

طراحی پایه ترانسفورماتور هسته هوا، فرکانس بالا شتاب‌دهنده داینامیترن ۱/۵ مگاالکترون ولت، ۵۰ میلی آمپر

مجید ابراهیمی^۱، حسین آفریده^۱، فرشاد قاسمی^۲، محمد مهدی عطاران^۳، محمد میرزایی^۳

۱. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای
۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها
۳. شرکت صنایع پویا الکترو سامان نیرو (پالس نیرو)

چکیده :

امروزه شتاب‌دهنده داینامیترن از گروه شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک به دلیل بازدهی بالا و قیمت مناسب، در صنعت از کاربرد فراوانی برخوردار هستند. از کاربردهای شتاب‌دهنده داینامیترن استریل کردن تجهیزات پزشکی، پرتو دهی با مواد پلیمری و تصفیه آب در مراکز آب آشامیدنی به دلیل جریان بالا و آنالیز باریکه یونی به دلیل دقت انرژی بالا می‌توان نام برد. مهم‌ترین چالش ساخت در شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک، بخش منبع تغذیه و تامین ولتاژ بالا می‌باشد. عدم وجود هیچ گونه قطعه متحرک در منبع تغذیه و حجم کوچک آن، از مزایای منبع تغذیه این شتاب‌دهنده می‌باشد. در این مقاله به طراحی پایه بخش مهمی از منبع تغذیه شتاب‌دهنده داینامیترن با انرژی ۱/۵ مگاالکترون ولت و جریان ۵۰ میلی آمپر با استفاده از نرم افزارهای CST و Comsol پرداخته شده است. ترانسفورماتور ولتاژ بالا و فرکانس بالای هسته هوا به عنوان شکل دهنده و افزایش دهنده ولتاژ خروجی نوسانگر می‌باشد که موجب کاهش تعداد طبقات ستون افزایش دهنده ولتاژ می‌شود. از طرف دیگر وجود ترانسفورماتور نیز موجب ایزولاسیون بین منبع تغذیه و محفظه ولتاژ فشار قوی خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌دهنده صنعتی داینامیترن، ترانسفورماتور ولتاژ بالا، هسته هوا، رزونانس، ظرفیت خازنی پارازیتیک.

Basic Design of high-frequency, air-core transformer of Dynamitron accelerator 1.5 MeV, 50mA

M. Ebrahimi¹, H. Afarideh¹, F. Ghasemi², M.M Daemi Attaran³, M.Mirzaie³

1. Amirkabir University of Technology, Department of Energy Engineering and Physics, Tehran, Iran.
2. Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Department of Physics and accelerators
3. Puya Electro Saman Niru (PULSE NIRU)

Abstract :

Now days Dynamitron Accelerators from electrostatic accelerators have multiple applications in the industry due to their high efficiency and reasonable price. Applications of Dynamitron accelerator include sterilization of medical equipment, irradiation with polymeric materials and water treatment in drinking water centers due to high current and ion beam analysis due to high energy accuracy. The most important challenge in building electrostatic accelerators is the High voltage power supply . The absence of any moving parts in the power supply and its small volume is one of the advantages of the power supply of this accelerator. In this paper, the basic design of an important part of the Dynamitron accelerator power supply with energy of 1.5 MV and current of 50 mA using CST and Comsol software is designed. The high voltage , high frequency and air core transformer is a modulator and increases the output voltage of the oscillator, which reduces the number of floors of the voltage-increasing column. in other words, the presence of a transformer will cause isolation between the power supply and the high voltage voltage chamber.

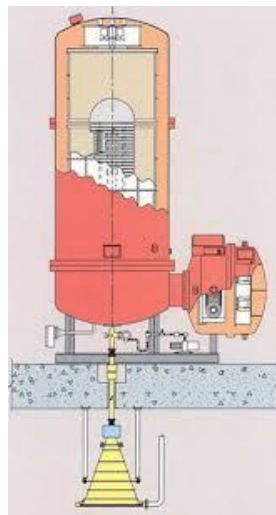
Keywords: Dynamitron industrial accelerator, High Voltage Transformer, Air Core, Resonance, Parasitic capacitance.

