J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 56, pp. 1-7, 2011

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۵۶، صفحات ۷-۱، ۱۳۹۰

فشرده‌سازی مغناطیسی تپ منابع تغذیه‌ی دستگاه‌های مولد پرتو

آرش صادقی‌پناه، فریدون عباسی دوانی*
گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران- ایران

چکیده: تپ‌های توان بالا با پهنای کم کاربردهای بسیاری در دستگاه‌های مولد پرتو نظیر دستگاه‌های رادیوگرافی تپی و مولدهای ریزامواج پرتوان دارند. یکی از روش‌های فشرده‌سازی تپ‌های توان بالا، فشرده‌سازی مغناطیسی است. این مقاله ابتدا به طراحی یک مولد تسلا با هسته‌ی اشباع شده برای تولید یک تپ با ولتاژ ۲۰۰kV پرداخته و سپس تأثیر اشباع هسته‌ی این ترانسفورماتور بر فشرده‌سازی تپ خروجی آن به کمک نرم‌افزارهای CST EM Studio و Proteus را مورد بررسی قرار می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که با اشباع هسته‌ی ترانسفورماتور، رسانایی مغناطیسی و در نتیجه القاییدگی سیم‌پیچ‌های آن کاهش می‌یابد که در اثر آن بسامد نوسانات جریان در ترانسفورماتور به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابد که این، به کاهش پهنای تپ خروجی می‌انجامد.

کلید واژه‌ها: *فشرده‌سازی مغناطیسی تپ، مولد تسلا، تپ توان بالا، منبع تغذیه‌ی تپی*

Magnetic Pulse Compression in Power Supplies of Radiation Generator Devices

A. Sadeghipanah, F. Abbasi Davani*
Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

Abstract: High power pulses with low widths have many applications in radiation generator devices as flash radiography and high power microwave generators. One of the compression methods of high power pulses is magnetic pulse compression. In this paper a Tesla generator with saturated core which produces a 200kV voltage pulse has been designed and then the effect of saturation of the core in the compression of the output pulse using Proteus and CST EM Studio codes was studied. Our studies showed that with saturation of the transformer's core, the magnetic permeability and hence the inductance of the transformer's coils will decrease and consequently the frequency of current oscillations in the transformer will momentarily increase where it will result in the decrease of the output pulse width.

Keywords: ***Magnetic Pulse Compression, Tesla Generator, High Power Pulse, Pulsed Power Supply***

*email: fabbasi@sbu.ac.ir
تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۹/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۳/۱۸

۱. مقدمه

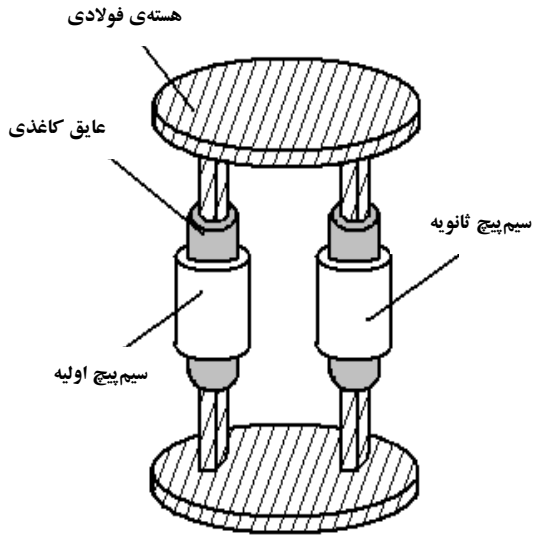
سیستم‌های مولد تپ‌های توان بالا کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف نظیر جوش لیزری، عکس‌برداری، شکل‌دهی فلزات، و ... دارند، اما یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن‌ها در ساخت دستگاه‌های مولد پرتو نظیر مولدهای باریکه‌ی الکترونی شدت بالا، دستگاه‌های رادیوگرافی تپی، مولدهای نوترون تپی و ... است [۱].

یکی از انواع این مولدها که استفاده از آن‌ها امروزه مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته، مولدهای تسلا است. چرا که انواع دیگر مولدهای تپ توان بالا نظیر مولدهای مارکس و ذخیره‌کننده‌های انرژی القایی دارای مشکلاتی مانند طول عمر پایین، عدم توانایی تولید تپ‌های متناوب و ابعاد و وزن بالا هستند. ضمناً مولدهای تسلا در مقایسه با سایر مولدها دارای مزایای بسیاری نیز هستند که از آن جمله می‌توان به بسامد کار بالا، طول عمر و قابلیت اطمینان و امنیت بالا، هزینه و ابعاد و وزن کم و عدم نیاز به ولتاژ اولیه‌ی بالا اشاره کرد [۱ و ۲].

