طراحی و ساخت منبع تغذیه ولتاژ فشار قوی پالسی با عملکرد تکراری جهت راه اندازی راکتور همجوشی گرما هسته‌ای

حسین جعفری، مرتضی حبیبی، حمیدرضا عالی وانقی

[1] دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک، گروه مهندسی گداخت هسته ای

چکیده

به منظور تامین توان ورودی یک پلاسمای کانونی مینیاتوری، یک منبع تغذیه پالسی با قابلیت تولید ولتاژ ۴ الی ۷ کیلو ولت و عملکرد تکراری با نرخ ۵ تخلیه در ثانیه طراحی و ساخته شده است. توان الکتریکی مورد نیاز جهت شارژ این بانک خازنی در حدود ۴۱ وات می باشد که منجر به استفاده از توپولوژی فلای بک با بکاری گیری فناوری ساخت منابع تغذیه سوئیچینگ گردید. نتایج مربوط به اندازه گیری ولتاژ و جریان تخلیه‌ی این منبع تغذیه پالسی عملکرد صحیح آن را در راه اندازی راکتور همجوشی هسته ای مورد نظر، اثبات نمودند. همچنین، اندازه گیری اندوکتانس کل سیستم در حالت تخلیه‌ی تک شات منجر به اندوکتانس ۴۸ نانو هانری گردید. ضمن اینکه این اندوکتانس بسیار پایین کل سیستم منجر به دستیابی به پدیده‌ی تنگش پلاسما جهت برقراری شرایط وقوع واکنش های گرما هسته ای گردید، طراحی دقیق بانک خازنی، محفظه‌ی خلاء و سوئیچ اسپارک گپ نیز اثبات گردید. این منبع تغذیه پالسی با مصرف انرژی بسیار پایین، کاملا پرتابل بوده و ساخت آن هزینه‌ی بسیار پایینی را منجر می شود

واژه‌های کلیدی: منبع تغذیه پالسی؛ راکتور همجوشی هسته ای؛ منبع تغذیه سوئیچینگ.

مقدمه

یکی از راکتورهای همجوشی هسته ای که قادر به برقراری شرایط واکنش های همجوشی گرما هسته‌ای و باریکه- هدف است، دستگاه پلاسمای کانونی می باشد. دستگاه های پلاسمای کانونی علی رغم هندسه بسیار ساده ای که دارند، قادر هستند تا با عبور یک جریان بسیار بالا از یک گاز کم فشار و تشکیل پلاسمای تنگیده شده در انتهای آند، یک پلاسمای داغ و چگال با نیمه عمر کوتاه تولید نمایند [۱] که نتیجه‌ی آن واکنش همجوشی دوتریوم- دوتریوم بوده که یکی از مهمترین محصولات آن، نوترون های سریع می باشد. انرژی این دستگاه ها توسط منابع تغذیه پالسی تامین می گردد که متشکل از بانک خازنی، ماژول تریگر کننده، و یک ولتاژ فشار قوی می باشند. اثبات شده است در صورتی که فرایند شارژ و دشارژ بانک خازنی دستگاه های کم انرژی (در رنج چند ژول تا چند ده ژول) به صورت متوالی و با نرخ تکرار مشخصی انجام گیرد، شار نوترون و بهره‌ی اشعه ایکس تولید شده توسط این دستگاه ها، قابل مقایسه با دستگاه های پر انرژی (در رنج چند صد ژول تا چند صد کیلو ژول) می‌گردد [۲]. در این کار، به منظور راه اندازی یک دستگاه پلاسمای کانونی کم انرژی، اقدام به طراحی و ساخت یک منبع تغذیه سوئیچینگ با توپولوژی فلای بک می گردد که قادر به تولید ولتاژ فشار قوی پالسی با فرکانس تکرار ۵ هرتز می باشد. همچنین، جهت افزایش راندمان منبع تغذیه پالسی، از هندسه کواکسیال در ساخت بانک خازنی آن استفاده می گردد تا اندوکتانس مسیر تخلیه به حداقل مقدار خود کاهش یابد.