Email: majidebrahimi@aut.ac.ir

۱. مقدمه

شتاب دهی به الکترون در صنعت هسته‌ای جایگاه ویژه‌ای دارد. در برخی از منابع ذکر شده است که بیم الکترون باتوان ۱۵۰ کیلووات حدوداً پرتو ایکس با توان ۱۲ کیلووات تولید می‌کند که برای ایجاد و استفاده از این مقدار پرتو ایکس، تقریباً به یک چشمه طبیعی گاما با میزان اکتیویته ۱ مگا کوری نیاز است [۱]. شتاب‌دهنده داینامی‌ترونی قابلیت شتاب‌دهی به الکترون‌ها را دارند و به دلیل بازدهی و جریان باریکه بالا در پرتو دهی محصولات پلیمری، استریل کردن تجهیزات پزشکی، افزایش ماندگاری مواد غذایی کاربرد فراوانی دارند [۲].

گلوگاه ساخت شتاب‌دهنده داینامی‌ترونی، ساخت منبع تغذیه ولتاژ بالا می‌باشد. در منبع تغذیه این شتاب‌دهنده ابتدا برق سه فاز شهر توسط منبع تغذیه DC توان بالا به ولتاژ مستقیم تبدیل می‌شود و سپس توسط نوسانگرتوان و ولتاژ بالا در فرکانس مورد نیاز، نوسان می‌کنند و ولتاژ سینوسی در خروجی تولید می‌کند. ترانسفورماتور ولتاژ بالا و فرکانس بالا در منبع تغذیه شتاب‌دهنده داینامی‌ترونی، بعد از تولید ولتاژ سینوسی نقش ایفا می‌کند و موجب افزایش سطح ولتاژ سینوسی می‌شود که این امر موجب کاهش تعداد طبقات ستون‌های افزایشنده ولتاژ و ایجاد ایزولاسیون بین منبع تغذیه و محفظه ولتاژ فشار قوی خواهد شد. در انتها نیز، ولتاژ خروجی ترانسفورماتور توسط مولد داینامی‌ترونی که با تغذیه موازی طبقات یکسوساز، تبدیل به ولتاژ مستقیم همراه با تقویت سطح دامنه ولتاژ می‌شود [۳]. در شکل ۱ ترانسفورماتور ولتاژ بالا در شتاب‌دهنده داینامی‌ترونی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱. شماتیک ساده از شتاب‌دهنده داینامی‌ترونی

۲. اصول طراحی

معمولاً هسته‌های ترانسفورماتور از فولاد سیلیکان و فریت ساخته می‌شوند. در فرکانس‌های بالا تلفات مربوط به هسته از جمله تلفات فوکو و تلفات هیستریزیس افزایش می‌یابند و این امر موجب کاهش بازدهی و تلفات بیشتر در ترانسفورماتور می‌شوند. به همین دلیل ترانسفورماتورها در منبع تغذیه شتاب‌دهنده‌ها از نوع ترانسفورماتور هسته هوا هستند. روابط ۱ و ۲ تلفات هیستریزیس و تلفات فوکو را بر حسب فرکانس بیان می‌کنند [۴].

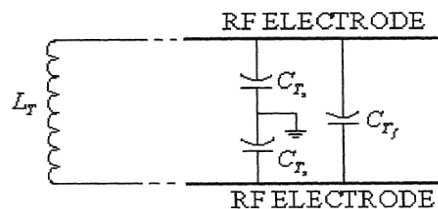
$$P_H = K_H f B_{\max}^{\alpha} \times (V) \quad (1)$$

$$P_E = K_E f^2 B_{\max}^2 \quad (2)$$

در روابط فوق K_H ، K_E و α مقادیر ثابت می‌باشند و V حجم هسته ترانسفورماتور است. انتخاب هسته هوا برای ترانسفورماتور همانطور که گفته شد موجب کاهش تلفات می‌شود ولی از طرفی در هسته هوا، مقدار شار پراکنندگی بالا