این مزایا باعث شده‌اند که امروزه بسیاری از شتاب‌دهنده‌های دنیا نظیر شتاب‌دهنده‌ی TONUS در روسیه سیستم تخلیه‌ی انرژی اولیه‌ی خود را از مولد مارکس به مولد تسلا ارتقاء دهند [۳].

۲. طراحی ترانسفورماتور تسلا با هسته‌ی U

هدف این پژوهش، طراحی یک مولد تپ برای تغذیه‌ی یک شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی قابل حمل است که توانایی تولید تپ با ولتاژ ۲۰۰kV، جریان حدود ۵mA و پهنای تپ کم‌تر از ۱μs را داشته باشد. البته به علت پایین بودن جریان مورد نیاز، حداکثر جریان خروجی مولد تسلا بسیار بیش‌تر از آن خواهد بود. لذا این پارامتر در روند طراحی تأثیری نخواهد داشت. طراحی‌های متفاوتی برای هسته‌ی ترانسفورماتور تسلا وجود دارد که از میان آن‌ها هسته‌ی U در مواردی که از خطوط شکل‌دهنده‌ی تپ استفاده نمی‌شود مناسب‌ترین طراحی از نظر ابعاد، وزن و سادگی در ساخت هستند. شکل ۱ یک ترانسفورماتور تسلا با هسته‌ی U را نشان می‌دهد.



شکل ۱. یک ترانسفورماتور تسلا با هسته‌ی U.

به منظور عایق‌کاری ساده‌تر و نیز کاهش ابعاد، محفظه‌ی ترانس در روغن ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. این روغن‌ها توان تحمل میدان ۲۸۰kV/cm را در حالت جریان مستقیم (dc) دارند و در حالت تپی، برای تپ‌های با پهنای کم‌تر از ۱۰μs، می‌توانند تا ۵ برابر این میدان را نیز تحمل کنند [۲]. در نتیجه با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان بالا، فاصله‌ی ۲cm بین سیم‌پیچ‌ها برای جلوگیری از جرقه‌زنی در روغن کافی خواهد بود.

اما به دلیل رسانا بودن هسته‌ی ترانسفورماتور، احتمال ایجاد تخلیه‌ی سطحی و در نتیجه جرقه‌زنی بین دو طرف سیم‌پیچ ثانویه وجود دارد. با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان بالا، کافی است در دو طرف سیم‌پیچ ثانویه، عایق از هر دو طرف ۲cm ادامه داده شود. جنس عایق کاغذ در نظر گرفته شده است تا پیچیدن سیم‌پیچ‌ها به دور آن و نیز آغشته کردن تمام سطوح آن به روغن ساده‌تر باشد. به این ترتیب هیچ حباب هوایی که توان تحمل عایق را کاهش دهد در آن ایجاد نخواهد شد.

ولتاژ شارژ اولیه، یک مقدار معقول و قابل‌دسترس انتخاب شده است تا توانایی ایجاد تخلیه در گاف جرقه را نیز داشته باشد. این ولتاژ برابر ۱۰kV در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای نسبت تعداد دورهای سیم‌پیچ اولیه به ثانویه‌ی ترانس، داریم

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{200}{10} = 20 \qquad (1)$$

تعداد دورهای سیم‌پیچ اولیه به نحوی انتخاب شده است که هم القاییدگی در دو طرف ترانسفورماتور مناسب باشد و هم تعداد دورهای سیم‌پیچ ثانویه در حد قابل‌قبولی باقی بماند. تعداد دورهای این سیم‌پیچ $n_1=5$ در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای تعداد دورهای سیم‌پیچ ثانویه داریم

$$n_2=100 \qquad (2)$$

لذا اختلاف پتانسیل بین هر دو حلقه از سیم‌پیچ ثانویه برابر خواهد بود با

$$V_r=\frac{200\,kV}{100}=2kV \qquad (3)$$

در نتیجه اگر سیم‌پیچ‌ها با استفاده از سیم‌های معمولی به قطر ۲mm که روکشی از جنس لاستیک به ضخامت ۰٫۵mm دارند پیچیده شوند، روکش آن‌ها توانایی تحمل ولتاژ بین حلقه‌ها را خواهد داشت.

