

Presentation of a Design Algorithm and Implementation of Pulse Power Generator Using Magnetic Pulse Compressor**Mohamad Dehghanian^{1,2}, M.Sc., Amir Baktash^{1,2}, Assistant Professor**¹Department of Electrical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran²Smart Microgrid Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
md3.dehghanian@gmail.com, abaktash@pel.iaun.ac.ir**Abstract**

In many applications, it is necessary to transfer electrical energy to the load as a pulse with a high voltage level. Conventional switches such as semiconductors cannot be used for these applications due to voltage or speed limitations, and therefore saturable inductors must be used. These inductors act like a short circuit at the moment of saturation and play the role of a connected switch. By designing a circuit called magnetic pulse compressor (MPC), this feature can be used to produce voltage pulses with a small width and a large amplitude. The study of the structure of magnetic pulse compressor is mentioned in this article and an algorithm for its design is proposed. By using this algorithm, an efficient compressor circuit can be designed for any application and with the characteristics of magnetic materials. To show the correct operation of the algorithm, a compressor circuit sample has been designed and simulated. The output pulse of the desired circuit for a 5 Ω resistive load has an amplitude of 500 volts and a width of 500 nanoseconds. To validate the proposed method, a laboratory sample is made. The results show that the magnetic switches have an acceptable performance and the proposed algorithm is also successful in designing the compressor circuit.

Keywords: compressor, magnetic pulse, magnetic switches, pulse power generator**Received:** 19 July 2022**Revised:** 21 September 2022**Accepted:** 16 November 2022**Corresponding Author:** Dr. Amir Baktash

<https://dorl.net/dor/20.1001>.....

مقاله پژوهشی

ارایه یک الگوریتم طراحی و پیاده‌سازی مولد توان پالسی با استفاده از فشرده‌ساز پالس مغناطیسی

محمد دهقانیان^{۱،۲}، دانش آموخته کارشناسی ارشد، امیر بکتاش^{۱،۲}، استادیار

۱- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

md3.dehghanian@gmail.com, amir.baktash@gmail.com

خلاصه: در بسیاری از کاربردها نیاز است تا انرژی الکتریکی به صورت پالسی با سطح ولتاژ بالا به بار منتقل گردد. استفاده از کلیدهای مرسوم مانند نیمه‌هادی‌ها به دلیل محدودیت ولتاژ یا سرعت برای این کاربردها مقدور نیست و لذا باید از سلف‌های اشباع‌پذیر استفاده شود. این سلف‌ها در لحظه اشباع مانند اتصال کوتاه عمل کرده و نقش یک سویچ وصل را بازی می‌کنند. با طراحی یک مدار تحت عنوان فشرده‌ساز مغناطیسی پالس (MPC) می‌توان از این خاصیت برای تولید پالس‌های ولتاژ با عرض کم و دامنه زیاد استفاده نمود. بررسی ساختار فشرده‌ساز مغناطیسی پالس در این مقاله اشاره شده و یک الگوریتم برای طراحی آن پیشنهاد شده است. با استفاده از این الگوریتم می‌توان برای هر کاربرد و با داشتن مشخصات مواد مغناطیسی، یک مدار فشرده‌ساز کارآمد طراحی کرد. برای نشان دادن عملکرد صحیح الگوریتم یک نمونه مدار فشرده‌ساز طراحی و شبیه‌سازی شده است. پالس خروجی مدار مورد نظر برای یک بار مقاومتی ۵ اهمی دارای دامنه ۵۰۰ ولتی و عرض ۵۰۰ نانو ثانیه‌ای است. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، یک نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که کلیدهای مغناطیسی عملکرد قابل قبولی داشته و الگوریتم پیشنهادی نیز به خوبی در طراحی مدار فشرده‌ساز موفق است.

کلمات کلیدی: پالس مغناطیس، فشرده ساز، کلیدهای مغناطیسی، مولد توان پالسی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۴/۲۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۶/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر بکتاش

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

فشرده‌ساز مغناطیسی پالس^۱ (MPC) عبارت است از یک کلید مغناطیسی که بر اساس مشخصه مغناطیسی غیرخطی مواد فرومغناطیس کار می‌کند [۱،۲،۳]. این کلیدها شامل یک سیم‌پیچی بر روی یک هسته فرومغناطیس است که در ناحیه اشباع نشده، اندوکتانس بالایی از خود نشان داده و در حالت اشباع این اندوکتانس شدیداً افت می‌کند. این دو حالت متناظر با حالت‌های قطع و وصل یک کلید ایده‌آل هستند. گرچه این کلیدها نیز مانند بسیاری از کلیدهای واقعی دیگر عملکرد ایده‌آلی از خود نشان نمی‌دهند ولی به دلیل مزایایی که دارند برای کاربردهای پالسی فشارقوی گزینه مناسبی هستند. این هسته‌ها پیچیدگی کمی برای پیاده‌سازی دارند و قابلیت اطمینان آنها بالاست و به راحتی آسیب نمی‌بینند و همچنین ولتاژها و جریان‌های بالا را به خوبی تحمل می‌کنند. این موارد مهمترین ویژگی‌هایی هستند که می‌توانند MPC را به گزینه خوبی در سیستم‌های توان پالسی به عنوان یک کلید تبدیل کنند [۴،۵]. سیستم‌های توان پالسی با امکان ذخیره‌سازی پیوسته حجم گسترده‌ای از انرژی الکتریکی و تخلیه لحظه‌ای آن، در صنایع گوناگون کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند [۶،۷]. از نمونه این کاربردها، منابع تولید ماکروویو پر قدرت، ایجاد و شتاب‌دهی پرتوهای یونی، منابع پر قدرت ماورای صوت جهت تخریب صخره‌ها، عملیات اکتشاف نفت، پاستوریزاسیون الکتریکی شیر^۲، تولید اشعه ایکس، کاربردهای زیست‌محیطی و بسیاری موارد دیگر است [۸،۹].