می‌باشد و برای کاهش مقدار این شاراز دست رفته، از هندسه توویدال برای هسته ترانسفورماتور استفاده می‌کنیم. معمولاً ترانسفورماتورهای هسته هوا ایده‌آل نمی‌باشند و ضریب کوپلینگ در آن‌ها برابر $0/3$ می‌باشد. همچنین در فرکانس‌های بالا، جریان الکتریکی به دلیل اثرهای پوسته و مجاورتی، توزیع غیریکنواختی دارند و از تمام سطح سیم برای عبور جریان استفاده نمی‌شود. برای کاهش اثرات پوسته و مجاورتی معمولاً از سیم‌های لیتز استفاده می‌کنند که برای ساخت این ترانسفورماتور از سیم لیتز با آرایش بانج 7×61 استفاده شده که قطر سیم برابر 6 میلی‌متر شده است.

با توجه به مدار رزونانس ترانسفورماتور ولتاژ بالا و هسته هوا، سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور با خازن ایجاد شده توسط الکترودهای RF بایکدیگر و با محفظه گاز، در فرکانس کاری رزونانس می‌کند. از اینرو باید در تعیین مقدار لندوکتانس سیم پیچ‌های ثانویه ترانسفورماتور دقت لازم را به‌جا آورد. در شکل ۲ مدار رزونانس یک ترانسفورماتور ولتاژ بالا و هسته هوا نشان داده شده است [۵].



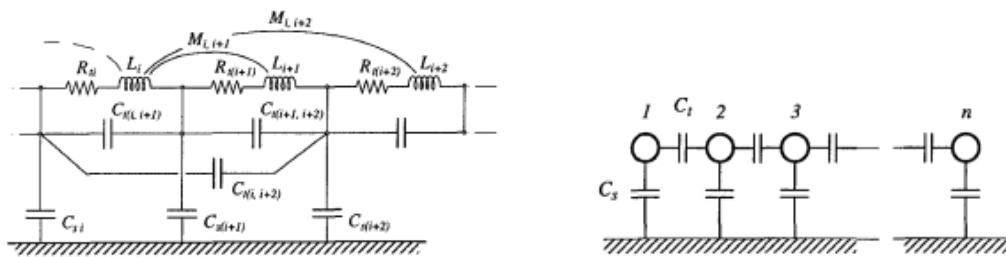
شکل ۲. مدار رزونانس ترانسفورماتور با ظرفیت خازنی الکترودهای RF داینامیترن

در ترانسفورماتور دو نوع توان اکتیو و ری اکتیو (غیرفعال) وجود دارد که در روابط ۳ و ۴ بیان می‌شوند.

$$P = |V||I| \cos \theta \quad (3)$$

$$Q = |V||I| \sin \theta \quad (4)$$

در رابطه ۴ یعنی جمله شامل $\sin \theta$ ، متناوباً مثبت و منفی می‌شود و مقدار متوسط آن صفر است یعنی انرژی که به بار داده و از آن گرفته می‌شود. در فرکانس بالا هر حلقه از سیم پیچ‌های ترانسفورماتور خاصیت سلفی، خازنی و مقاومتی از خود نشان می‌دهند. هر حلقه با حلقه‌های کناری اندوکتانس متقابل و ظرفیت خازنی و هم‌چنین با محفظه گاز عایق فشارقوی نیز ظرفیت خازنی ایجاد می‌کند. با توجه به فواصل زیاد سیم پیچ‌های دورتر، می‌توان از اندوکتانس متقابل آن‌ها و ظرفیت خازنی صرف نظر کرد. در حلقه‌های ترانسفورماتور امپدانس حلقه اندوکتانس و مقاومت بیشتر از امپدانس خازن شانت حلقه می‌باشد که در نهایت شبکه خازنی از سیم پیچ‌ها به دست می‌آید که به خازن پارازیتیک معروف هستند [۶]. این ظرفیت خازنی پارازیتیک با اندوکتانس سیم پیچ ثانویه رزونانس می‌کند که فرکانس رزونانس خازن‌های پارازیتیک باید بزرگتر از ۳ برابر فرکانس کاری باشد. برای عایق‌سازی و خنک‌کاری ترانسفورماتور از گازهای عایق نیتروژن و کربن دی‌اکسید با نسبت ۲۰ درصد به ۸۰ درصد استفاده شده است.