مشخصات فنی و طراحی

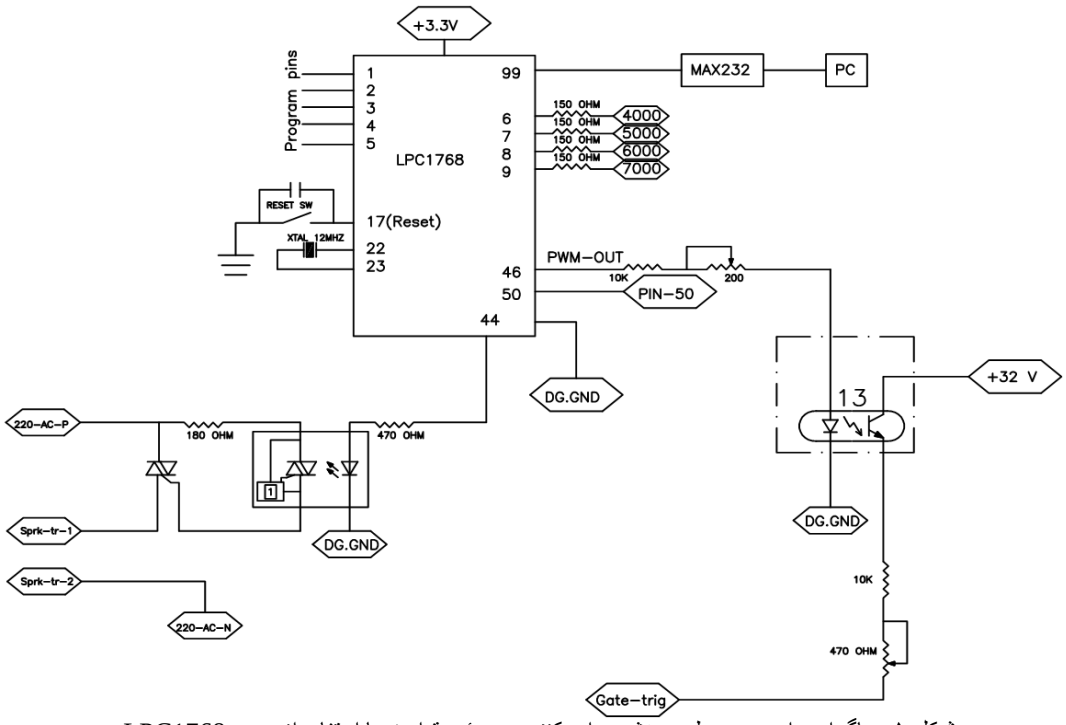
منبع تغذیه پالسی مورد نظر به گونه ای طراحی می شود که توانایی تولید ولتاژ خروجی ٤ الی ۷ کیلوولتی را با پله های ۱ کیلو ولت دارا باشد. بانک خازنی سیستم از ۱۲ خازن سرامیکی فشارقوی که ظرفیت هریک از آنها ۷ نانو فاراد می باشد، تشکیل شده است. اتصال بین خازن‌ها به صورت موازی و کاملا متقارن (کواکسیال) انجام گرفته است تا اندوکتانس آن به حداقل مقدر خود برسد. توان متوسط یک منبع تغذیه سوئیچینگ به نرخ تکرار تخلیه ها بستگی دارد. لذا جهت کار در فرکانس تکرار ٥ هرتز، بازه‌ی زمان مورد نیاز جهت شارژ بانک خازنی کمتر از ۲۰۰ میلی ثانیه خواهد بود. در این صورت با فرض ٥٠ درصد ضریب اطمینان در عملکرد دستگاه، و با توجه به ظرفیت بانک خازنی و ماکزیمم ولتاژ شارژکنندگی، ماکزیمم توان مصرفی منبع تغذیه در حدود ٤١ وات می گردد. با توجه به توان مصرفی اندک منبع تغذیه و به منظور کاهش هزینه ها و ابعاد سیستم، مناسبترین توپولوژی در طراحی منبع تغذیه مورد نظر، توپولوژی فلای بک می‌باشد [۳]. جدول مشخصات منبع تغذیه مذکور را می توان در جدول ۱ مشاهده نمود.

جدول ۱: پارامترهای طراحی منبع تغذیه پالسی جهت تامین نمودن توان ورودی راکتور همجوشی گرما-هسته ای.