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه سیستم‌های توان پالسی ارائه شده است [۱۰،۱۱،۱۲]. در مرجع [۱۳] یک مولد نانوآنی‌های ولتاژ بالای تکرار شونده تک-قطبی و فشرده که براساس ترانسفورماتور پالسی اشباع‌پذیر^۳ و کلیدهای مغناطیسی است طراحی و بهینه‌سازی شده که به علت مزایای بسیار موجود در کلید مغناطیسی، این امکان ایجاد شده که از توان پالسی تولید شده به-وسیله فشرده‌ساز پالس مغناطیسی در کاربردهای صنعتی و نظامی بسیاری استفاده شود. در مرجع [۱۴] ویژگی‌های عملکردی کلید مغناطیسی مطالعه شده و روش کنترل جریان ریست برای بهبود بازده کلید مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. این روش به‌طور بهینه حلقه هیستریزس کلید مغناطیسی را کنترل می‌کند و همچنین اشباع هسته مغناطیسی را وقتی ولتاژ ورودی و فرکانس پالس تغییر می‌کند، با تنظیم مقدار جریان ریست در کلید مغناطیسی، کنترل می‌نماید. در مرجع [۱۵] طراحی عملی یک منبع تغذیه پالس با ولتاژ بالا با اجرای فناوری کاربرد سیلیکون مدرن برای راکتورهای پلاسما فشار جو اشاره شده که نتایج نشان می‌دهد ساخت منبع تغذیه با مدارهای کوتاه در راکتور مطمئن بوده و برای هر دو نوع سازه راکتور قابل استفاده است. در مرجع [۱۶] با ارائه مولد توان پالس میکروآنی‌های فشرده هدایت شده بوسیله انرژی خورشیدی برای کاربردهای تخلیه مانع دی‌الکتریک، یک ساختار مدولار با پنل‌های خورشیدی، مبدل DC-DC، تثبیت‌کننده ولتاژ و سیستم شکل‌گیری پالس ولتاژ بالا بررسی شده است. آزمایش‌ها با بار تخلیه سد دی‌الکتریک^۴ (DBD) کوآکسیال نشان می‌دهد که مولد توان پالس میکروآنی فشرده می‌تواند پالس‌های مثبت و منفی، دامنه ولتاژ قابل تنظیم و شکل موج‌های پالس قابل تکرار با میزان تکرار پالس مختلف را فراهم کند. همچنین، منبع تغذیه پالس توانایی تحریک DBD در شرایط کار با پارامترهای خروجی قابل تنظیم را دارد.

در میان کلیدهای اشاره شده، کلیدهای مغناطیسی قابلیت‌های مناسبی برای کار با سطح ولتاژ-جریان بالا و عملکرد سریع دارند که استفاده از آنها را در محدوده وسیعی از کاربردها میسر می‌سازد [۱۷،۱۸،۱۹،۲۰]. گرچه مطالعات فراوانی به ارائه یک سیستم توان پالسی با استفاده از کلیدهای مغناطیسی اشاره کرده‌اند ولی بحث طراحی خود کلید و ارائه یک الگوریتم جامع جهت طراحی کلید برای یک کاربرد خاص کمتر ارائه شده است. با توجه به اینکه کلیدهای مغناطیسی باید بر اساس کاربرد و متناسب با آن طراحی شوند پس از یک سوییچ نمی‌توان در کاربردهای مختلف استفاده نمود و نیاز به طراحی کلید متناسب با هر کاربرد ضروری است. بنابراین در این مقاله یک مدل مناسب براساس روابط ریاضی ابتدا تعیین می‌شود. سپس بر اساس ویژگی‌های یک کاربرد خاص، طراحی یک MPC ارائه می‌شود. برای اینکه بتوان طراحی را به کاربردهای مختلف تعمیم داد، یک الگوریتم طراحی ارائه شده که بر اساس نیازمندی‌های کاربرد به ارائه کلید اشاره می‌کند. در نهایت برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و طراحی، یک نمونه آزمایشگاهی در محدوده توان پایین با استفاده از المان‌های در دسترس ارائه شده است. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در قسمت دوم طراحی مدار فشرده‌ساز مغناطیسی پالس بیان شده است. در قسمت سوم الگوریتم طراحی مولد توان پالسی اشاره شده است. طراحی مولد توان پالسی شامل انتخاب هسته و مدل‌سازی سلف

اشباع‌پذیر همراه با نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم ارائه شده است. در بخش پنجم پیاده‌سازی مدل پیشنهادی همراه با اندازه‌گیری مشخصه مغناطیسی هسته و نتایج آزمایشگاهی آمده است. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- طراحی مدار فشرده‌ساز مغناطیسی پالس