شکل ۳. خازن‌های پارازیتیک حلقه‌های سیم پیچ ترانسفورماتور

۳. طراحی و شبیه سازی

پارامترهای مدار برای به دست آوردن خروجی موردنظر به صورت جدول ۱ می‌باشد. برای به دست آوردن ابعاد ترانسفورماتور برای ایجاد رزونانس و کاهش تلفات، در محدوده‌ی وسیعی از متغیرهای موثر محاسبات انجام شده است که در نهایت ابعاد بهینه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای مربوط به ابعاد ترانسفورماتور

پارامتر	مقدار (میلی متر)
قطر بیرونی هسته	۱۳۵۰
قطر درونی هسته	۶۵۶
قطر سطح مقطع هسته	۳۴۷
شعاع اصلی هسته	۵۰۲
فاصله هوایی	۱۵۰

جدول ۱. پارامترهای مدار ترانسفورماتور

پارامتر	مقدار
ولتاژ اولیه	۲۰ کیلوولت پیک تا پیک
ولتاژ ثانویه	۲۰۰ کیلوولت پیک تا پیک
جریان اولیه	۱۰ آمپر
جریان ثانویه	۵۰ آمپر
اندوکتانس اولیه	۱۰۰ میکروهنری
اندوکتانس ثانویه	۲/۲ میلی هنری
فرکانس	۲۰۰ کیلوهرتز

ترانسفورماتور هسته هوا یک ترانسفورماتور ایده‌آل نمی‌باشد و رابطه ترانسفورماتور ایده‌آل برای این ترانسفورماتور صدق نمی‌کند زیرا که ضریب کوپلینگ برابر با مقداریک نمی‌باشد بلکه برابر با ۰/۳ است و اگر مدارهای خازنی و القایی با هم موازی شوند، طبق شکل ۲ سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور با خازن تشکیل شده الکترودهای RF مولد دینامیترون، موازی هستند، انرژی بین خازن و بارالقایی متناوبا جابجا می‌شود و توسط یک دیگر شارژ و دشارژ می‌شوند. به بیان دیگر خازن توان ری اکتیو لازم برای بارالقایی را تامین می‌کند. در جدول ۱ افزایش ولتاژ و جریان در ثانویه نسبت به اولیه ترانسفورماتور، به صورت توان ری اکتیو یا توان مجازی در مدار نمایان می‌شود.

مقدار ظرفیت خازن پارازیتیک با استفاده از روابط در مراجع و کدنویسی در کد متلب و شبیه سازی در نرم افزار کامسول به دست آورده شده است. نتایج هر کدام در جدول ۳ و ۴ به صورت خلاصه بیان شده است. با مقایسه نتایج، فاصله گام بهینه برای حلقه‌های سیم پیچ ترانسفورماتور ۱۲ میلی مترو برای فاصله‌ی سیم پیچ تا محفظه گاز فشارقوی ۲۵۰ میلی متر انتخاب شده است.