برای جلوگیری از ایجاد جریان‌های گردابی، لازم است هسته‌ی ترانسفورماتور به صورت ورقه ورقه ساخته شده و بین این ورقه‌ها عایقی نظیر کاغذ قرار گیرد.

چون فولاد از مقاومت بیش‌تری در برابر خوردگی و دیگر تغییرات شیمیایی برخوردار است، لذا از آن برای ساخت هسته‌ی ترانسفورماتور استفاده شده است.

برای سادگی در ساخت به شکل ورقه ورقه، میله‌هایی که سیم‌ها به دور آن‌ها پیچیده خواهند شد با سطح مقطع مربع شکل و به منظور افزایش ضریب تزویج، ضلع آن ۱٫۵cm انتخاب شده است. برای تحمل ولتاژ ۲۰۰kV با یک ضریب اطمینان بالا ضخامت عایق کاغذی ۳mm در نظر گرفته شده است و به منظور ساده‌سازی سیم‌پیچ‌ها، برای عایق کاغذی سطح مقطع، دایره‌ای فرض شده است. برای این که کم‌ترین ضخامت لایه‌ی کاغذ برابر ۳mm باشد، شعاع سطع مقطع باید این باشد

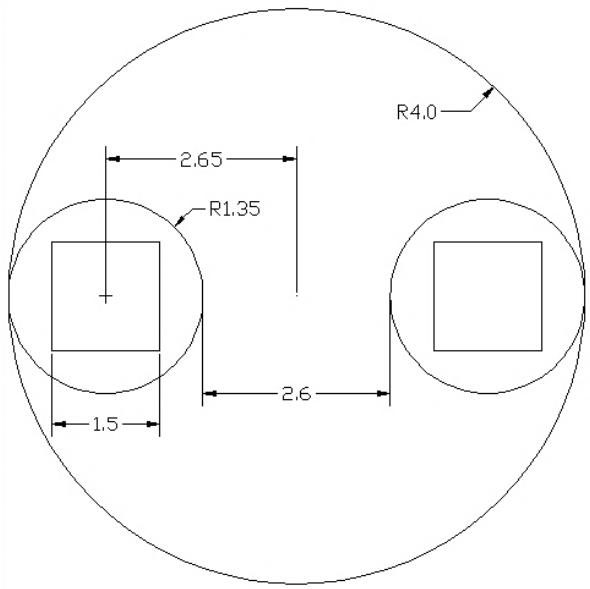
$$r=\sqrt{0.75^2+0.75^2}+0.3\approx 1.35\ cm \qquad (4)$$

قطر سیم‌ها همراه با روکش آن‌ها برابر ۳mm است و برای این که فاصله‌ی بین آن‌ها حداقل ۲cm باشد، شعاع صفحه‌های فولادی نگه‌دارنده‌ی میله‌ها برابر ۴cm انتخاب شده و مرکز میله‌ها و عایق‌های روی آن‌ها در شعاع ۲٫۶۵cm قرار گرفته است. ضخامت این صفحه‌ها نیز ۱cm در نظر گرفته شده است. شکل ۲ سطح مقطع یکی از این صفحه‌ها را که سطح مقطع میله‌های فولادی و عایق‌های‌شان روی آن رسم شده‌اند، نمایش می‌دهد.

با پیچیده شدن سیم‌های به قطر ۳mm روی عایق‌ها، فاصله‌ی سیم‌ها از یک‌دیگر برابر ۲cm خواهد شد. سیم‌پیچ ثانویه دارای ۱۰۰ دور است. لذا، طول آن برابر ۳۰cm می‌شود و از هر طرف نیز ۲cm فاصله تا صفحه‌ها موردنیاز است. در نتیجه طول میله‌ها و عایق‌های روی آن‌ها برابر ۳۴cm خواهد بود.