در ساختار MPC از یک مدار انتقال انرژی رزونانسی مطابق شکل (۱) استفاده می‌گردد. در این مدار L_1 اندوکتانس رزونانس حلقه اولیه است که جریان I_1 در آن جریان دارد، L_2 نیز اندوکتانس پراکندگی مسیر جریان I_2 است. L_s و L_u به ترتیب عبارتند از اندوکتانس اشباع نشده و اشباع شده در سلف اشباع پذیر SI. در اینجا فرض شده که همه خازن‌های مدار برابر باشند به عبارت دیگر $C_1=C_2=C_3$. خازن C_1 توسط یک منبع تغذیه اولیه تا ولتاژ V_{max} شارژ می‌گردد. در لحظه t برابر صفر با وصل کلید S_1 خازن C_1 توسط سلف L_1 به‌طور رزونانسی در خازن C_2 تخلیه می‌گردد. مطابق طراحی انجام شده تا زمانی که C_1 کاملاً در C_2 تخلیه نگردد، SI به اشباع نمی‌رود. طی این زمان انرژی C_1 نمی‌تواند به C_3 منتقل گردد زیرا اندوکتانس اشباع نشده SI زیاد است. جریان مدار در این حالت یک جریان سینوسی است که فرکانس آن تابعی از مقادیر سلف و خازن مدار است. از آنجایی که مقاومت‌های مدار صرف‌نظر شده، پس انرژی باید متناوباً بین دو خازن C_1 و C_2 منتقل گردد ولی چنانچه کلید S_1 از نوع تریستوری باشد باعث می‌شود که با صفر شدن جریان، انتقال انرژی نیز پایان یابد. همچنین به اشباع رسیدن SI نیز باعث ایجاد یک مسیر با امپدانس کم شده و دیگر انرژی به خازن C_1 باز نمی‌گردد. در شکل (۲) جریان سلف و ولتاژ خازن‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان سلف سینوسی بوده و یک نیم سیکل را برای شارژ خازن C_2 طی می‌کند. ولتاژ خازن‌های C_1 و C_2 نیز به‌طور سینوسی تغییر نموده‌اند و C_1 دشارژ شده و C_2 تا V_{max} شارژ می‌گردد. چنانچه دو خازن هم ظرفیت باشند، پس از انتقال انرژی، ولتاژ خازن C_2 نیز برابر V_{max} می‌شود. در طراحی سلف اشباع‌پذیر برای اینکه بیشترین انتقال انرژی اتفاق افتد باید این سلف با رسیدن ولتاژ خازن قبل از خود به ولتاژ ماکزیمم که همه انرژی خازن قبلی را دریافت کرده، به اشباع برسد و از حالت مدار باز به حالت اتصال کوتاه تغییر وضعیت دهد. برای اینکه این اتفاق رخ دهد باید زمان به اشباع رسیدن این سلف تعیین شود تا بتوان آن را با زمان نیم سیکل طبقه قبلی τ_1 برابر کرد. در لحظه τ_1 با اشباع شدن SI انرژی به‌طور کامل از C_2 به C_3 منتقل می‌گردد به شرط آنکه $L_1 \gg L_2 + L_s$ باشد. زمان لازم برای انتقال انرژی از C_2 به C_3 عبارت است از:

$$\tau_2 = \pi \sqrt{(L_2 + L_s)C_{23}} = \pi \sqrt{\frac{(L_2 + L_s)C_{23}}{2}} \quad (1)$$

که در آن C_{23} حاصل برآیند سری C_2 و C_3 است. این زمان برابر عرض پالس I_2 است. ماکزیمم ولتاژ هر خازن همان V_{max} است. شرط فشرده‌سازی پالس عبارت است از $\tau_2 < \tau_1$ و همچنین $L_1 > L_2 + L_s$. نرخ فشرده‌سازی پالس عبارت است از:

$$G_1 = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2 + L_s}} \quad (2)$$

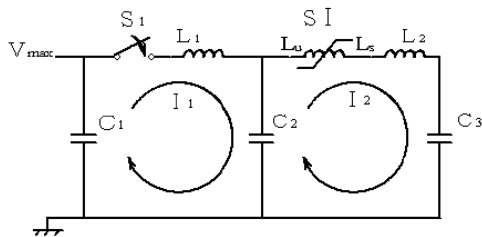
شکل موج ولتاژ و جریان در طی انتقال انرژی فوق در شکل (۳) نشان داده شده است. رابطه بین ولتاژ سلف SI و چگالی شار آن را می‌توان از روی قانون فارادی تعیین نمود.

$$B(t) = \frac{1}{N \cdot A} \int V_{SI}(t) dt = \frac{V_{max}}{2N \cdot A} \left(t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t \right) \quad (3)$$

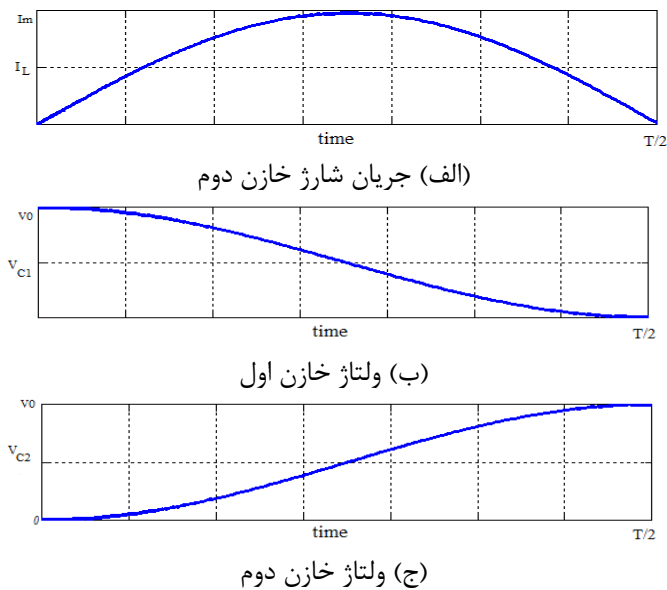
که در آن N تعداد دور سیم‌پیچی سلف SI، A سطح مقطع هسته مغناطیسی آن و $B(t)$ چگالی شار درون هسته است. t زمان اعمال ولتاژ به سلف بوده و ω فرکانس زاویه‌ای مدار رزونانس طبقه قبل است. در این صورت رابطه زمان اشباع با فرض آنکه B_{sat} مقدار چگالی شار اشباع هسته باشد، به‌صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$t_{sat} = \tau_1 = \frac{2NAB_{sat}}{V_{max}} \quad (4)$$