پارامتر طراحی	مقدار	سمبول
تغذیه ورودی (V)	۳۲	V_{in}
ماکزیمم توان خروجی(W)	٤١	P_{out}
ماکزیمم ولتاژ خروجی (kV)	۷	V_{out}
ظرفیت بانک خازنی (nF)	۸٤	C_o
ماکزیمم توان شارژکنندگی (ms)	> ۲۰۰	t_{ch}
ماکزیمم نرخ شارژکنندگی (Hz)	٥	f

واحد کنترل کننده‌ی مرکزی

مهمترین بخش این منبع تغذیه، واحد کنترل کننده‌ی مرکزی آن می باشد. به منظور مدیریت موثر عملکرد تمامی مدارات و قابلیت کار در شرایط ولتاژ فشار قوی، و همچنین تولید سیگنال PWM مورد نیاز جهت درایو کردن سوئیچ قدرت از یک میکروکنترلر LPC1768ARM Cortex-M3 استفاده می گردد. سطح ولتاژهای ٤ الی ۷ کیلو ولت، با تغییر وضعیت یکی از پین های ٦ تا ۹ میکروکنترلر از یک منطقی به صفر منطقی انتخاب می گردند. پین ٤٦ آن نیز جهت تولید یک سیگنال PWM با فرکانس ۳۰ کیلو هرتز می باشد که به مدار تریگ کننده‌ی گیت ماسفت قدرت IRF1010E وصل می گردد. این سوئیچ قدرت به دلیل هزینه کم، ولتاژ و جریان پیک بالا، فرکانس کاری و نیز تحمل حرارتی مناسبش انتخاب گردید [٤].به منظور عملکرد تکراری شارژ و دشارژ منبع تغذیه، پین ٤٤ میکروکنترلر، سیگنالی را تولید کرده که به مدار تریگر کننده‌ی یک سوئیچ اسپارک گپ ارسال می نماید تا با تولید یک ولتاژ ضربه ۱٥ کیلو ولت، باعث تریگ شدن سوئیچ شود. شرایط ایزولاسیون بین پین های ورودی و خروجی میکروکنترلر با بخش ولتاژ فشار قوی نیز توسط یک سری اپتوکوپلرهای مناسب برقرار گردیده است. همچنین، یک پتانسیومتر نیز جهت قابل تنظیم بودن فرکانس PWM تولید شده در برد کنترلی تعبیه شده است. در شکل ۱ می توان دیاگرام مداری مربوط به بخش درایو کننده‌ی سوئیچ قدارت با استفاده از چیپ LPC1768 را مشاهده نمود.



شکل ۱: دیاگرام مداری مربوط به بخش درایو کننده‌ی سوئیچ قدارت با استفاده از چیپ LPC1768.