۳. شبیه‌سازی میدان‌های مغناطیسی و محاسبه‌ی القاییدگی‌ها و ضریب تزویج

در این قسمت، ترانسفورماتور طبق اندازه‌های طراحی شده برای آن در نرم‌افزار CST EM Studio و در حالت مغناطیسی ساکن مدل شده است. برای کاهش پیچیدگی مدل و در نتیجه کاهش زمان شبیه‌سازی، هسته به جای شکل ورقه ورقه به شکل یک‌پارچه مدل شده ولی جریان‌های گردابی در شبیه‌سازی محاسبه نشده و در نظر گرفته نشده‌اند. هسته از جنس فولاد ۱۰۰۸، عایق‌ها از جنس کاغذ و سیم‌پیچ‌ها از جنس مس در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۲. سطح مقطع یکی از صفحه‌های نگه‌دارنده به همراه سطح مقطع میله‌ها و عایق‌های روی آن‌ها.

طول سیم‌پیچ ثانویه برطبق طراحی ۳۰cm و طول سیم‌پیچ اولیه ۱۱cm انتخاب شده است (طول سیم‌پیچ اولیه در هیچ کدام از پارامترهای ترانسفورماتور تأثیر چندانی ندارد). برای محاسبه‌ی جریان سیم‌پیچ اولیه پهنای تپ خروجی در طراحی اولیه ۱μs در نظر گرفته شده است، لذا جریان بیشینه‌ی سیم‌پیچ اولیه برابر خواهد بود با

$$f = \frac{1}{2\mu s} = 50\,kHz \qquad (5)$$

$$\omega = 2\pi f = 3140000 \qquad (6)$$

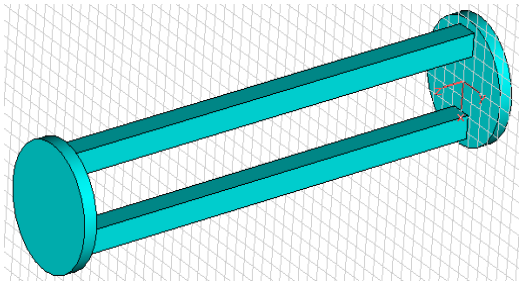
$$X_L = L\omega = 70\mu H \times 3140000 = 220\Omega \qquad (7)$$

$$I_{peak} = \frac{10\,kV}{220\Omega} = 45\,A \qquad (8)$$

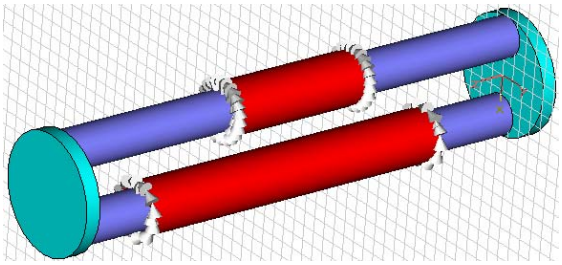
سیم‌پیچ اولیه با ۵ دور و با جریان ۴۵ آمپر و سیم‌پیچ ثانویه با ۱۰۰ دور و با جریان ۰٫۰۱ آمپر مدل شده است. چگالی شار ایجاد شده در درون هسته از جریان سیم‌پیچ اولیه ناشی می‌شود و جریان درون سیم‌پیچ ثانویه نیز در نتیجه‌ی این چگالی شار ایجاد می‌شود. جریان ورودی سیم‌پیچ ثانویه تنها برای محاسبه‌ی القاییدگی آن است، لذا این جریان تا حد ممکن کاهش می‌یابد تا تأثیری بر چگالی شار مغناطیسی درون هسته نداشته باشد. شکل ۳ هسته‌ی ترانسفورماتور و شکل ۴ ترانسفورماتور کامل به همراه عایق‌ها را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی با اعمال شرایط مرزی باز[1] برای میدان مغناطیسی در بیرون ترانسفورماتور و مش‌بندی شش وجهی[2] و با خطای کم‌تر از 10^{-6} برای انرژی، انجام شده است. مقادیر به دست آمده برای القاییدگی و ضریب تزویج ترانسفورماتور در جدول ۱ داده شده‌اند. لازم به ذکر است که نرم‌افزار CST مقادیر القاییدگی را برای حالتی که هسته هنوز اشباع نشده است محاسبه می‌کند. لذا در صورت اشباع هسته، این مقادیر بسته به میزان چگالی شار مغناطیسی کاهش خواهند یافت.

