

طراحی و ساخت منبع تغذیه دستگاه پلاسمای کانونی 5kJ نوع مدر با قابلیت عملکرد فرکانسی و قابل حمل

محمد رضا عبدی^۱، حشمت الله جمالی^۲، بابک شیرانی^۲

^۱دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

^۲دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

پس از اینکه دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی 5kJ و با طراحی نوع *Mather* طراحی و ساخته شد. اولویت پژوهش های صورت گرفته در راستای صنعتی سازی این دستگاه بوده است. اولین گامی که این هدف را ممکن می نمود طراحی و ساخت منبع تغذیه فرکانسی و قابل حمل کردن دستگاه پلاسمای کانونی است، در این طرح جهت تامین انرژی لازم دستگاه پلاسمای کانونی از باتری استفاده شده است که ضمن رفع محدودیت تعداد تخلیه خازن در واحد زمان و کاهش چشم گیر زمان شارژ خازن، قابلیت پرتابل نمودن سیستم نیز فراهم شده است. در این مقاله خلاصه ای از محاسبات مربوط به طراحی و ساخت این دستگاه آورده شده است.

مقدمه:

دستگاه پلاسمای کانونی را می توان متداول ترین ابزار آزمایشگاهی جهت تحقیقات در زمینه گداخت هسته ای نامید. این دستگاه در اوایل دهه شصت توسط مدر در آمریکا [۱] و فیلیپوف در شوروی سابق [۲] به طور جداگانه طراحی و ساخته شد. هم اکنون از این دستگاه نمونه های زیادی با انرژی های زیر کیلو ژول تا مگا ژول ساخته شده است. کاربردهای روز افزون این دستگاه به عنوان یک مولد نوترون، اشعه ایکس، باریکه الکترون و یون پالسی می تواند زمینه های جدیدی از کاربردهای صنعتی این دستگاه را مهیا کرده است. عملکرد پالسی این دستگاه ناشی از شارژ و دشارژ بانک خازنی آن می باشد. هر چه توانایی انجام شارژ و دشارژ خازن دستگاه در واحد زمان بیشتر باشد، میزان پرتوهای خروجی دستگاه نیز بیشتر می شود. که این امر موجب افزایش راندمان پرتوهای خروجی و نهایتاً امکان کاربردهای صنعتی این دستگاه می شود. طراحی منبع تغذیه ای که قادر باشد با عملکردی متناوبی یک خازن با حجم انرژی بالا را در زمان کوتاهی شارژ کند با مشکل هایی از جمله محدودیت های شبکه برق همراه خواهد شد. رفع این محدودیت ها مستلزم استفاده از ادوات الکتریکی است که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. با استفاده از الکترونیک قدرت و سوئیچ های ماسفتی و همچنین باتری های با قابلیت شارژ دوباره، مشکلات مربوط به منابع تغذیه فرکانسی معمولی بر طرف گردیده است. هر عملکرد پالسی دستگاه پلاسمای کانونی نیازمند انرژی الکتریکی لازم می باشد، که از طریق ذخیره انرژی الکتریکی بر روی بانک خازنی تامین می شود. به منظور شارژ خازن های با ولتاژ چندین کیلوولت این دستگاه از دو روش برای افزایش ولتاژ می توان استفاده نمود؛ روش اول استفاده از مدارات چند برابر کننده ولتاژ خازنی و دیودی و روش دوم استفاده از ترانسفورماتور افزایش دهنده ولتاژ می باشد. استفاده از مدارات چند برابر کننده ولتاژ خازنی-دیودی به منظور عملکرد فرکانسی نیازمند قطعات الکترونیکی با مشخصات الکتریکی بالا دارد که این باعث افزایش هزینه و همچنین ابعاد سیستم خواهد شد. استفاده از چند

برابر کننده‌های ولتاژ ترانسفورماتوری نیز به منظور تحویل توان مورد نیاز برای عملکرد فرکانسی سیستم، باید دارای هسته با حجم آهن زیاد همچنین سیم پیچ‌هایی با تعداد دور بالا باشد که این دو عامل باعث افزایش حجم و وزن شارژر می‌گردد.

