/۵μF/۳۰kV و بانک خازنی با ظرفیت معادل۲μF) استفاده می‌شود. این خازن‌ها در یک ساختار کواکسیال با توزیع متقارن بین دو صفحه‌ی دایره‌ای و با کوتاه‌ترین اتصالات و بدون سیم با یکدیگر موازی می‌شوند و سوئیچ تریگر نیز درون ساختار بانک خازنی (در فضای مرکزی ساختار کواکسیال بانک خازنی) جانمایی می‌شود (شکل ۱). این طرح خاص که در آن سوئیچ تریگر درون ساختار بانک خازنی جانمایی شده، منجر به کوتاه شدن مسیر جریان و کاهش اندوکتانس و مقاومت داخلی سیستم، متراکم شدن مجموعه بانک خازنی و سوئیچ، فیلتر شدن نویزهای الکترومغناطیسی و صدای عملکرد سوئیچ تریگر حین عملکرد در مد تخلیه تکراری و فراهم شدن شرایط ایمن به لحاظ مسائل عایق ولتاژ فشارقوی می‌شود [۴]. با اجرای این طرح ابداعی در یکپارچه‌سازی بانک خازنی و سوئیچ و سهولت اتصال این مجموعه به محفظه‌ی پلاسمای کانونی، شرط لازم در تطبیق امپدانس خط انتقال با امپدانس معادل پلاسما فراهم می‌شود. شرط کافی در دستیابی به عملکرد پایدار مولد پلاسمای کانونی نیز با تأمین شرایط مشابه تخلیه‌ی تکراری با کمک به تشکیل فاز شکست الکتریکی دینامیک پلاسما برآورده می‌شود. دستیابی به این مهم مستلزم طراحی و ساخت یک منبع تغذیه سوئیچینگ ولتاژ بالای پایدار است [۱۰].

۲،۲. الزامات عملکردی منبع تغذیه ولتاژ بالا

سیستم‌های مولد پلاسمای پالسی با هدف دستیابی به بالاترین بازدهی عملیاتی، نیاز به منابع تغذیه‌ی ولتاژ بالای DC با سطح ولتاژ پایدار و ریپل پایین (به‌عنوان شارژر بانک خازنی مولد پلاسمای پالسی) دارند تا بتوان میدان الکتریکی قوی‌ای که منجر به جاری شدن الکترون‌ها روی الکترودها و عایق بین آن‌ها و نهایتاً وقوع تخلیه‌ی الکتریکی می‌شود را تأمین کرد. یکی از الزامات فنی در طراحی چنین منابع تغذیه ولتاژ بالایی، دارا بودن قابلیت تأمین توان شارژ متوالی در فرکانس مشخص است. دستیابی به این مهم به دلیل وجود نویزهای الکترومغناطیسی ناشی از عملکرد سوئیچ تریگر به‌صورت تخلیه‌ی تکراری با دامنه بسیار بالا و زمان خیز بسیار کوتاه دشوار بوده و نیاز به تمهیدات خاصی است.



شکل ۱. طرح ابداعی در یکپارچه‌سازی خازن‌ها و سوئیچ تریگر به‌صورت کواکسیال با توزیع متقارن خازن‌ها بین دو صفحه‌ی دایره‌ای و با کوتاه‌ترین اتصالات.