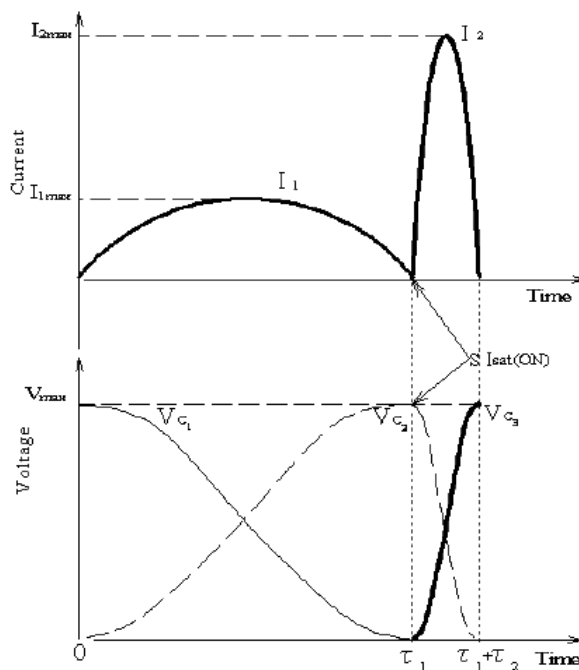
با اشباع شدن هسته SI اندوکتانس آن شدیداً افت کرده به نحوی که اندوکتانس اشباع شده بسیار کمتر از اندوکتانس طبقه قبل بوده و در این صورت تمامی انرژی خازن C_2 از طریق SI به خازن C_3 منتقل می‌گردد.



شکل (۱): ساختار یک مدار فشرده ساز مغناطیسی پالس
Figure (1): Structure of a magnetic pulse compressor



شکل (۲): شکل موج های یک فشرده ساز مغناطیسی پالس به ترتیب: جریان شارژ خازن دوم، ولتاژ خازن اول و ولتاژ خازن دوم
Figure (2): Waveforms of a MPC circuit, a) Charging current of second capacitor, b) Voltage of first capacitor, c) Voltage of second capacitor respectively



شکل (۳): شکل موج ولتاژ- جریان فشرده ساز مغناطیسی پالس [۱]
Figure (3): Waveform of voltage- current of magnetic pulse compressor [1]

به دلیل کوچکی اندوکتانس اشباع، بنابراین انتقال انرژی سریعتر از طبقه قبل بوده و پالس جریانی باریک‌تری نسبت به طبقه قبل اتفاق می‌افتد که همان فشرده‌سازی پالس است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، با انتخاب صحیح مقادیر هسته می‌توان زمان اشباع هسته را با زمان شارژ خازن قبل از آن هماهنگ کرد تا اشباع با شارژ کامل خازن یکی گردد. در این صورت انرژی خازن قبلی توسط سلف اشباع شده و با فرکانس بالاتری (مدت کوتاه‌تری) به خازن بعدی منتقل می‌گردد. در شکل (قسمت وسط) مشخص است که دشارژ خازن C_2 بسیار سریع‌تر از دشارژ خازن C_1 اتفاق افتاده است.

۳- الگوریتم طراحی مولد توان پالسی

برای طراحی یک مولد توان پالسی با استفاده از مدارهای MPC به یک الگوریتم طراحی نیاز است تا بتوان بر اساس آن و پله به پله تمامی مقادیر المان‌های مورد استفاده در مدار را تعیین نمود. در اینجا فرض شده که مدار نهایی با استفاده از n طبقه مدار MPC ساخته شده که ضریب فشرده‌سازی هر طبقه g_i است. همچنین فرض شده که طراحی برای یک بار مقاومتی R_{load} با اندازه مشخص انجام می‌شود که ولتاژ و عرض پالس اعمالی به آن به عبارت دیگر V_0 و T_p نیز مشخص هستند. از آنجا که طراحی بر اساس MPC سری صورت می‌گیرد پس همه خازن‌ها تا ولتاژ V_0 شارژ می‌گردند. مقادیر خازن‌های طبقات را نیز برابر در نظر گرفته می‌شوند تا انتقال انرژی از یک خازن به خازن طبقه بعد کامل انجام گیرد. مراحل طراحی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

۱- تعیین مقدار خازن‌ها (C): با توجه به اینکه عرض پالس مطلوب خروجی و بار مقاومتی خروجی مشخص هستند و در لحظه اعمال پالس به بار، کلید مغناطیسی طبقه آخر در حالت اشباع بوده و می‌توان آن را اتصال کوتاه فرض کرد، پس در این بازه یک خازن با ولتاژ V_0 باید در مقاومت بار تخلیه شود. بر اساس شاخص عرض پالس در نصف دامنه^۵ (FWHM)، عرض پالس مطلوب با $0/69$ ثابت زمانی مدار RC خروجی برابر است، بنابراین مقدار خازن برابر است با:

$$C = \frac{\tau_p}{0.69R_{load}} \quad (5)$$

۲- تعیین عرض پالس مدار رزونانس ورودی (T_0): با توجه به اینکه کلید نیمه هادی S_0 که در ورودی مبدل است محدودیت سرعت و ولتاژ دارد، ممکن است نتواند با هر سرعتی روشن شود و پالس اولیه مناسب را ایجاد کند. به همین دلیل می‌توان با توجه به محدودیت‌های این کلید عرض پالس این طبقه را انتخاب کرد.

۳- تعیین ضریب فشرده‌سازی کل (G): ضریب فشرده‌سازی کل از حاصل ضرب ضرایب فشرده‌سازی تمام طبقات به دست آمده و مطابق رابطه (۲) برابر است با:

$$G = g_1 g_2 \dots g_n = \frac{\tau_0}{\tau_p} \quad (6)$$

۴- تعیین تعداد طبقات (n) و ضرایب فشرده‌سازی هر طبقه: برای تعیین این دو پارامتر انتخاب‌های زیادی وجود دارد. در اینجا برای سادگی ضرایب طبقات را همگی برابر g در نظر گرفته و فقط هدف تعیین تعداد طبقات مطلوب است. ملاک تعیین n را حجم مینیمم هسته‌های مغناطیسی انتخاب می‌شود. برای این کار باید رابطه‌ای بین حجم کل هسته‌ها V_{tot} و n تعیین شود. با ترکیب روابط مربوط به τ_1 و نرخ فشرده‌سازی که در آنها پارامترهای سطح مقطع هسته A و طول مسیر مغناطیسی l وجود دارند، می‌توان حجم هر هسته را تعیین کرد:

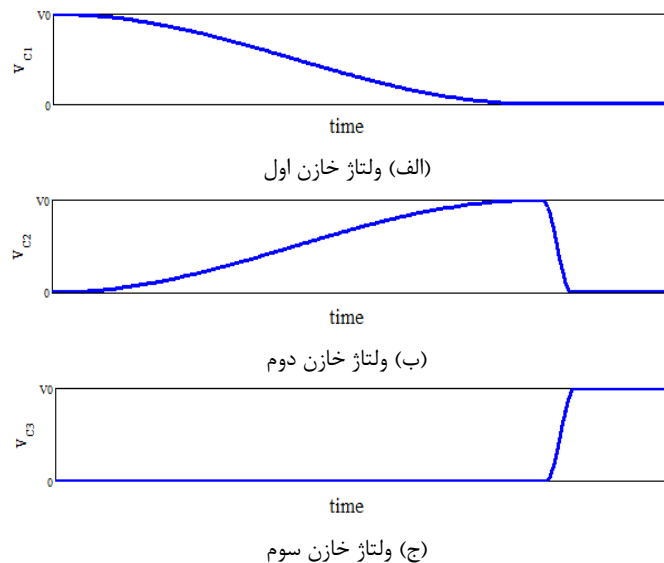
$$VOL_i = A_i \cdot l_i = \frac{V_0^2 g^2 \pi^2 \mu_s C}{4B^2} = K \cdot g^2 \quad (7)$$

که ضریب K برای رابطه فوق یک عدد ثابت محسوب می‌شود. حجم کل هسته‌های عبارت است از:

$$VOL_{tot} = \sum VOL_i = nK \cdot g^2 \quad (8)$$

از آنجایی که ضریب فشرده‌سازی همه طبقات برابر است، بنابراین رابطه (۶) به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$G = g^n \rightarrow g = G^{1/n} \quad (9)$$



شکل (۴): ولتاژ خازن‌های مدار فشرده‌ساز مغناطیسی پالس به ترتیب: ولتاژ خازن اول، ولتاژ خازن دوم و ولتاژ خازن سوم
Figure (4): Voltage of the capacitors of magnetic pulse compressor, a) Voltage of first capacitor, b) Voltage of second capacitor, c) Voltage of third capacitor

و رابطه (۸) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$VOL_{tot} = nK.G^{2/n} \quad (10)$$

برای مینیمم کردن حجم کل هسته، بر حسب n از رابطه فوق مشتق گرفته و برابر صفر قرار داده می‌شود. در این صورت مقدار مطلوب n برابر است با:

$$n = 2 \ln G \quad (11)$$

پس با انتخاب نزدیکترین عدد صحیح به مقدار رابطه فوق می‌توان حجم کل هسته‌ها را مینیمم نمود.

۵- انتخاب هسته برای آخرین طبقه: براساس هسته‌های در دسترس یک هسته برای طبقه مورد نظر انتخاب می‌شود. در این صورت مقادیر B_{sat} ، A و l هسته برای طبقه مورد نظر همگی مشخص می‌گردند.

۶- تعیین تعداد دور سیم‌پیچی طبقه آخر: در طبقه آخر مقدار اندوکتانس اشباع کلید مغناطیسی ناچیز در نظر گرفته می‌شود و در انتقال جریان از آن صرف نظر شده است. بنابراین می‌توان تعداد دور سیم‌پیچی این طبقه را انتخاب کرد.

۷- تعیین اندوکتانس اشباع در سیم‌پیچی طبقه قبلی: از آنجایی که هسته و تعداد دور سیم‌پیچ طبقه آخر مشخص هستند، می‌توان زمان به اشباع رسیدن آن را نیز با توجه به ولتاژ V_0 تعیین نمود. برای این منظور می‌توان از روابط مربوط به τ_1 ، رابطه زیر را به دست آورد:

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{L_s \cdot C}{2}} = \frac{2NAB_{sat}}{V_0} \quad (12)$$

در این رابطه همه پارامترها غیر از L_s مشخص هستند که L_s اندوکتانس اشباع طبقه قبلی است.

۸- انتخاب هسته برای طبقه قبلی: در این مرحله هسته طبقه قبلی از بین هسته‌های موجود انتخاب می‌گردد. در این صورت B_{sat} ، A و l برای این هسته نیز معلوم می‌گردد.

۹- تکرار: از این نقطه چون هسته طبقه قبلی و اندوکتانس اشباع آن مشخص است، طراحی مشابه مورد‌های ۶، ۷ و ۸ می‌گردد. یعنی از اینجا دوباره به مرحله ۶ باز گشته تا تعداد دور طبقه قبل تعیین شود. برای تعیین تعداد دور از رابطه تعیین L_s استفاده می‌شود. سپس به تعیین اندوکتانس اشباع طبقه قبل تر و ... پرداخته شده تا جایی که به طبقه اول رسیده که دیگر نیازی به اشباع شدن سلف روزناتیسی طبقه اول نیست.

۱۰- تعیین ضخامت سیم در کلیدهای مغناطیسی: در این مرحله با توجه به اینکه اندازه تمامی پارامترهای مداری مشخص شده است، می‌توان رابطه جریان هر کلید مغناطیسی را تعیین کرد. ضخامت سیم مورد استفاده در هر کلید براساس مقدار موثر

جریان عبوری از آن تعیین می‌گردد. رابطه جریان عبوری از هر سیم‌پیچ را می‌توان تعیین کرد، که باید مقدار موثر آن با در نظر گرفتن نرخ تکرار پالس مشخص گردد. پس از آن بر اساس تجربه با در نظر گرفتن نرخ چگالی جریان ۷ آمپر بر مترمربع می‌توان سطح مقطع مناسب سیم‌پیچی را تعیین نمود.