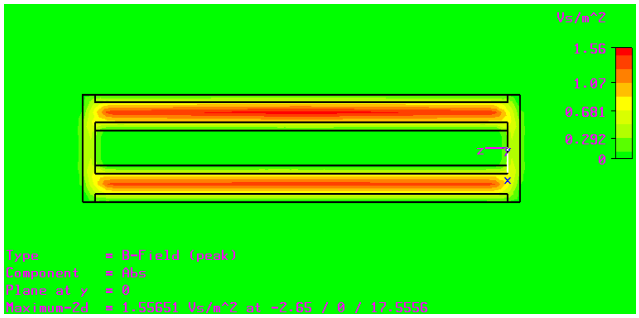
برای بررسی وضعیت هسته‌ی ترانسفورماتور از نظر اشباع‌شدگی، کافی است چگالی شار مغناطیسی و یا رسانایی مغناطیسی درون آن بررسی شود. شکل ۵ چگالی شار مغناطیسی و شکل ۶ رسانایی مغناطیسی در برش طولی هسته‌ی ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.



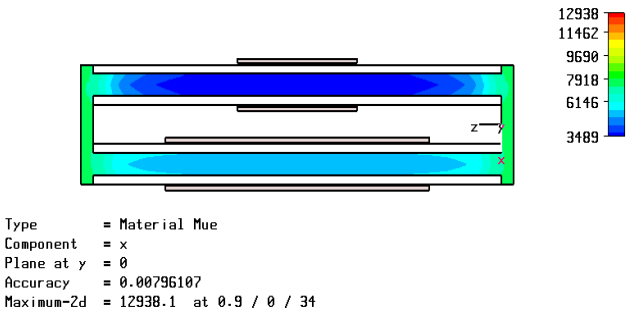
شکل ۳. هسته‌ی ترانسفورماتور مدل شده در نرم‌افزار CST.



شکل ۴. ترانسفورماتور کامل مدل شده در نرم‌افزار CST.



شکل ۵. چگالی شار مغناطیسی در برش طولی هسته‌ی ترانسفورماتور.



شکل ۶. رسانایی مغناطیسی در برش طولی هسته‌ی ترانسفورماتور.

جدول ۱. القاییدگی‌ها و ضریب تزویج ترانسفورماتور هسته U در نرم‌افزار CST

القاییدگی سیم‌پیچ اولیه، L_1	۷۱μH
القاییدگی سیم‌پیچ ثانویه، L_2	۲۴٫۷mH
القاییدگی متقابل دو سیم‌پیچ، M	۱٫۲۲mH
ضریب تزویج دو سیم‌پیچ، k	۰٫۹۲

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تقریباً تمام شار مغناطیسی از درون هسته و در نتیجه شار سیم‌پیچ اولیه از سیم‌پیچ ثانویه عبور می‌کند. بنابراین، ضریب تزویج ترانسفورماتور بسیار نزدیک ۱ خواهد بود. اما این مقدار چگالی شار مغناطیسی در بیش‌ترین مقدار خود به ۱٫۶T، که در ناحیه‌ی اشباع قرار دارد، نزدیک می‌شود. به علاوه رسانایی مغناطیسی نسبی نیز در این ناحیه کاهش یافته و به حدود ۳۵۰۰ می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی قرار گرفتن هسته‌ی ترانسفورماتور در ناحیه‌ی اشباع است.

۴. شبیه‌سازی مداری ترانسفورماتور با هسته‌ی U

در این بخش عملکرد ترانسفورماتور با هسته‌ی U طراحی شده در بخش‌های قبل به کمک نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی با استفاده از مدل ترانسفورماتور اشباع شده انجام گرفته است. مقادیر اولیه‌ی این ترانسفورماتور برای داشتن پهنای تپ ۱μs برابر است با

$$L_1=70\mu H \quad (9)$$

$$C_1=5nF \quad (10)$$

و نسبت سیم‌پیچ اولیه به سیم‌پیچ ثانویه نیز این است

$$\frac{n_p}{n_s}=0.05 \quad (11)$$

القاییدگی نشتی نیز با توجه به ضریب تزویج ۰٫۹۰، برابر ۱۰٪ القاییدگی اولیه انتخاب می‌شود

$$L_{leak}=7\mu H \quad (12)$$

و برای سطح مقطع هسته نیز با صرف‌نظر از افزایش آن در صفحه‌های ابتدایی و انتهایی آن به دلیل کوچکی مسیر شار آن‌ها داریم