یکی از مطلوب‌ترین روش‌های محافظت در برابر اختلالات ناشی از امواج نویزی ناشی از میدان الکتریکی، عایق سازی تمامی قسمت‌های فلزی توسط عایق‌های با ضخامت مناسب می‌باشد. در رابطه با حفاظت مدارات الکترونیکی منبع تغذیه در برابر میدان‌های مغناطیسی و اختلالات الکترومغناطیسی فرکانس بالا که در حین تخلیه‌ی سطوح ولتاژ بالا به وجود می‌آیند می‌توان از مدارات اسنابر[1] بهره جست، و یا بعضی از این مدارات را توسط یک سری المان‌های مکانیکی که وظیفه‌ی قطع و وصل نمودن مدار را داشته و عاری از اثرپذیری از میدان‌های مغناطیسی هستند، تجهیز نمود.
دومین الزام اساسی در عملیاتی نمودن مولدهای پلاسمای پالسی، حفاظت در برابر ولتاژ بازیابی گذرا (ولتاژ برگشتی) و اثر آن است. ولتاژ بازگشتی گذرا[2] یکی از شایع‌ترین پدیده‌ها در سیستم پالسی که به‌خوبی معرفی نشده است. در مولدهای پلاسمای پالسی، به دلیل بزرگ‌تر بودن فرکانس موج تخلیه نسبت به فرکانس توالی تخلیه‌ی تکراری (یعنی فاصله‌ی زمانی بین شروع تخلیه تا شارژ بعدی)، انرژی نوسانی/ هرزگرد مربوط به فرایند تخلیه انرژی بانک خازنی می‌تواند در المان‌های مغناطیسی ذخیره شود. در این صورت، چنانچه در سیکل بعدی سوئیچ تریگر و شکاف موجود در مولد پلاسمای کانونی اتصال کوتاه شود، به دلیل عدم تطابق میان ظرفیت خازنی و بار، ولتاژ در دو سر ترمینال خروجی افزایش‌یافته که منجر به جاری شدن جریان یورشی زیاد از دیودها و بانک خازنی می‌شود. بزرگی این ولتاژ به دو برابر مقدار ولتاژ نامی هم می‌رسد که به مشخصه‌های سیستم یعنی نوع بار، نوع اتصال کابل‌ها و خطوط انتقال و نوع سیستم زمین به‌کاررفته بستگی دارد. این موضوع می‌تواند در رگولاسیون ولتاژ خروجی و فرایند تخلیه‌ی متوالی منظم اثر منفی بگذارد. مناسب‌ترین روش برای حفاظت در برابر ولتاژ برگشتی مولدهای پالسی، استفاده از مدارات دیود هرزگرد سریع و مقاومت در قسمت خروجی منبع تغذیه است. مقاومت‌ها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که افت ولتاژ دوسر آن‌ها کمتر از ۰٫۲ درصد ماکزیمم ولتاژ خروجی شود تا رگولاسیون ولتاژ تأمین شود. دیودهای هرزگرد نیز به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که دارای قابلیت جریان کشی بزرگ و سریع باشند.

۳٫۲. تأمین توان با عملکرد تخلیه تکراری

در گام اول از طراحی منابع تغذیه سوئیچینگ، جریان‌دهی منبع تغذیه ولتاژ بالا در فرکانس شارژ/دشارژ ۱Hz-۲ در شارژ بانک خازنی ۲μF تا سطح ولتاژ ۱۵kV مدنظر می‌باشد. در این صورت طبق محاسبه، متوسط جریان خروجی و متوسط توان خروجی منبع تغذیه برابر ۶۰mA/۹۰۰W (بدون احتساب ضریب اطمینان) به دست می‌آید.
حال باید در نظر داشت که بار خروجی خازنی در لحظات اول شارژ، اتصال کوتاه می‌باشد و ولتاژ رفته‌رفته نسبت به زمان در خروجی تغییر می‌کند. بنابراین، منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا به‌عنوان تأمین‌کننده جریان شارژ، با تغییر امپدانس بار

[1] Snubber Circuits
[2] Transient Recovery Voltage (TRV)

در خروجی مواجه می‌شود. برای رفع این مشکل، از مبدل رزونانسی با چیدمان‌یک خازن سری، یک سلف سری و یک خازن موازی (LCC) استفاده می‌شود که دارای مشخصه منبع جریان ثابت است تا بتوان فرایند شارژ و دشارژ را به‌صورت کنترل‌شده انجام داد. لازم به ذکر است که در عمل ظرفیت موازی در این ساختار مربوط به ظرفیت خازنی ترانسفورماتور کوپلاژ است که به اولیه انتقال داده شده و در نقش المان رزونانسی عمل می‌کند. لذا، همچنان می‌توان ویژگی جریان ثابت مدار رزونانس سری را در توپولوژی پیشنهادی مشاهده کرد.

در گام بعد، محاسبه جریان ورودی و انتخاب المان‌های ورودی مولد سوئیچینگ انجام می‌شود. با توجه به توان ولتاژ ورودی در حدود ۲۲۰VAC/۱kW و با احتساب ضریب اطمینان ۵۰ درصد، جریان ورودی ماکزیمم ۱۰ آمپر خواهد بود. تحت این شرایط، ضمن اینکه باید از فیوز ورودی و پل دیود ورودی ۱۰A استفاده شود، باید به‌منظور حذف برخی نویزهای ورودی، از یک راکتور 50Hz;10A EMI FILTER نیز استفاده نمود.