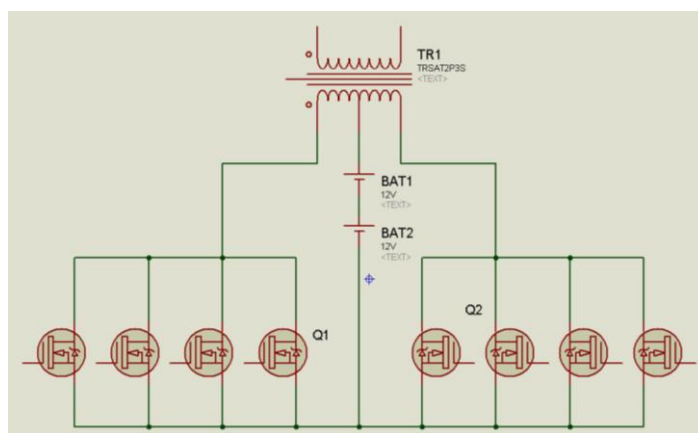
نحوه طراحی:

در این طرح که هدف آن کاهش زمان شارژ و ابعاد سیستم می‌باشد به منظور افزایش ولتاژ از تکنولوژی سوئیچینگ استفاده گردیده است. در این تکنولوژی برای افزایش ولتاژ از ترانسفورماتور افزایش‌دهنده‌ای استفاده می‌گردد که در مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی در فرکانس بسیار بالاتری کار می‌کند. این افزایش فرکانس باعث افزایش تعداد سیکل‌های تحویلی توان، توسط هسته، در واحد زمان می‌شود و نتیجه آن کاهش سطح مقطع هسته مورد نیاز برای ترانسفورماتور می‌باشد. از طرفی افزایش فرکانس ترانسفورماتور باعث کاهش ضریب دور بر ولت ترانسفورماتور شده و نتیجه آن کاهش تعداد دور سیم پیچی، کاهش حجم ترانس و کاهش تلفات مسی می‌باشد. در ترانسفورماتورها با افزایش فرکانس، تلفات مربوطه به هسته (همان تلفات فوکو و هیستریزیس) افزایش می‌یابد به همین دلیل به منظور کاهش تلفات هسته در فرکانس‌های چندین کیلو هرتز برای ترانسفورماتورها از هسته نوع فریت استفاده می‌گردد. دلیل این کار کمتر بودن سطح حلقه هیستریزیس فریت و عایق الکتریکی بودن آن در مقایسه با هسته‌های آهنی می‌باشد که به ترتیب تلفات هیستریزیس و فوکو را کاهش می‌دهد.

به منظور طراحی این شارژر سوئیچینگ دو الگوی بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. این دو الگو، الگوی جریان ثابت و الگوی توان ثابت است. انتخاب مشخصات قطعات الکتریکی متناسب با انتخاب یکی از این دو الگوی شارژ انجام می‌گیرد. در الگوی شارژ جریان ثابت با توجه به مشخصات الکتریکی خازن ($V=30\text{Kv}$ ، $C=12,02\text{ }\mu\text{F}$) بار الکتریکی ذخیره شده در خازن با رابطه $Q=CV$ ، برابر با $0,360\text{C}$ است. در صورتی که زمان مطلوب شارژ خازن ۱ ثانیه باشد، جریان شارژ از رابطه $I=Q/t$ برابر با 360mA خواهد شد. با توجه به این نتایج در صورتی که کنترلر سیستم بر اساس مقادیر فیدبک ولتاژ و جریان خروجی، جریان خروجی را روی مقدار ثابت 360 میلی آمپر نگه دارد (از طریق افزایش تدریجی ولتاژ ورودی ترانس به روش PWM) ماکزیمم توان انتقالی هسته فریت، زمان رسیدن خازن به ماکزیمم ولتاژ می‌باشد. ماکزیمم توان انتقالی توسط هسته فریت، از رابطه $P=VI$ برابر با $10,8\text{KW}$ ($30\text{kV} * 360\text{mA}$) خواهد شد. همچنین ماکزیمم جریان ورودی، از رابطه $I_{in}=P/V_{in}$ برابر با 450A ($10,8\text{KW}/24\text{V}$) است.

اما در الگو توان ثابت در تمام مدت شارژ خازن، از حداکثر قابلیت توان دهی هسته استفاده می‌شود. ثمره این الگو کاهش ماکزیمم توان انتقالی هسته می‌باشد که موجب کاهش حجم هسته ترانسفورماتور شارژر و کاهش ماکزیمم جریان ورودی سوئیچ شده توسط مسافت های قدرت می‌شود. عیب این الگو افزایش چند برابری جریان شارژ (همان جریان خروجی) در لحظات اولیه شارژ می‌باشد. با بررسی انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که انتخاب هر یک از الگوهای ذکر شده مشخصه الکتریکی خاصی را برای قطعات الکترونیکی سیستم مشخص می‌کند. مهمترین مشخصه الکتریکی که در مقایسه نتایج دو الگو، دارای بیشترین تغییرات است،