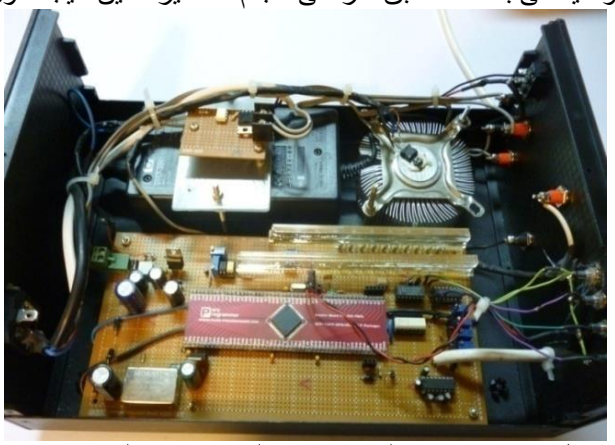
مدارت فیدبک و کنترل

به منظور کنترل ولتاژ تولید شده توسط بخش فشار قوی و همچنین ایجاد شرایط مناسب جهت ارسال دستور قطع یا وصل سوئیچ قدرت به میکروکنترلر، از مدارات فیدبک و کنترل استفاده می گردد. در این صورت، با توجه به اینکه نیاز به چهار سطح ولتاژ مختلف می باشد، از یک چیپ مقایسه کننده چهارگانه LM339 استفاده می گردد تا ولتاژ خروجی تولید شده را با ولتاژ مرجع مقایسه نماید. در این صورت بسته به اینکه اپراتور چه ولتاژ شارژکننده ای را انتخاب کرده باشد، توسط یک سوئیچ چهارگانه CD4066، ترمینال گیت سوئیچ ماسفت زمین می گردد تا جریان ورودی ترانسفورمر فلای بک قطع شده و فرایند افزایش ولتاژ خروجی قطع گردد. با توجه به فرکانس سوئیچینگ بالای منبع تغذیه، بازده‌ی آن افزایش و ابعاد آن می تواند کاهش یابد. با این حال، این فرکانس بالا منجر به افزایش تداخل الکترومغناطیسی (EMI) نیز خواهد شد. لذا، از یک مدار اسنابر پلالیزه کننده در این بخش استفاده می شود تا ضمن کاهش تلفات سوئیچنگ، EMI هدایتی را نیز کاهش دهد. همچنین جهت کاهش EMI تابشی، بخش سوئچینگ سیستم در یک پک فلزی جانمایی می گردد.

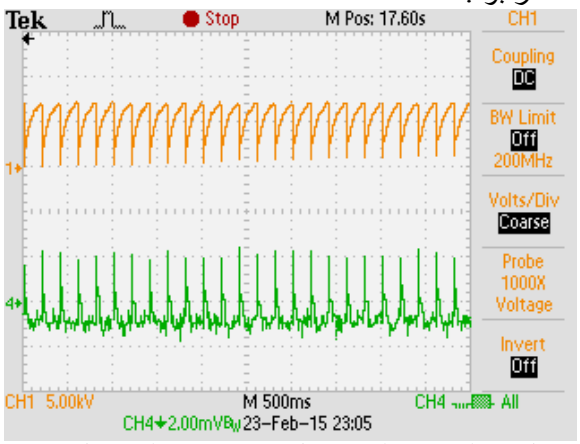
نتایج تجربی و بحث

در شکل ۲ می توان بخش کنترلی مبدل فلای بک ساخته شده را مشاهده نمود. ترمینال های خروجی این ماژول مربوط به بخش ترانسفورماتور فلای بک و مدار تریگ کننده‌ی سوئیچ اسپارک گپ بوده و ترمینال ورودی آن مربوط به مدار نمونه

برداری می باشد. بخش فشار قوی این سیستم شامل ترانسفورماتور فلای بک و بانک خازنی می باشد که به صورت کاملا متقارن و به صورت موازی در کنار یکدیگر چیده شده اند. به منظورر برقراری ارتباط بین اپراتور و این ماژول کنترلی، از یک رابط گرافیکی نوشته شده به زبان برنامه نویسی C# استفاده شده است تا بتوان کلیه‌ی فرایندهای شارژ و دشارژ بانک خازنی را توسط یک لپ تاپ کنترل نمود. توسط این رابط گرافیکی می توان سطح ولتاژ شارژکنندگی، فرکانس شات و تعداد کل شات ها را تعیین نمود. همچنین اپراتور می تواند توسط این رابط، سیکل کاری موج PWM را به منظور افزایش راندمان شارژ تنظیم نماید. در طراحی اولیه‌ی بخش تریگ کننده‌ی این سیستم از یک سوئیچ اسپارک گپ که دارای طراحی بسیار ساده و با بازدهی بسیار بالایی است، استفاده شده است. با تولید ولتاژ ۱۵ کیلوولت توسط مدار تریگ کننده‌ی این بخش و ارسال دستور تخلیه توسط اپراتور، این سوئیچ قادر است تا بانک خازنی را در هر ثانیه، پنج بار تخلیه نماید. به منظور اندازه گیری و تحلیل پالس های تخلیه‌ی این منبع تغذیه پالسی از یک پیچه روگوفسکی (ساخت شرکت Power Electronic Measurement) جهت اندازه گیری جریان تخلیه، و از یک پروب ولتاژ جهت اندازه گیری ولتاژ تخلیه استفاده شده است. در شکل ۳ می توان پالس های ولتاژ و جریان تخلیه راکتور همجوشی هسته‌ای که با فشار گاز آرگون ٤ تور و ولتاژ شارژکنندگی ۷ کیلو ولت اندازه گیری شده است را مشاهده نمود. همانطور که از شکل ۳ مشخص است، فرایند شارژ و دشارژ منبع تغذیه پالسی در راکتور همجوشی هسته ای به خوبی انجام گرفته است که نشان از عملکرد صحیح این منبع تغذیه پالسی دارد. همچنین می توان می توان زمان خیز ۱۰%- ۹۰% ولتاژ شارژکنندگی در یک شات را مشاهده کرد که برابر ۱۱۰ نانوثانیه می باشد که طبق طراحی انجام شده نیز همین نتیجه مورد انتظار بود.