آخرین المان ورودی، خازن آکومولاتور ورودی است. بر طبق دستورالعمل‌های تجربی برای طراحی مدارات سوئیچینگ به ازای هر وات توان ورودی، ظرفیتی معادل ۰٫۵ µF الی ۱ µF برای خازن آکومولاتور در نظر گرفته می‌شود (البته این مقدار تقریبی و برای مدارات تک فاز تمام پل است). بنا به این دستورالعمل و با توجه به توان متوسط موردنیاز که با احتساب ضریب اطمینان در حدود ۲ کیلووات است، ظرفیت خازن آکومولاتور باید بین ۱۰۰۰µF الی ۲۰۰۰µF تعیین می‌شود. همچنین، به‌عنوان‌یک راه‌حل علمی برای محاسبه خازن آکومولاتور می‌توان روش زیر را پیشنهاد کرد. ابتدا باید درصد ریپل موردقبول را در نظر گرفت و سپس بر اساس ولتاژ پیک خازن، ولتاژ ریپل را محاسبه نمود. بر طبق استاندارد، ولتاژ ریپل نباید از ۲۰٪ بیشتر باشد؛ در این صورت با ولتاژ پیک ۳۱۱V و با در نظر گرفتن ۲۰٪ ریپل، ولتاژ ریپل برابر ۶۲V می‌شود. از طرفی، پس از یک‌سوسازی توسط پل دیود، فرکانس برق ورودی برابر ۱۰۰Hz و دوره تناوب آن برابر ۱۰ms می‌شود. بنابراین، با استفاده از رابطه‌ی محاسبه‌ی جریان خازن و انجام یک تناسب ساده برای تغییرات ولتاژ به تغییرات زمان، ظرفیت خازن آکومولاتور ورودی برابر ۱۶۰۰µF خواهد شد.

۴٫۲. فرکانس رزونانس: ملاحظات نیمه‌هادی‌ها و اشباع هسته

افزایش فرکانس باعث کوچک‌تر شدن ظرفیت المان‌های الکتریکی و مغناطیسی و درنتیجه کاهش اندازه‌ی آن‌ها می‌شود، درحالی‌که نیمه‌هادی‌ها با افزایش فرکانس کارکرد خوبی را به نمایش نمی‌گذارند؛ به‌عنوان‌مثال در نیمه‌هادی‌های قدرت، فرکانس قطع نباید از ۱۰ برابر فرکانس کلید زنی تجاوز کند و جمع زمان‌های مربوط به روشن و خاموش شدن سوئیچ قدرت نباید از ۱۰٪ عرض پالس تجاوز کند. در خصوص یک‌سوسازها، زمان بازسازی باید ۱۰ برابر کوچک‌تر از عرض پالس باشد. تحت این شرایط باید از نیمه‌هادی‌های با سوئیچ زنی سریع در ساخت مدارات استفاده شود که این نکته خود باعث افزایش تلفات در نیمه‌هادی می‌شود. بنابراین، در فرایند ساخت مطابق با نیاز کاربر باید یک حد میانه برای فرکانس و حجم هسته‌ی منبع تغذیه در نظر گرفته شود. البته باید توجه داشت در انتخاب فرکانس بایستی موجودی بازار را برای قطعاتی اصلی طرح به‌ویژه برای نوع، اندازه و سطح اشباع هسته و دیودهای سریع و ترانزیستورهای قدرت در نظر گرفت.

۱٫۴٫۲. ترانزیستورهای قدرت و اشباع هسته

دو عامل مهم در محدودسازی فرکانس رزونانس مدار، ترانزیستورهای قدرت و فرکانس اشباع هسته است. مشخصه فرکانسی مهم‌ترین عامل برای دسته‌بندی ترانزیستورهای موجود در بازار است. مطابق با دسته‌بندی ترانزیستورها برحسب مشخصه‌ی فرکانسی (جدول ۱) و با توجه به متوسط جریان ورودی ۱۰A مشاهده می‌شود مناسب‌ترین محدوده‌ی فرکانسی، فرکانس کلیدزنی ۱۰۰-۲۰۰KHz است چراکه هسته‌های فریت موجود در بازار داخل در این فرکانس عملکرد خوبی دارند (عدم اشباع هسته و کاهش ابعاد ترانسفورماتور قدرت) و انتخاب سوئیچ‌های قدرت در این رنج فرکانسی نیز مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. تحت شرایط فوق‌الذکر، از سوئیچ STGWT38IH130D IGBT (1300V, 63A) در ساخت منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالای سوئیچینگ به‌عنوان شارژ بانک خازنی استفاده می‌شود.

جدول ۱. دسته‌بندی ترانزیستورها بر اساس مشخصه فرکانسی.

فرکانس کلیدزنی	dc-50kHz خیلی گسترش‌یافته	50k-100kHz نسبتاً خوب	100k-200kHz کم	200kHz به بالا خیلی محدود
IGBT	0-800A	600A	50A	50A