۱۱- در نظر گرفتن اثر پوستی؟ از آنجایی که پالس سینوسی جریان گذرا از سلف‌های اشباع‌پذیر فرکانس بالایی دارد، اثر پوستی ایجاد شده باعث می‌شود مقاومت موثر سیم‌پیچ‌ها بسیار بیشتر از مقادیر dc آنها باشد و افت ولتاژ قابل ملاحظه‌ای ایجاد کند. به همین دلیل به جای اینکه از یک سیم با ضخامت محاسبه شده در مرحله ۱۰ استفاده شود از چندین سیم مسی نازک‌تر روکش‌دار با ضخامت مجموعی برابر ضخامت مورد نظر استفاده می‌شود (سیم لیتز^۷). این روش باعث می‌شود تاثیر جریان‌های گردابی مینیمم شده و مقاومت dc و ac سیم تقریباً برابر باشند.

۴- طراحی مولد توان پالسی

ابتدا طراحی یک مدار شامل فشرده‌ساز مغناطیسی پالس بیان می‌شود. برای این منظور با توجه به تجهیزات و المان‌های در دسترس، یک خروجی مشخص با سطح ولتاژ معلوم انتخاب شده و سپس فرایند طراحی انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه از یک سو پروب ولتاژ بالا در دسترس نیست و از سوی دیگر هسته‌های مغناطیسی با مشخصه مربعی در سایزهای متفاوت قابل دستیابی نیستند، به همین دلیل ولتاژ خروجی مورد نیاز را در سطح ۵۰۰ ولت و با عرض ۵۰۰ نانوثانیه و مقاومت بار ۵ اهم انتخاب می‌شوند تا یک نمونه آزمایشگاهی از مدار مورد نظر قابل ساخت باشد.

۴-۱- انتخاب هسته

هسته‌های مغناطیسی مورد استفاده به عنوان سوییچ مغناطیسی در حالت مطلوب باید دارای یک مشخصه مغناطیسی شدیداً غیرخطی باشند. یعنی اینکه حلقه هیستریزس باید تا حد امکان مربعی باشد و تغییر نفوذپذیری هسته ناگهانی و سریع باشد. در این صورت سوییچ تدریجاً روشن نشده و دفعاتاً این اتفاق واقع می‌گردد که به عملکرد ایده‌آل یک سوییچ نزدیکتر است. به همین دلیل از هسته‌های پرمالوی مربعی که برای همین کاربرد بهینه‌سازی شده‌اند استفاده می‌گردد. حلقه هیستریزس این مواد به صورت کلی مشابه شکل (۵) است [۲۱، ۲۲]. هسته‌های در دسترس برای این منظور دارای ابعاد مطابق جدول (۱) هستند. این هسته‌ها از روی هم پیچیده شدن یک نوار با ضخامت ناچیز به دست می‌آیند که در پایان یک عایق بر روی آنها قرار می‌گیرد.

۴-۲- مدل‌سازی سلف اشباع‌پذیر

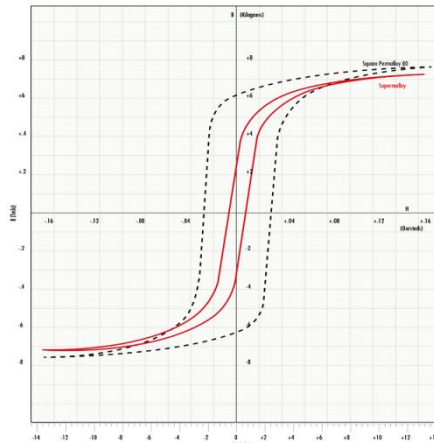
برای مدل‌سازی سلف اشباع‌پذیر در سیمولینک نرم‌افزار متلب از رابطه‌های مغناطیسی حاکم بر سلف استفاده شده و آنها به رابطه‌های الکتریکی آن مرتبط می‌شود. در یک سلف اشباع‌پذیر حتماً باید خاصیت اشباع و مشخصه غیرخطی هسته که همان مشخصه B-H هسته است نیز منظور شود. قانون فارادی و آمپر ارتباط بین ولتاژ و چگالی شار و همچنین بین جریان و شدت میدان را در بر دارند که در آن A سطح مقطع هسته سلف، l طول مسیر هسته، N تعداد دور آن، B و H چگالی شار هسته و شدت میدان آن و v و i نیز ولتاژ و جریان سلف هستند.

$$v = NA \frac{dB}{dt} \rightarrow B = \frac{1}{NA} \int v dt \quad (13)$$

جدول (۱): پارامترهای هسته‌های مناسب در دسترس

Table (1): Parameters of available magnetic cores

چگالی اشباع (تسلا)	ارتفاع هسته (میلی‌متر)	قطر خارجی (میلی‌متر)	قطر داخلی (میلی‌متر)	پارامتر شماره هسته
۰/۷۵	۱۰	۱۰۰	۴۰	هسته ۱
۰/۷۵	۱۰	۵۰	۳۰	هسته ۲



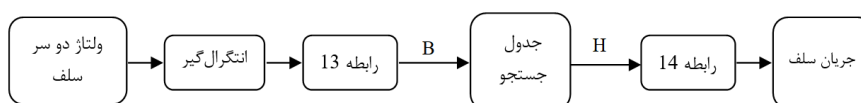
شکل (۵): حلقه هیستریزیس متداول پرمالوی و پرمالوی مربعی
Figure (5): Conventional hysteresis loop of Permalloy and square Permalloy