$$A=2.25cm^2 \quad (13)$$

و طول مسیر شار نیز برابر است با

$$l=84cm \quad (14)$$

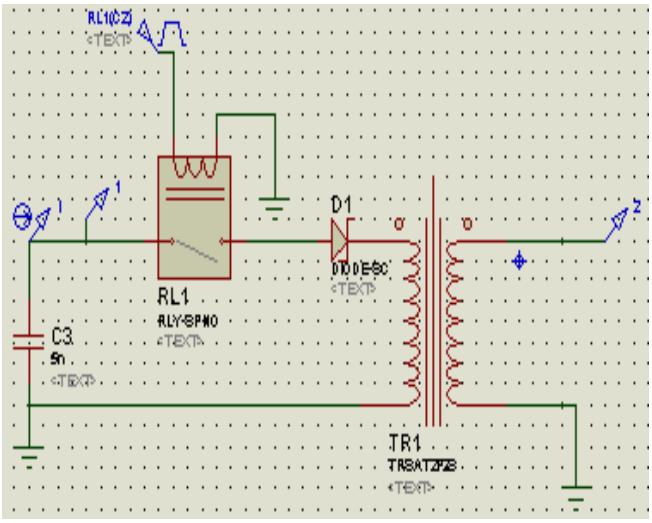
و در نهایت برای مقاومت سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه نیز داریم

$$R_p=2\Omega \quad (15)$$

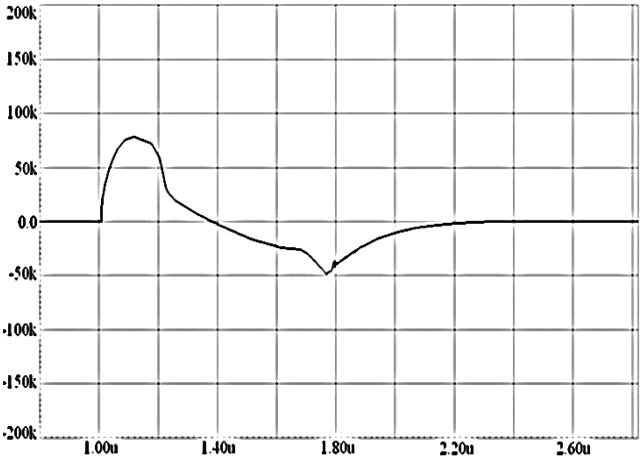
$$R_s=40\Omega \quad (16)$$

چون مدلی برای ارایه‌ی گاف جرقه[۳] در نرم‌افزار وجود ندارد، لذا برای نزدیک شدن به مدل واقعی از مدل رله[۴] برای مدل‌سازی سوئیچ‌ها استفاده و چون بسامد کار مدار تقریباً ثابت است، یک مقاومت ظاهری ثابت ۱Ω برای آن در نظر گرفته شد. زمان عملکرد سوئیچ نیز ۱۰۰ns انتخاب شد. برای نزدیک‌تر شدن به مدل گاف جرقه این مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شد که بعد از انتقال تپ اول جریان به سرعت قطع شده و تپ‌های بعدی عبور نکند. این مدل‌سازی با اتصال متوالی یک دیود سریع به سوئیچ به انجام رسید.

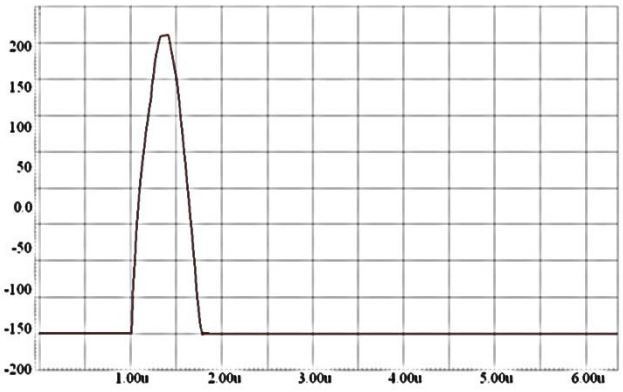
شکل ۷ مدل مولد تسلا با هسته‌ی U در نرم‌افزار Proteus، شکل ۸ ولتاژ خروجی آن و شکل ۹ جریان ورودی آن را برحسب زمان نشان می‌دهد.



شکل ۷. مدل مولد تسلا با هسته‌ی U با سوئیچ سریع در نرم‌افزار Proteus.