MOSFET	200A	100A	50A	50A

نکته قابل‌توجه در انتخاب هسته‌های فریت ولتاژ بالا، شکل هسته است. مقطع هسته باید گرد باشد زیرا در مقطع دارای زاویه‌های تیز، سیم‌پیچ و عایق روی آن، زاویه‌ی تند پیدا کرده که باعث تجمع بارهای الکتریکی در این زوایا می‌شود. همچنین، عایق در قسمت‌های با زاویه تند ازنظر شکل مولکولی شکسته شده و به هم می‌ریزد و ولتاژ شکست دی-الکتریک در این مناطق پایین‌تر می‌آید. حال اینکه اختلاف‌پتانسیل به علت تجمع بار در این مناطق نیز بیشتر است. این موضوع باعث شکستن دی‌الکتریک و به وجود آمدن جرقه در این نقاط شده و باعث آسیب به چک می‌گردد. به علت استفاده شدن اکثر فضای هسته برای عایق‌کاری و نیز سهولت قراردادن هسته داخل سیم‌پیچ، هسته‌ی ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا معمولاً از نوع CC، UU یا UR انتخاب می‌شود. در این طرح، با توجه به توضیحات بالا در خصوص شکست دی‌الکتریک عایق و ممانعت از ایجاد جرقه در زوایای تند و همچنین با توجه به مشخصه‌ی هسته‌ی ترانسفورماتور که باید دارای مقاومت الکتریکی بالا و تلفات جریان گردابی پایین باشد، از هسته‌ی UR57 با جنس PC ferrite استفاده می‌گردد. شعاع سطح مقطع این هسته برابر ۰٫۸mm است که روی آن‌یک شکاف وجود دارد که تقریباً مربعی شکل با ضلع ۰٫۴mm است. در این صورت، سطح مقطع مؤثر هسته برابر $۱٫۸۴cm^2$ می‌شود.

در خصوص انتخاب سطح مقطع سیم و تعداد دور سیم‌پیچی، با استفاده از رابطه‌ی دور بر ولت مطابق زیر:

$$\text{turns}/\text{volt} = \frac{10^8}{4.4 \times S \times B_{max} \times f_s} \quad (۱)$$

$$A_w = \pi r^2 = 1.13\sqrt{\frac{I}{\kappa}}\ [mm^2] \quad \text{سطح مقطع سیم} \quad (۲)$$

که در آن s سطح مقطع مؤثر هسته، B ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی، r شعاع سیم، I جریان اولیه/ثانویه ترانسفورماتور و k ضریب ثابت (از ۱ تا ۴ نسبت به سایز و توان ترانسفورماتور)، و رجوع به منحنی مشخصه‌ی مغناطیسی هسته‌ی فریت می‌توان تعداد دور سیم‌پیچی ترانسفورماتور را محاسبه کرد. در این طرح، با احتساب ضریب اطمینان در جریان شارژ و دستیابی به نرخ تخلیه‌ی ۱Hz-۲، سطح مقطع سیم ثانویه دارای قطر ۰٫۲۵mm و سطح مقطع سیم اولیه‌ی ترانسفورماتور نیز دارای قطر ۰٫۷۵mm می‌باشد. در صورت در نظر گرفتن ماکزیمم فرکانس ۲۰۰kHz به‌عنوان فرکانس سوئیچینگ، تعداد دور اولیه و ثانویه نیز به ترتیب برابر ۷ دور و ۴۸۰ دور محاسبه می‌شوند.

۲٫۴٫۲. دیود یک‌سوساز خروجی

مطابق با مشخصات بانک خازنی، دیودهای یک‌سوساز خروجی باید ولتاژ شکست معکوس بالای ۱۵kVداشته باشند و نیز باید زمان بازیافت معکوس آن‌ها متناسب با مدار باشد. دیودهای مرسوم ولتاژ بالای موجود در بازار دارای سرعت عملکرد ۱μs-۲ هستند (دیودهای ولتاژ بالا با سرعت‌های خیلی بالا کمیاب هستند). در این صورت، با در نظر گرفتن شرط $T_d = 10\%\ .T_s$ فرکانس این دیودها در حدود ۵kHz خواهد بود. یکی از راه‌حل‌های قابل‌اطمینان برای رفع این محدودیت، استفاده از دیودهای سرعت بالای مدیوم ولتاژ (دیود اولترا فست UF4007 با ولتاژ نامی شکست ۱۰۰۰V و جریان‌دهی ۱A و جریان نشتی ۱۰۰μF) است که می‌توان متناسب با ولتاژ شارژ، تعدادی از آن‌ها را به‌صورت سری استفاده کرد.