$$Ni = HI \rightarrow i = \frac{HI}{N} \quad (14)$$

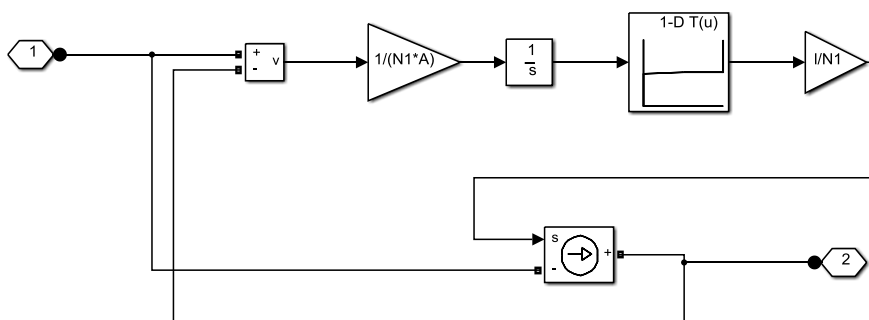
مشخصه اشباع نیز سومین رابطه‌ای است که در مدل سازی به آن نیاز است. این مشخصه نیز ارتباط بین H و B را در هسته نشان می‌دهد. برای اعمال این مشخصه می‌توان از یک جدول جستجو استفاده کرد که مقادیر B به عنوان ورودی و مقادیر H خروجی آن باشند. در این صورت مطابق شکل (۶) ابتدا ولتاژ دو سر سلف از نقطه‌های ۱ و ۲ اندازه‌گیری شده و از روی آن مطابق رابطه (۱۳) چگالی شار محاسبه می‌شود. با استفاده از جدول جستجو مقدار H متناظر با B مورد نظر، تعیین شده و از رابطه (۱۴) جریان گذرا از سلف تعیین می‌گردد. به این ترتیب ولتاژ-جریان سلف بر اساس مشخصه مغناطیسی آن به دست آمده که اثر اشباع نیز در آن لحاظ شده است. شکل (۷) بلوک دیاگرام پیاده شده در سیمولینک را نشان می‌دهد.

۳-۴- شبیه سازی

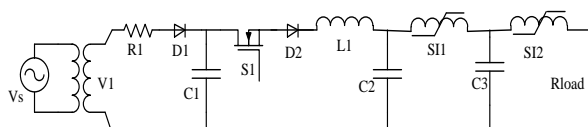
بر اساس هسته‌های در دسترس و با توجه به مقادیر ولتاژ و زمان انتخابی برای خروجی با استفاده از الگوریتم موجود طراحی مدار MPC انجام می‌شود. شکل (۸) مدار مورد نظر را نشان می‌دهد. در این مدار از منبع متغیر V_s به همراه ترانسفورمر افزایش دهنده و مقاومت R_1 و دیود D_1 برای ایجاد ولتاژ dc ، 500 ولت V_0 استفاده شده است. برای هر نرخ تکرار پالس، مقدار ولتاژ منبع V_s به نحوی انتخاب می‌شود تا ولتاژ V_0 در خازن C_1 ذخیره شود. سویچ S_1 برای فعال کردن مدار استفاده می‌شود. این سویچ باید جریان را از C_1 به C_2 منتقل کند و در انتهای نیم سیکل که جریان L_1 صفر می‌شود، خاموش گردد تا خازن C_2 مجدداً در جهت عکس شارژ نشود. به همین دلیل یک ترستور بهترین گزینه برای این سویچ است. با توجه به این که ترستورهای سریع که برای سویچ‌زنی فرکانس بالا مناسب هستند، در دسترس نیست، از یک ماسفت به همراه دیود سریع سری شده استفاده شده است. مقادیر مدار مطابق الگوریتم طراحی در جدول (۲) آمده است. جریان عبوری از سلف‌ها فرکانس بالایی دارد، بنابراین اثر پوستی شدیدی در سیم‌پیچی آنها ایجاد می‌کند که باعث می‌شود مقاومت الکتریکی آنها عدد بزرگی شود و افت قابل توجه در آنها ایجاد گردد. برای غلبه بر این مشکل از سیم‌پیچی لیتز برای همه سلف‌ها استفاده می‌شود. در این صورت مقاومت الکتریکی سیم‌پیچی‌ها را می‌توان قابل صرف نظر در نظر گرفت. در شکل (۹) ولتاژ خازن C_1 نشان داده شده است. این خازن تا حد V_0 شارژ شده و در لحظه ۲۰ میکروثانیه سویچ S_1 وصل می‌گردد.



شکل (۶): ساختار مدل سازی یک سلف اشباع پذیر
Figure (6): Modeling of saturable inductor



شکل (۷): بلوک دیاگرام سلف اشباع‌پذیر در سیمولینک
Figure (7): Diagram of Saturable Inductor in Matlab/Simulink

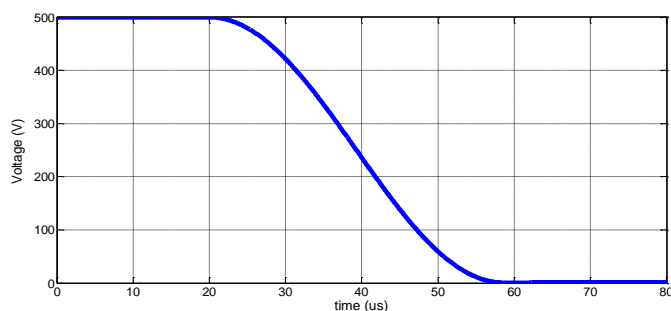


شکل (۸): ساختار مدار پیاده سازی شده
Figure (8): Structure of implemented circuit

جدول (۲): مقادیر المان‌های مدار

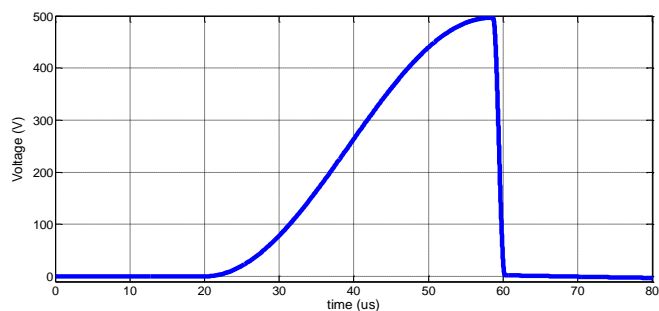
Table (2): The values of circuit's elements