مشخصه جریان ورودی (جریان ماسفت های قدرت) و جریان خروجی (جریان فست دیودهای ولتاژ بالا) می باشد. بدین ترتیب مشخصات عناصر موجود در بازار می تواند نوع الگو را مشخص کند. با توجه به محدودیت جریان دیود های خروجی در این طرح الگوی جریان ثابت توسط کنترلر اجرا می گردد. طراحی دستگاه به ۴ بخش اصلی، سوئیچینگ قدرت، اسنابر ها، ترانسفورماتور و یکسوساز ولتاژ خروجی تقسیم می شود. در مرحله اول طراحی سوئیچینگ قدرت بر اساس شماتیک زیر توسط سوئیچ های ماسفتی جریان متناوبی در اولیه ترانس هسته فریت به وجود می آید که این جریان، به وجود آورنده فوران مغناطیسی مورد نیاز در هسته است.

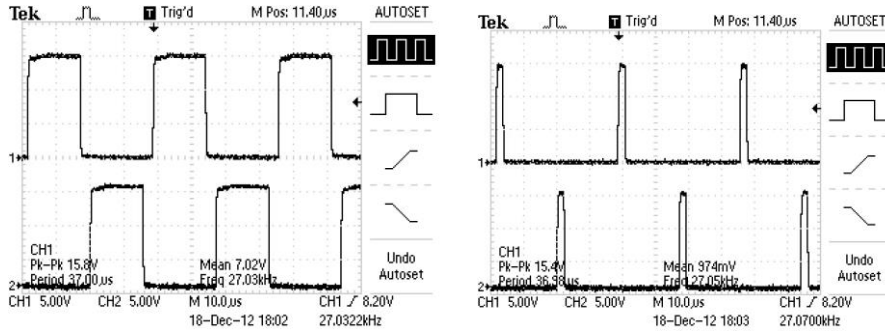


شکل (۱): شماتیک کلی بخش سوئیچینگ قدرت

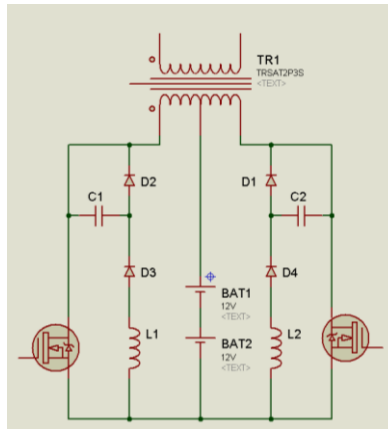
گیت هر گروه از ماسفت های قدرت توسط پالسی با عرض متغیر (PWM) تغذیه می گردد که این عمل کنترل جریان شارژ خازن دستگاه را به همراه دارد. در شکل (۲) PWM تولید شده در فرکانس ۲۷ کیلو هرتز در دو عرض پالس مینیمم و ماکزیمم نمایش داده شده است.

در مرحله دوم پس از اعمال PWM به ماسفت های قدرت، به منظور کاهش نوسانات ناشی از سلف پراکندگی هسته از اسنابر بدون تلفات سه سر استفاده گردیده است.

در مرحله سوم، پس از انتخاب الگوی مناسب برای شارژ خازن، طراحی ترانسفورماتور با قابلیت سوئیچینگ انجام شده است. مشخصات مهم در طراحی این ترانسفورماتور، سیم پیچ اولیه (N_1)، سیم پیچ ثانویه (N_2)، ابعاد و جنس هسته می باشد. فرکانس سوئیچینگ و چگالی شار مغناطیسی بر اساس مشخصات هسته طراحی می گردد.

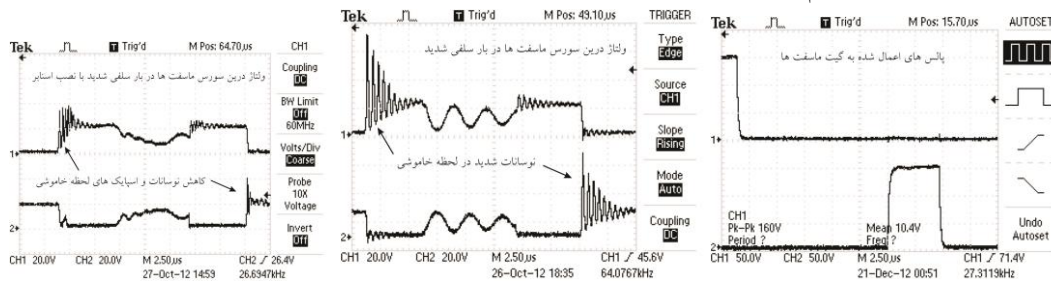


شکل (۲): پالس اعمال شده به گیت ماسفت های قدرت در بازوهای مختلف مدار اولیه ترانسفورماتور