با توجه به اینکه در عمل جریان نشتی معکوس دیودها با یکدیگر متفاوت است، در صورت سری کردن دیودها ولتاژ معکوس به‌طور مساوی بین آن‌ها تقسیم نخواهد شد. درنتیجه هر دیودی که جریان نشتی معکوس کمتری داشته باشد، در معرض ولتاژ معکوس بیشتری قرار خواهد گرفت و احتمال اینکه دچار شکست بهمنی شود وجود دارد. برای رفع این مشکل می‌بایست یا جریان نشتی معکوس را با استفاده از موازی کردن یک مقاومت با هر دیود نرمال کرد و یا تعداد دیودها را تا رسیدن به ضریب اطمینان موردقبول افزایش داد. در راه‌حل اول، در صورت استفاده از دیود اولترا فست، مقاومت‌های سری باید جریان ۱۰۰μF را در ولتاژ ۱۰۰۰V از خود عبور دهند که مقدار آن ۱۰MΩ می‌شود. در عمل باید از مقاومتی بیش از ۱۰MΩ استفاده شود تا جریان نشتی دیودها از مقدار نامی تجاوز نکرده و باعث تغییر افت ولتاژ دوسر دیودها نشود. راه‌حل دوم، افزایش تعداد دیودها است یعنی به‌عنوان‌مثال اگر در ولتاژ ۱۵kV از سی عدد دیود به‌جای پانزده عدد استفاده شود، به‌طور میانگین ولتاژ معکوس در دیود ۵۰۰V خواهد بود و حال اینکه اگر جریان نشتی دسته‌ای از دیودها تا حد زیادی باهم متفاوت باشند، بازهم ولتاژ به‌طور میانگین از حد شکست عبور

نخواهد کرد. تحت این شرایط، روش دوم پیشنهاد می‌شود چراکه ضمن دسترسی آسان دیود مذکور در بازار، جریان نشتی و قیمت پایینی دارند.

۵،۲. مدار کنترلی سوئیچ‌ها و فیدبک

با توجه به اینکه مبدل رزونانسی موردنظر باید بتواند در شرایط جریان صفر عمل کلیدزنی را انجام دهد، در قسمت کنترلی آن چند وظیفه مهم تشخیص ولتاژ حد بالا، تشخیص جریان حد بالا و پایین، تشخیص جریان صفر، تولید تریگر IGBT ها متناسب با سه وظیفه قبلی، دریافت دستور شروع از کاربر و راه‌اندازی مدار، خاموش کردن کامل قسمت سوئیچینگ با تشخیص جریان یا ولتاژ بالا تعریف می‌شود.

به‌منظور افزایش پاسخ مدار کنترلی مربوط به تشخیص جریان حد بالا و پایین و جریان صفر، از سه عدد آپ امپ سریع در تشخیص جریان‌های مذکور استفاده می‌شود. دو عدد پتانسیومتر برای تنظیم حد بالا و حد پایین جریان وجود دارد که می‌توان توسط آن‌ها جریان موردنظر کاربر را کنترل و محدود کرد، و یک پتانسیومتر برای کنترل جریان صفر وجود دارد که توسط آن جریان عبور صفر کنترل می‌شود. ورودی این مقایسه کننده‌ها همان ولتاژ روی شنت است. مقاومت شنت را می‌توان در دو مسیر قرارداد: ۱) دقیقاً در مسیر مدار تانک که می‌توان با قرار دادن چندین مقاومت موازی در مسیر جریان، ولتاژ دوسر آن‌ها را با یک ترانسفورماتور ایزوله و نسبت دور دلخواه، به‌صورت ایزوله به قسمت کنترلی انتقال داد. اما با توجه به بالا بودن ولتاژ در آن مسیر و نویزهای مدارات ولتاژ بالا این امر را در عملکرد مدار ایجاد مشکلات زیادی می‌کند. ۲) در روش دوم، مقاومت شنت را به‌صورت مستقیم در پایین سوئیچ‌های قدرت IGBT و واسط بین زمین مدار و کلکتور مشترک سوئیچ‌های قدرت پایین قرار می‌دهیم. در این صورت، ضمن اینکه ولتاژ پایینی روی شنت می‌افتد، جریان روی آن به‌صورت DC خواهد بود و کمک می‌کند که در این مسیر، نویز بسیار باشد تا بتوان محاسبات را بدون نیاز به ایزولاسیون انجام داد. این روش بسیار در دقیق بودن محل صفر کمک می‌کند.

از خروجی مقایسه‌گر مربوط به کنترل ولتاژ خروجی در تشخیص ولتاژهای حد بالا و پایین استفاده می‌شود. ورودی تمام این مقایسه کننده‌ها ولتاژی است که از طریق یک دیود نوری و با کمک فیبر نوری به گیرنده سمت کنترلر منتقل می‌شود. این عمل بسیار ایدئال است و به‌موجب رعایت کامل ایزولاسیون سمت خروجی و کنترلر می‌شود.