شکل ۸. ولتاژ خروجی مولد تسلا با هسته‌ی U با سوئیچ سریع.



شکل ۹. جریان ورودی مولد تسلا با هسته‌ی U با سوئیچ سریع.

همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، پهنای تپ خروجی به ۴۰۰ns کاهش یافته و به علاوه به دلیل استفاده از سوئیچ سریع، تنها دو تپ با دوگانگی (مثبت و منفی بودن)[۵] مخالف داریم که در تپ اول حداکثر دامنه قابل‌دسترسی است. اما به دلیل اشباع هسته، این مقدار تقریباً نصف مقدار موردنظر است. برای دست‌یابی به ولتاژ موردنظر در خروجی، نسبت تعداد دورهای سیم‌پیچ اولیه به ثانویه، n_p/n_s به تدریج کاهش داده شد و ولتاژ خروجی مولد به کمک نرم‌افزار محاسبه گردید. جدول ۲ نتیجه‌ی این محاسبات را ارایه می‌دهد.

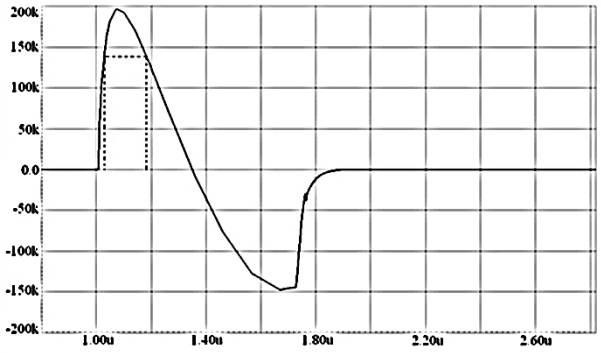
براساس اطلاعات جدول ۲ برای دست‌یابی به ولتاژ خروجی ۲۰۰kV، لازم است تعداد دورهای سیم‌پیچ ثانویه صد برابر سیم‌پیچ اولیه باشد. این افزایش در تعداد دورها، منجر به افزایش طول ترانسفورماتور خواهد شد، اما این افزایش تعداد دور، بین حلقه‌های سیم‌پیچ به کاهش اختلاف پتانسیل نیز می‌انجامد. در نتیجه ضخامت مورد نیاز روکش سیم کم‌تر شده و می‌توان به طول کم‌تری برای ترانسفورماتور دست یافت. ضمناً مقاومت سیم‌پیچ ثانویه نیز به ۲۰۰Ω افزایش خواهد یافت.

شکل ۱۰ ولتاژ خروجی ترانسفورماتور برحسب زمان را در حالت n_p/n_s=۰٫۰۱ نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که پهنای تپ برابر ۳۵۰ns و پهنای بخشی از تپ که دامنه‌ی آن بالاتر از ۱۴۰kV است برابر ۱۶۰ns است.

برای افزایش پهنای تپ، ظرفیت خازن به تدریج افزایش داده شده و پهنای تپ و پهنای بخشی از تپ که دامنه‌ی ولتاژ آن بالاتر از ۱۴۰kV است به کمک نرم‌افزار محاسبه شده است. جدول ۳ نتایج این محاسبات را نمایش می‌دهد.

جدول ۲. تغییرات ولتاژ خروجی برحسب نسبت سیم‌پیچ اولیه به ثانویه

n_p/n_s	V_{max} (kV)
۰٫۰۵	۸۰
۰٫۰۴	۹۰
۰٫۰۳	۱۱۵
۰٫۰۲	۱۴۰
۰٫۰۱	۲۰۰



شکل ۱۰. ولتاژ خروجی مولد تسلا با هسته‌ی U در حالت n_p/n_s=۰٫۰۱.