شکل (۳): شماتیک اسنابر بدون اتلاف سه سر

برای تعیین تعداد دور سیم پیچی اولیه و ثانویه یک ترانسفورماتور می توان از روابط (۱) و (۲) استفاده کرد



شکل (۴): تاثیر نصب اسنابر در مدار سوئیچینگ قدرت - بررسی سیگنال های مختلف به صورت همزمان

$$N_1 = U_1 / (\xi \times B_{max} \times S_{fr} \times f) \quad (1)$$

$$N_2 = (N_1 \times U_2) / U_1 \quad (2)$$

در رابطه بالا مقادیر U_1 و U_2 ولتاژهای اولیه و ثانویه ترانس، N_1 و N_2 تعداد دور سیم های اولیه و ثانویه ،

B_{max} ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی، S_{fr} سطح مقطع موثر هسته فریت، f فرکانس سوئیچینگ می باشد.

مقادیر سطح مقطع فریت، ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی و فرکانس سوئیچینگ قدرت به شدت به یکدیگر

وابسته می باشد. هسته فریت انتخاب شده از نوع MF198 ساخت شرکت tridelta که طبق کاتالوگ مربوطه

در فرکانس سوئیچینگ ۲۵ کیلو هرتز ، $PF=8000$ می باشد. (ضریب PF برابر است با حاصل ضرب فرکانس

در چگالی شار مغناطیسی است. بنابراین چگالی شار ماکزیمم از رابطه (۳) به دست می‌آید. که برابر با ۳۲۰۰ گوس است.

$$B_{\max} = PF/F \quad (3)$$

در این پروژه به دلیل در نظر گرفتن شرایط ویژه به منظور افزایش ضریب اطمینان، طراحی بر اساس گوس ۱۵۰۰ انجام گردیده است.

هسته استفاده شده دارای سطح مقطع ۱۷ سانتی متر مربع می‌باشد البته در دید اول این سطح مقطع برای توان در نظر گرفته شده (۱۰ کیلو وات) زیاد به نظر می‌رسد به عبارت دیگر با هسته با سطح مقطع کمتر و در فرکانس سوئیچینگ بیشتر نیز می‌توان این توان را دریافت کرد، ولی نکته قابل توجه در جریان اولیه می‌باشد که توسط سوئیچ‌های ماسفتی قطع و وصل می‌شود. مسلماً کاهش فرکانس سوئیچینگ در جریان‌های بالا منجر به کاهش تلفات سوئیچینگ و تلفات اسنابر می‌شود. بدین ترتیب دور بر ولت مدار مغناطیس طراحی شده به شرح زیر است:

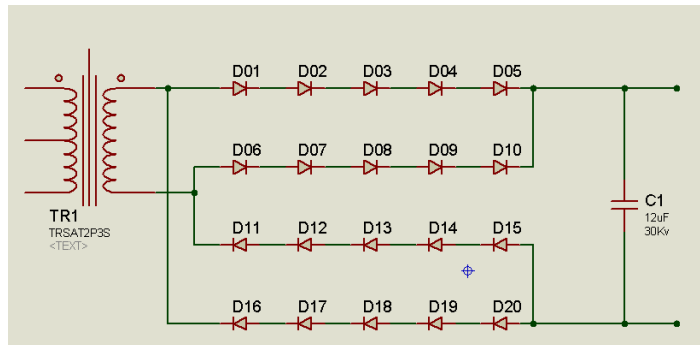
$$n = 10^4 / (\epsilon \times B_{\max} \times S_{fe} \times f) = 10^4 / (\epsilon \times 1500 \times 17 \times 25000) = 0,0392$$

این بدین معنی است که حدوداً به ازای هر ۲۵ ولت در اولیه ۱ دور سیم پیچ مورد نیاز است. همچنین در ثانویه به ازای هر دور سیم پیچی ۲۵ ولت ولتاژ القا میگردد. تعداد دور ثانویه بر اساس رابطه (۲) برابر با ۱۲۰۰ دور است.