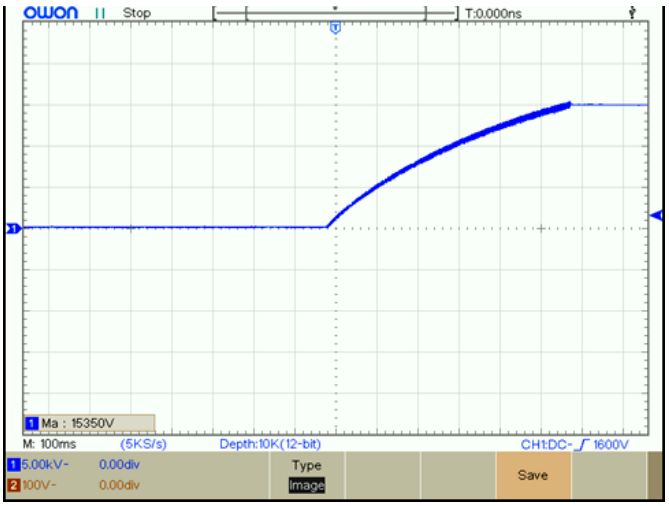
به‌منظور مدیریت ورودی‌ها و خروجی‌های کنترلی با قابلیت اطمینان و سرعت انتقال اطلاعات بالا، از یک کنترلر صنعتی CPLD با نویزپذیری پایین که از خانواده FPGA ها است، استفاده می‌شود. مدار کنترلر CPLD دارای یک ورودی کلاک و نه ورودی شامل ورودی برای استارت مدار، ریست کردن خطاها، جریان حد بالا، جریان حد پایین، جریان عبور از صفر و ولتاژ حد بالا ۱ تا ۴ می‌باشد که تمام عملیات کنترلی توسط آن‌ها صورت می‌گیرد. در مقابل، شش خروجی وجود دارد که چهار عدد برای کنترل گیت IGBT ها و دو عدد خروجی برای LED جهت نمایش ولتاژ بالا و جریان بالا می‌باشند.

۳. نتایج تست و بحث

۱،۳. ساخت منبع تغذیه سوئیچینگ ولتاژ بالا

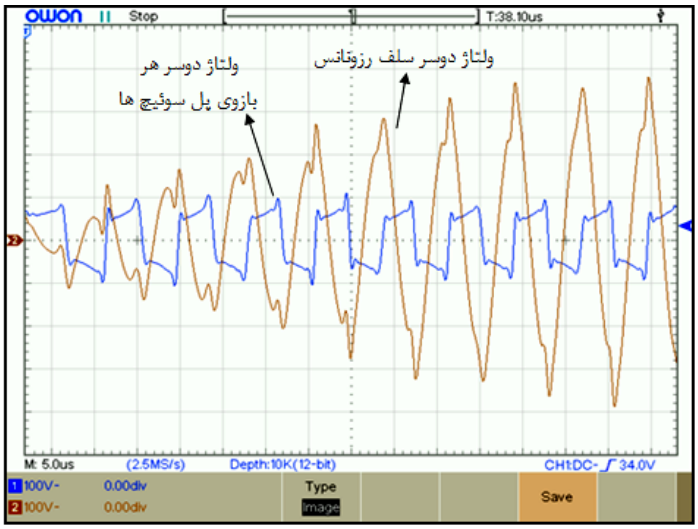
در شکل ۲ می‌توان تصویر نمونه اولیه‌ی منبع تغذیه‌ی سوئیچینگ رزونانسی ساخته‌شده را مشاهده کرد. همان‌طور که اشاره شد منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالای سوئیچینگ در این طرح به‌منظور شارژ بانک خازنی ۱۵kV/۲μFمربوط به مولد پلاسمای کانونی ۲۰۰J بکار گرفته می‌شود. در شکل ۳ سیگنال ولتاژ شارژ بانک خازنی ۱۵kV/۲μF را می‌توان مشاهده نمود. با دقت در سیگنال شارژ مشخص است که مدت‌زمان شارژ بانک خازنی اندکی بیشتر از ۵۰۰ms (معادل فرکانس تخلیه‌ی ۲Hz) است. علت این موضوع پایین بودن سطح ولتاژ برق شهر (یعنی در حدود ۲۰۰V به‌جای ۲۲۰V) در آزمایشگاه بود. بااین‌وجود، با دقت در شکل موج ولتاژ می‌توان مشاهده کرد که ریپل ولتاژ نهایی یعنی ولتاژی که توسط مدار فیدبک خوانده‌شده کمتر از ۰٫۲ درصد است که به‌عنوان دستاورد مطلوب و مطابق با طراحی تلقی می‌شود.

شکل ۲. نمونه اولیه‌ی منبع تغذیه‌ی سوئیچینگ رزونانسی با توپولوژی LCC.