جدول ۳. تغییرات پهنای تپ برحسب ظرفیت خازن در مولد تسلا با هسته‌ی U

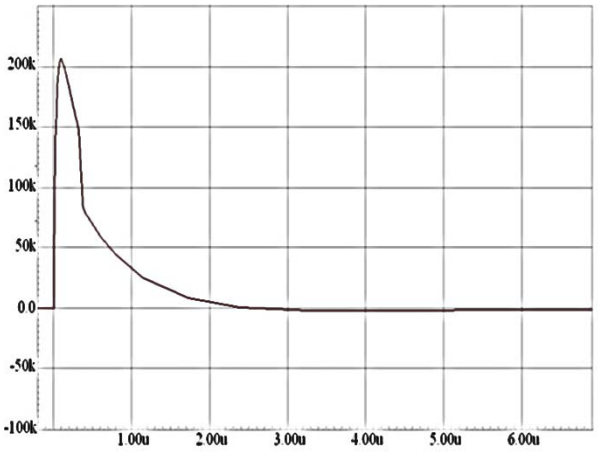
C_1 (nF)	پهنای تپ (ns)	پهنای بخش بالای ۱۴۰kV (ns)
۵	۳۵۰	۱۶۰
۲۵	۶۵۰	۲۶۰
۵۰	۸۶۰	۳۰۰
۱۰۰	۱۱۰۰	۳۰۰
۱۵۰	۱۲۶۰	۳۰۰
۲۰۰	۱۳۷۰	۳۰۰
۳۰۰	۱۵۴۰	۳۰۰
۵۰۰	۱۷۲۰	۳۰۰
۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰
۵۰۰۰	۲۵۸۰	۳۰۰

براساس اطلاعات جدول ۳، افزایش ظرفیت خازن در آن سوی ۵۰nF تنها دنباله‌ی تپ را افزایش می‌دهد و پهنای قسمتی که دامنه‌ی آن بالاتر از ۱۴۰kV است ثابت و مستقل از ظرفیت خازن می‌باشد. زیرا همان‌طور که در بخش‌های پیشین نیز ذکر شد، با افزایش ظرفیت خازن جریان افزایش یافته و در نتیجه هسته بیش‌تر به اشباع می‌رود. لذا رسانایی مغناطیسی آن بیش‌تر کاهش یافته و جریان مجدداً افزایش می‌یابد و این دو فرایند در پهنای تپ ۳۰۰ns با یک‌دیگر به تعادل می‌رسند.

لازم به ذکر است که با افزایش ظرفیت خازن، دامنه‌ی تپ منفیِ دوم کم‌تر می‌شود تا این که برای ظرفیت‌های بزرگ‌تر از ۱μF تقریباً ناچیز شود (کم‌تر از ۱۰kV). شکل ۱۱ ولتاژ خروجی مولد را برای C_1=۵μF برحسب زمان نشان می‌دهد.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

همان‌گونه که نتایج شبیه‌سازی مداری نشان می‌دهد، در حالت اشباع در اثر کاهش رسانایی مغناطیسی، القاییدگی سیم‌پیچ اولیه کاهش می‌یابد. در نتیجه جریان سیم‌پیچ اولیه هنگام تخلیه‌ی خازن بیش‌تر شده و از این‌رو هسته بیش‌تر به اشباع رفته، رسانایی مغناطیسی و القاییدگی بیش‌تر کاهش یافته و در نتیجه یک بازخورد[۶] مثبت رخ می‌دهد. اما این افزایش جریان و کاهش القاییدگی پس از مدتی با هم به تعادل می‌رسند که در نتیجه‌ی آن پهنای تپ خروجی در این ترانسفورماتور بدون وابستگی خاصی به اجزای مدار، به حدود یک تا دو میکروثانیه و پهنای آن بخش از تپ که دامنه‌ی آن بالاتر از ۱۴۰kV است نیز به ۳۰۰ns محدود می‌شود. اما این فشرده‌سازی باعث افزایش طول ترانسفورماتور از مقدار بهینه‌ی آن می‌شود چرا که برای رسیدن به ولتاژ موردنظر لازم است نسبت تعداد دورهای سیم‌پیچ ثانویه به سیم‌پیچ اولیه افزایش یابد.



شکل ۱۱. ولتاژ خروجی مولد تسلا با هسته‌ی U برای C_1=۵μF.

پی‌نوشت‌ها:

۱. Open Boundary Condition
۲. Hexahedral
۳. Spark Gap
۴. Relay
۵. Polarity
۶. Feedback

References:

1. Marco Denicolai, Tesla Transformer for experimentation and research–Helsinki university of technology–Licentiate thesis, 2-10, 24-28, 30 (May 2001).

2. Gennady A. Mesyats, Pulsed Power–Springer Science+Business Media, Inc., 251-256 (USA 2005).

3. A.I. Ryabchikov, et al, "Upgrading of the high-current accelerator "TONUS"," Nuclear Physics Institute at Tomsk Polytechnic University, Plenum Publishing Corporation, Tomsk (Russia 1977).