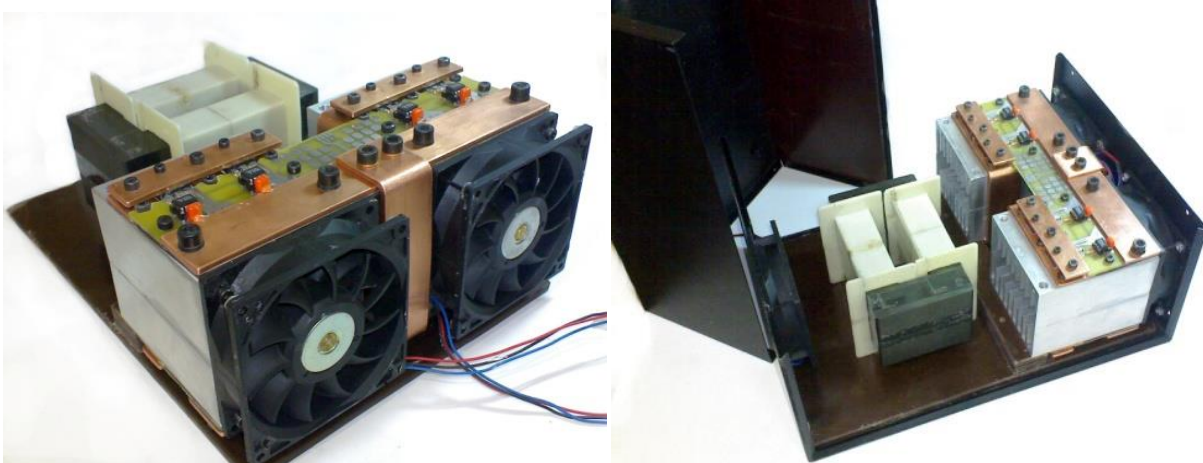
محاسبه سطح مقطع سیم اولیه و ثانویه و همچنین مدار سوئیچینگ قدرت (شینه‌ها) بر اساس چگالی جریان ۴ آمپر بر میلی متر مربع انتخاب گردیده است. بر اساس رابطه (۴) سطح مقطع سیم اولیه برابر با ۵۶,۲۵ mm² است.

$$A = I/J \quad (4)$$

به منظور کاهش اثر پوستی در فرکانس‌های بالا این سطح مقطع را توسط ۱۰ عدد سیم لاکمی نمره ۲,۶۵ ایجاد می‌گردد. همچنین بر اساس رابطه (۴) سطح مقطع سیم ثانویه برابر با ۰,۰۹ mm² است. با توجه به کم بودن سطح مقطع می‌توان از اثر پوستی صرف نظر کرد و بدین ترتیب از سیم لاکمی نمره ۰,۳۰ استفاده گردیده است. در مرحله آخر ولتاژ تولید شده در ثانویه ترانسفورماتور توسط پل یکسوساز دیودی، یکسو شده و برای شارژ خازن به خروجی دستگاه منتقل می‌گردد. نکته قابل توجه به منظور عمل یکسوسازی در این مرحله، فرکانس ۲۵ کیلو هرتزی و سطح ولتاژ ۳۰ کیلو ولتی سیگنال ورودی پل دیود است که به منظور عمل یکسوسازی بر اساس شماتیک شکل (۵) از دیودهای ولتاژ بالای فوق سریع استفاده گردیده است.



شکل (۵): شماتیک یکسو سازی خروجی



شکل (۶): تصاویری از دستگاه ساخته شده

نتایج:

مهم‌ترین نتیجه به دست آمده از این طرح پرتابل شدن و عملکرد فرکانسی دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی 5 kJ است. که زمینه را برای برخی از کاربردهای صنعتی دستگاه پلاسمای کانونی فراهم می‌کند. از دیگر نتایج ساخت این دستگاه می‌توان به قابلیت برنامه‌ریزی و کنترل هوشمند زمان شارژ خازن و قابلیت صادر کردن فرمان تخلیه خازن به صورت اتوماتیک، کاهش حجم دستگاه شارژر خازن در مقایسه با حجم شارژرهای موجود، افزایش راندمان پرتوهای خروجی و افزایش راندمان شارژ دستگاه اشاره کرد.

مراجع:

- [۱] J.W. Mather, *Phys. of Fluids*, ۳ (۱۹۶۰) ۱۳۴
[۲] N.V. Filippov, T.I. Filippova, and V.P. Vinogradov, *Nucl. Fus. Suppl.*, ۲ (۱۹۶۲) ۵۷۷