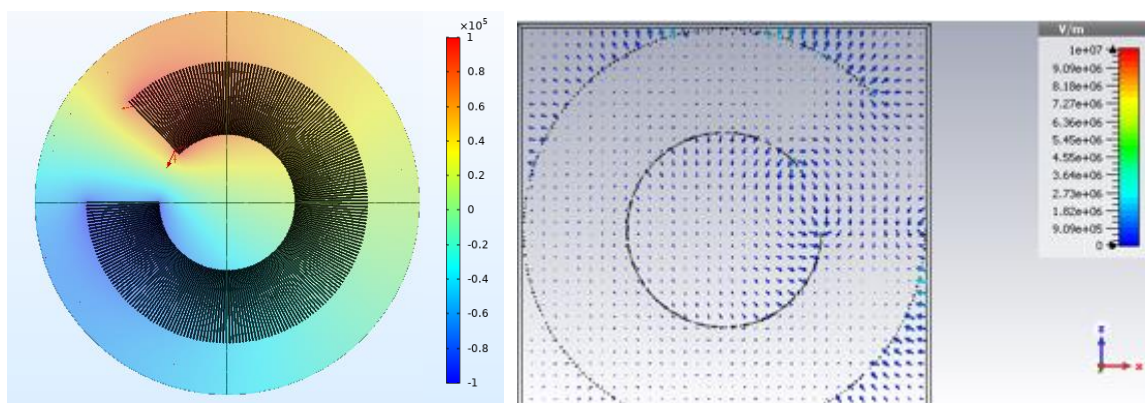
جدول ۳. ظرفیت خازنی پارازیتیک بین حلقه‌های سیم پیچ ترانسفورماتور

فاصله حلقه‌ها (میلی متر)	ظرفیت خازنی نظری (پیکوفاراد)	ظرفیت خازنی شبیه سازی (پیکوفاراد)
۱۰	۱۴/۶۷	۱۶/۷
۱۱	۱۱/۷	۱۵/۸۵
۱۲	۹/۷۲۸	۱۵/۲
۱۳	۸/۳۲۵	۱۴/۴۵
۱۴	۷/۲۷۶	۱۴/۴۳
۱۵	۶/۴۶۱	۱۳/۵

جدول ۴. ظرفیت خازنی پارازیتیک بین حلقه‌های سیم پیچ و محفظه گاز فشارقوی ترانسفورماتور

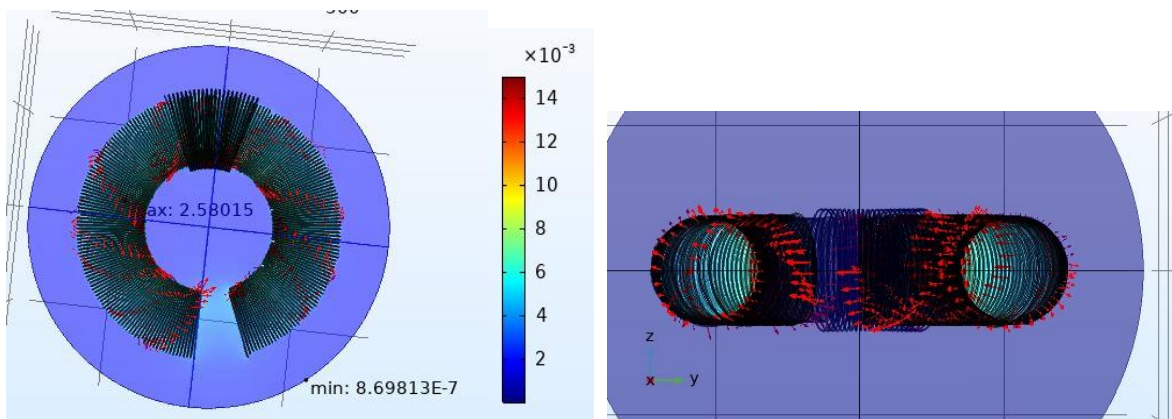
فاصله (میلی متر)	ظرفیت خازنی نظری (پیکوفاراد)	ظرفیت خازنی شبیه سازی (پیکوفاراد)
۲۰۰	۱۲/۳۵	۱۱/۶
۲۵۰	۱۱/۸۱	۱۱/۴۳
۳۰۰	۱۱/۴۱	۱۱/۳
۳۵۰	۱۱/۰۹	۱۱/۱۵
۴۰۰	۱۰/۸۲	۱۱/۰۵

با رسم هندسه ترانسفورماتور با توجه به ابعاد موجود در جدول‌های بالا، با استفاده از نرم افزارهای CST و COMSOL توزیع پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی مربوط به سیم پیچ‌های ترانسفورماتور شبیه سازی شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است. از این نتایج برای تعیین فشار و فاصله بین دوسرانت‌هایی ترانسفورماتور، با توجه به نمودار پاشن، استفاده شده است که در نهایت اندازه فاصله هوایی برابر ۱۵ میلی متر در فشار ۲۰ بار انتخاب شد. در این شکل‌ها ماکزیمم مقدار میدان الکتریکی ۲/۷ مگاولت بر متر می‌باشد.