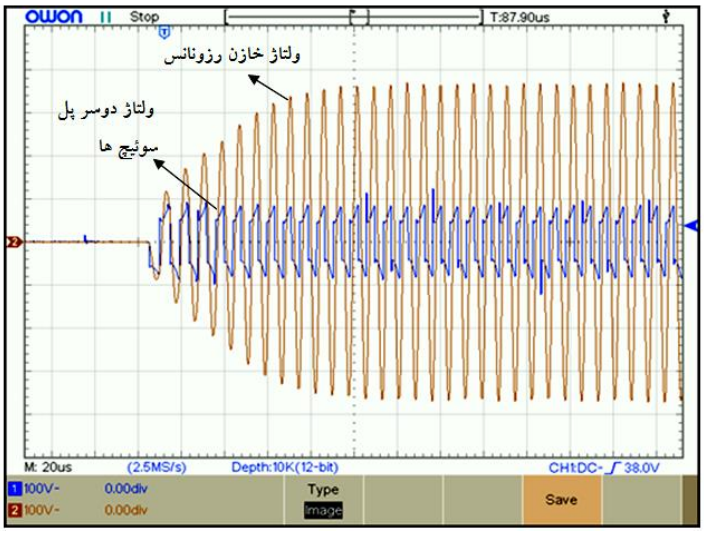
شکل ۳. شکل موج ولتاژ شارژ بانک خازنی در سطح ولتاژ ۱۵ کیلوولت با زمان خیز نزدیک به ۵۰۰ میلی‌ثانیه با احتساب سطح ولتاژ برق شهر در حدود ۲۰۰V به‌جای ۲۲۰V.

اندازه‌گیری دوم مربوط به شکل موج ولتاژ دوسر هر بازوی پل سوئیچ‌ها و ولتاژ دوسر سلف رزونانس (شکل موج آبی‌رنگ) است. نتیجه‌ی این اندازه‌گیری در شکل ۴ ارائه‌شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است جریان رزونانسی مدار تانک به‌صورت سینوسی روبه افزایش، کاملاً بیانگر رزونانس مدار تانک می‌باشد. همچنین، با بررسی شکل موج‌ها مشخص است که فرکانس سوئیچینگ مبدل، مطابق با طراحی برابر ۱۲۵ kHz است. این فرکانس کلیدزنی منجر به کاهش ابعاد منبع تغذیه شده است.

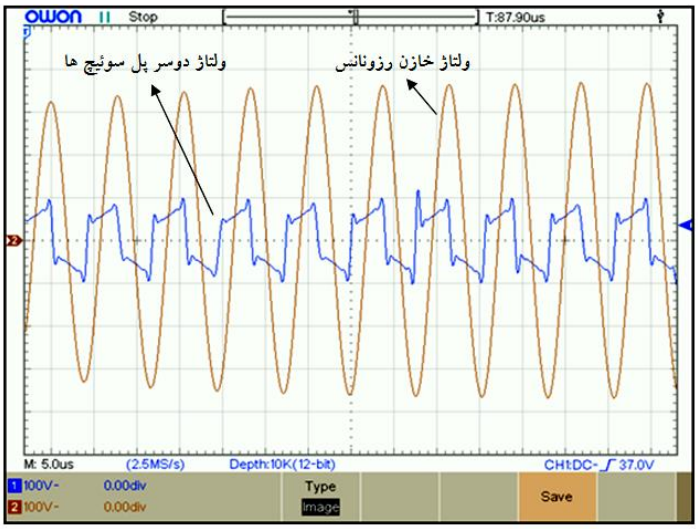


شکل ۴. شکل موج ولتاژ دوسر هر بازوی پل سوئیچ‌ها و جریان رزونانس.

در آزمایش بعدی، شکل موج ولتاژ دو سر خازن رزونانس مدارتانک و ولتاژ دوسر هر بازوی پل سوئیچ‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نتیجه‌ی این آزمایش در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه‌شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است ولتاژ خازن رزونانس با ولتاژ دو سر بازوی پل سوئیچ‌ها دارای اختلاف‌فاز ۹۰ درجه است و ازآنجایی‌که تانک رزونانسی به‌صورت تقریباً ایدئال (بدون مقاومت اهمی) طراحی‌شده، بنابراین جریان رزونانس با ولتاژ پل سوئیچ‌ها هم‌فاز خواهند بود. این نوع عملکرد مطابق با طراحی مبدل رزونانسی است و در اصطلاح عمل کلیدزنی در فرکانس رزونانس گفته می‌شود. مزیت این نوع کلیدزنی نسبت به حالت فوق رزونانس و زیر رزونانس، داشتن تلفات کلیدزنی بسیار کمتر و درنتیجه افزایش راندمان منبع تغذیه سوئیچینگ است. ضمن اینکه، تنش‌های ناشی از تغییر ولتاژ و جریان روی سوئیچ‌ها بسیار کمتر شده که باعث افزایش طول عمر سوئیچ‌ها می‌شود.



شکل ۵. شکل موج ولتاژ دو سر خازن رزونانس و ولتاژ دوسر هر بازوی پل سوئیچ‌ها.