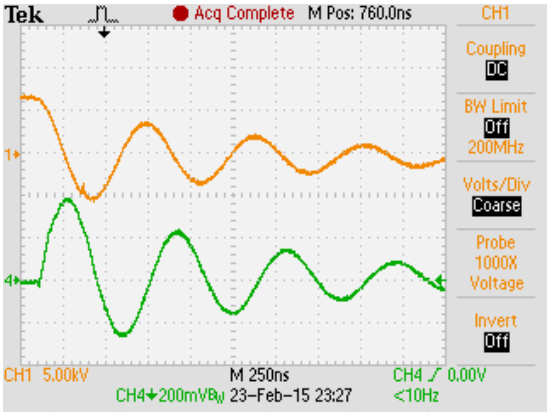
شکل ۲: ساخت نمونه اولیه‌ی بخش کنترلی منبع تغذیه پالسی راکتور همجوشی گرما-هسته ای.



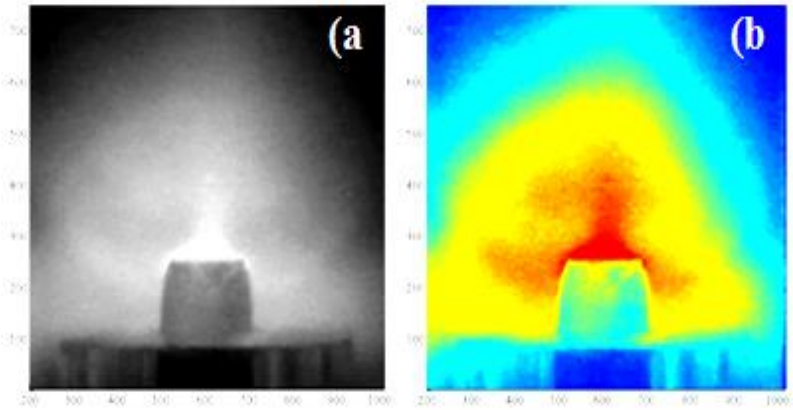
شکل ۳: پالس های ولتاژ (کانال ۱) و جریان تخلیه (کانال ۴) راکتور همجوشی هسته ای با فشار گاز آرگون ۴ تور و ولتاژ شارژکنندگی ۷ کیلو ولت.

از مهمترین پارامترهای یک راکتور همجوشی هسته ای، اندکتانس کل مربوط به بخش محفظه‌ی خلاء و بانک خازنی آن می‌باشد. طراحی محفظه‌ی خلاء و بانک خازنی این راکتور همواره باید به گونه ای باشد که دارای حداقل اندوکتانس گردد؛ چراکه اندوکتانس سیستم مهمترین پارامتر اثرگذار بر جریان تخلیه و در نتیجه بر وقوع پدیده‌ی تنگش پلاسما در راکتور می‌باشد. به منظور اندازه گیری اندوکتانس کل سیستم و نیز اطمینان از وقوع پدیده‌ی تنگش پلاسما در راکتور جریان و ولتاژ تخلیه‌ی سیستم در حالت تک شات اندازه گیری می شود. در شکل ٤ می توان شکل موج ولتاژ و جریان تخلیه سیستم در حالت تک شات با فشار گاز آرگون ٤ تور و ولتاژ شارژکنندگی ۷ کیلو ولت، و در شکل ٥ نیز می‌توان عکس گرفته شده از ستون پینچ پلاسما را در همان شرایط کاری مشاهده نمود. همانطور که مشاهده می شود به دلیل فرکانس بسیار بالای سیگنال تخلیه