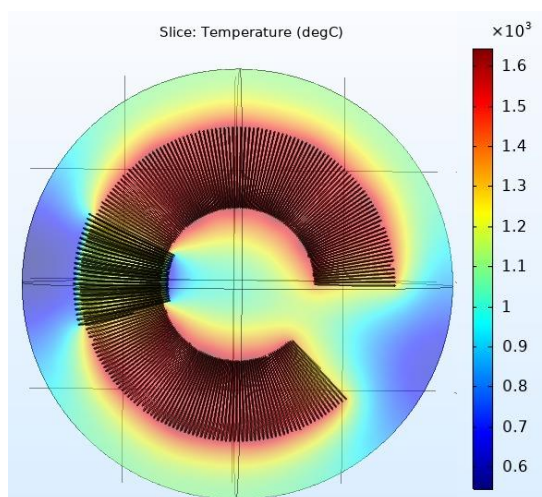
شکل ۴. توزیع پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی سیم پیچ‌های ترانسفورماتور

در ترانسفورماتور هسته هوا، سیم پیچ اولیه به سیم پیچ ثانویه ولتاژ القا می‌کند و حلقه‌های سیم پیچ ثانویه بریک دیگر ولتاژ القا کرده که در نهایت مسیر شار در کل سیم پیچ ثانویه بسته می‌شود. شکل ۵ نتایج مربوط به شبیه سازی مغناطیسی ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی تقریباً برابر ۸ میلی تسلا می‌باشد.



شکل ۵. جهت و توزیع شدت میدان مغناطیسی

به دست آوردن توزیع دمایی و خنک کاری در ترانسفورماتور بسیار مهم می‌باشد. در این ترانسفورماتور از گازهای خنک کننده و هیت اکسچنجر برای خنک کاری ترانسفورماتور استفاده شده است. با کوپل کردن فیزیک های میدان مغناطیسی و انتقال دما در نرم افزار کامسول، بدون در نظر گرفتن منابع خنک کننده، دمای اطراف سیم پیچ ترانسفورماتور در طی مدت ۱ ساعت به ۱۶۰۰ درجه سانی گراد می‌رسد. برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سیم پیچ ها و هسته ترانسفورماتور در هنگام ساخت، از پوشش‌های عایق الکتریسیته و عایق دما استفاده شده است.



شکل ۶. توزیع دمایی ترانسفورماتور

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی ترانسفورماتور ولتاژ بالا در شتاب‌دهنده داینامی‌تروپ پرداخته شده است و با توجه به نتایج تست اندازه‌گیری، بهترین انتخاب استفاده از ترانسفورماتور هسته‌هوا با هندسه توویدال برای کاهش ابعاد ستون افزایش دهنده ولتاژ و ایجاد ایزولاسیون بین بین منبع تغذیه و محفظه ولتاژ فشارقوی می‌باشد.

۶. مراجع

۱. deWilton, M.S., High power, high reliability electron accelerators for industrial processing. Radiation Physics and Chemistry (1977), 1985. **25**(4-6): p. 643-
۲. Ragnar, H., Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications. 2005
۳. Srivastava, S., et al. DESIGN & OPERATIONAL EXPERIENCE & TESTING OF 50kW/120kHz OSCILLATOR FOR 3MeV, 30kW DC ACCELERATOR. Proceedings of the DAE-BRNS Indian particle accelerator. conference 2011.
۴. Dekker New McLyman, C.W.T., Transformer and inductor design handbook. 1988: York, USA .
۵. Lee, R., L. Wilson, and C. Carter, Transformers and Circuits. 1988: John Wiley & Sons.
۶. Grandi, G., et al. Stray capacitances of single-layer air-core inductors for high frequency applications. in IAS'96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. 1996. IEEE