شکل ۶. بزرگنمایی بخشی از شکل موج ولتاژ دو سر خازن رزونانس و ولتاژ دوسر هر بازوی پل سوئیچ‌ها.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت کاربردی شدن مولدهای پلاسمای کانونی مینیاتوری (انرژی کمتر از ۱kJ) به‌صورت کم‌حجم، قابل‌حمل و ایمن به لحاظ مسائل حفاظت عایقی و پرتویی، در این پژوهش اقدام به ارائه‌ی طرحی نوین در ساخت شارژر ولتاژ بالای مبتنی بر فناوری سوئیچینگ رزونانسی ۲۲۰VAC/۱۵kVDC و بانک خازنی ولتاژ بالای یک مولد پلاسمای کانونی ۲۰۰J/۲μF گردید. به‌منظور دستیابی به پارامترهای بهینه‌ی الکتریکی مولد پلاسمای کانونی با

قابلیت عملکرد در مد تخلیه‌ی فرکانسی، تقارن در توزیع خازن‌ها و جانمایی سوئیچ تریگر در فضای داخلی بانک خازنی با هدف کاهش اندوکتانس و مقاومت داخلی که منجر به بیشینه‌ی جریان تخلیه در بیشترین مقدار ممکن شود، در نظر گرفته شد. پس از طراحی شارژر ولتاژ بالای سوئیچینگ مطابق با ملاحظات فنی و ساخت مولد پالس، اقدام به اندازه‌گیری ولتاژ خروجی و شکل موج‌های ولتاژ و جریان سوئیچ‌های قدرت گردید. مطابق با نتایج تست، عملکرد دقیق مدارهای کنترل و نمونه‌برداری منبع تغذیه سوئیچینگ و پایین بودن ریپل ولتاژ خروجی (کمتر از ۰٫۲ درصد) حاصل شد. زمان شارژ بانک خازنی نیز در حدود ۵۰۰ms به دست آمد که منجر به نرخ تخلیه‌ی کاری ۲Hz می‌شود. لذا، از این مولد پالس ولتاژ بالای سوئیچینگ می‌توان به‌عنوان تغذیه‌کننده‌ی دستگاه‌های پلاسمای کانونی مینیاتوری به‌صورت یک سیستم کم‌هزینه، سبک‌وزن و قابل‌حمل و کارآمد با هدف بهبود بهره تولید تابش‌های پرانرژی استفاده کرد.

۶. مراجع

[۱] A. Pokryvailo, C. Carp, and C. Scapellati, "High-power high-performance low-cost capacitor charger concept and implementation," *IEEE Transactions on Plasma science*, vol. 38, pp. 2734-2745, 2010.

[۲] J. Biebach, P. Ehrhart, A. Muller, G. Reiner, and W .Weck, "Compact modular power supplies for superconducting inductive storage and for capacitor charging," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 37, pp. 353-357, 2001.

[۳] G. Bees and A. Tydeman, "Capacitor charging power supply design for high pulse to pulse repeatability applications," in *Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference.(Cat. No. 99CH36358)*, 1999, pp. 397-398.

[۴] م. حبیبی and ح. جعفری, "پایداری عملکرد، بازده پینچ و ضریب سرعت در دستگاه پلاسمای مینیاتوری ۳J با هندسه های مختلف الکترودها," ۱۳۹۸.

[۵] Z. Pan, R. Rawat, R. Verma, J. Lin, H. Yan, R. Ramanujan, *et al.*, "Miniature plasma focus as a novel device for synthesis of soft magnetic FeCo thin films," *Physics Letters A*, vol. 374, pp. 1043-1048, 2010.

[۶] T. Hussain, R. Ahmad, N. Khalid, Z. Umar, and A. Hussnain, "Synthesis of TiN/a-Si3N4 thin film by using a Mather type dense plasma focus system," *Chinese Physics B*, vol. 22, p. 055204, 2013.

[۷] R. Petr, D. Reilly, J. Freshman, N. Orozco, D. Pham, L. Ngo, *et al*" ,.Solid-state pulser development for high power dense plasma focus X-ray sources," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 39, p. 607, 2000.

[۸] S. Lee, P. Lee, G. Zhang, X. Feng, V. A. Gribkov, M. Liu, *et al.*, "High rep rate high performance plasma focus as a powerful radiation source," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 26, pp. 1119-1126, 1998.

[۹] V. Raspa, F. Di Lorenzo, P. Knoblauch, A. Lazarte, A. Tartaglione, A. Clausse, *et al.*, "Plasma focus based repetitive source of fusion neutrons and hard x-rays," *PMC Physics A*, vol. 2, pp. 1-15, 2008.

[۱۰] H. Jafari and M. Habibi, "High-voltage charging power supply based on an LCC-type resonant converter operating at continuous conduction mode," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, pp.۵۴۶۱-۵۴۷۸ ,۲۰۱۹ .