دستگاه (از مرتبه ۱۶۰ مگاهرتز) و پهنای باند کوچکتر پیچه روگوفسکی (۱۶ کیلو هرتز) وقوع پینچ بر روی سیگنال جریان مشخص نمی باشد، اما بر روی سیگنال ولتاژ می توان اثر اسپایک تیز پینچ رو مشاهده نمود. همچنین، از شکل موج جریان تخلیه‌ی بانک خازنی مشخص است زمان یک چهارم تخلیه برابر ۱۰۰ نانو ثانیه می باشد. در این صورت با توجه به ظرفیت بانک خازنی سیستم، اندوکتانس کل برابر ۴۸ نانو هانری خواهد شد. ضمن مشاهده‌ی اثر وقوع پدیده‌ی تنگش پلاسما در راکتور که نشان از عملکرد صحیح دستگاه دارد، به مقایسه‌ی بین اندکتانس این سیستم با سیستم‌های مشابه پرداخته می شود. با بررسی اندوکتانس دستگاه های انرژی پایین مشاهده شد اندوکتانس این سیستم در رنج اندوکتانس راکتورهای موجود می‌باشد که نشان از طراحی دقیق بانک خازنی، محفظه‌ی خلاء راکتور و سوئیچ اسپارک گپ دارد. این اندوکتانس پایین راکتور به آن اجازه می دهد تا شرایط ایجاد واکنش های هسته ای را با دستیابی به پدیده‌ی تنگش پلاسما و تولید نوترون‌های سریع تامین نماید.



شکل ٤: شکل موج ولتاژ (کانال ۱) و جریان تخلیه (کانال ۲) سیستم در حالت تک شات، با فشار گاز ٤ تور و ولتاژ ۷ کیلو ولت.



شکل ٥: a)عکس گرفته شده از ستون پینچ پلاسما در شرایط کاری با فشار گاز ٤ تور و ولتاژ ۷ کیلو ولت؛ b) تصویر پردازش شده جهت متمایز نمودن ستون پینچ پلاسما.

نتیجه گیری

طراحی، ساخت و تست یک منبع تغذیه پالسی جهت تغذیه‌ی یک راکتور همجوشی گرما-هسته ای با قابلیت تخلیه تکراری ٥ بار در ثانیه گزارش گردید. این منبع تغذیه پالسی قادر است تا ولتاژهای فشار قوی ٤ الی ۷ کیلو وقت را به صورت پله های یک کیلو ولتی در اختیار کاربر قرار دهد. با اندازه گیری ولتاژ و جریان تخلیه‌ی منبع تغذیه پالسی در حالی که در حال تخلیه شدن در محفظه‌ی خلاء راکتور هسته ای با فشار گاز آرگون ٤ تور و ولتاژ ۷ کیلو ولت بود، از عملکرد دقیق منبع تغذیه پالسی طبق طراحی انجام شده اطمینان حاصل گردید. کلیه‌ی دستورات شارژ و دشارژ بانک خازنی این سیستم از جمله میزان ولتاژ شارژکنندگی، تعداد شات در ثانیه، و تعداد کل شات ها توسط یک رابط گرافیکی نوشته شده با زبان C# انجام گرفت. سوئیچ اسپارک گپ این سیستم به صورت کاملا بومی طراحی و ساخته شده است که عملکرد صحیح تخلیه‌ی تکراری سیستم اثباتی بر طراحی دقیق این سوئیچ و مدار تولید کننده‌ی ولتاژ ۱٥ کیلو ولت جهت تریگ کردن آن بود.

مراجع

[1] R. K. Rout, P. Mishra, A. M. Rawool, L. V. Kulkarni, and C. G. Satish, "Battery powered tabletop pulsed neutron source based on a sealed miniature plasma focus device," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 41, p. 205-211, 2008.
[2] P. Silva, L. Soto, G. Sylvester, M. Zambra, H. Bruzzone, and A. Clausse, "Design and construction of a very small plasma focus in the limit of low energy," American Institute of Physics Conference Proceedings, vol. 563(1), p. 235-239, 2001.
[3] M. Borage, S. Tiwari, and S. Kotaiah, "Constant-current, constant-voltage half-bridge resonant power supply for capacitor charging, " Electric Power Applications, IEE Proceedings- IET, 2006.
[4] N. Mohan, "First course on power electronics and drives, " Mnpere, vol. 252, 2003.