مقدار یا نوع	سمبل	پارامتر
۱۴۵ نانوفاراد	C_1, C_2, C_3	خازن‌های مدار
۲/۱ میلی‌هانری	L_1	سلف روزنانس
۴۳	N_{S11}	تعداد دور سیم‌پیچی هسته ۱
۵	N_{S12}	تعداد دور سیم‌پیچی هسته ۲
۱/۵ میکروثانیه	τ_1	زمان اشباع هسته ۱
۳۸/۵ میکروثانیه	τ_2	زمان اشباع هسته ۲
FQPF7N80	S_1	سوئیچ
1N4007	D_1	دیود معمولی
BYT08-800	D_2	دیود سریع

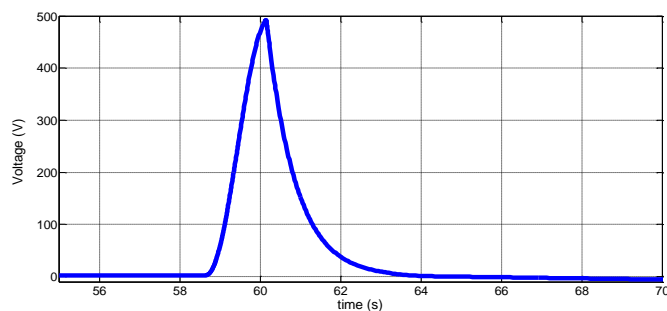


شکل (۹): ولتاژ خازن C_1
Figure (9): Voltage of C_1

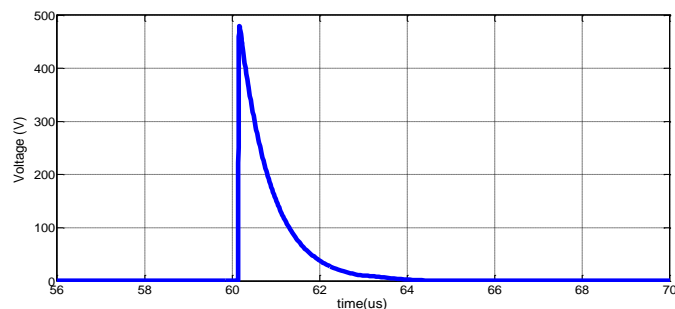
با وصل شدن این سوئیچ ولتاژ خازن C_1 از طریق L_1 به خازن C_2 منتقل می‌گردد. از آنجایی که خازن‌های مدار برابر هستند، در بازه C_1 کاملاً دشارژ شده و ولتاژ C_2 از صفر به V_0 می‌رسد. مدت دشارژ C_1 و شارژ C_2 که باید با زمان به اشباع رسیدن هسته یک برابر باشد، مطابق محاسبات ۳۸/۵ میکروثانیه بوده که در شکل مشخص است.



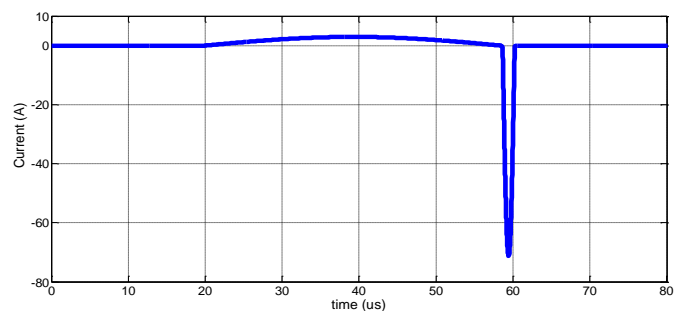
شکل (۱۰): ولتاژ خازن C2
Figure (10): Voltage of C2



شکل (۱۱): ولتاژ خازن C3
Figure (11): Voltage of C3



شکل (۱۲): ولتاژ بار مقاومتی خروجی
Figure (12): Voltage of R_{LOAD}



شکل (۱۳): جریان خازن C2
Figure (13). Current of C2

در شکل (۱۰) ولتاژ خازن C2 نشان داده شده که از صفر به ۷۰ رسیده است. در طی این زمان هسته یک به اشباع رفته و در انتهای بازه SII وصل می‌گردد. در اینصورت انرژی ذخیره در C2 به‌طور کامل به C3 منتقل می‌گردد.

شکل (۱۱) ولتاژ C3 را نشان می‌دهد که در طی ۵/۱ میکروثانیه شارژ شده و به V0 می‌رسد و این مدت زمانی است که لازم است تا هسته دوم که سطح مقطع کوچکتر و تعداد دور کمتری دارد به اشباع برود. با اشباع هسته دوم، اندوکتانس آن به مقدار ناچیز ۲۵ نانوهرنری می‌رسد که معادل ۰/۰۵ اهم در فرکانس رزونانس بوده و می‌توان آن را اتصال کوتاه فرض کرد. در این صورت همه ولتاژ خازن به ناگهان بر روی مقاومت بار افتاده و خازن C3 به صورت نمایی شروع به دشارژ در مقاومت بار می‌کند. شکل (۱۲) ولتاژ بار را نمایش می‌دهد که با اشباع SI2 به ناگهان با ولتاژ C3 برابر شده و پس از آن به صورت نمایی شروع به کاهش می‌کند. با توجه به شاخص عرض پالس FWHM و مطابق روابط عرض پالس مطلوب در حدود ۵۰۰ نانوثانیه است که در شکل مشخص است.

شکل (۱۳) جریان خازن C2 را نشان می‌دهد که در بازه طولانی‌تر ۳۸/۵ میکروثانیه شارژ شده و حداکثر جریان آن به ۵ آمپر می‌رسد و در بازه کوتاه‌تر ۱/۵ میکروثانیه دشارژ می‌گردد که حداکثر ۷۰ آمپر است.

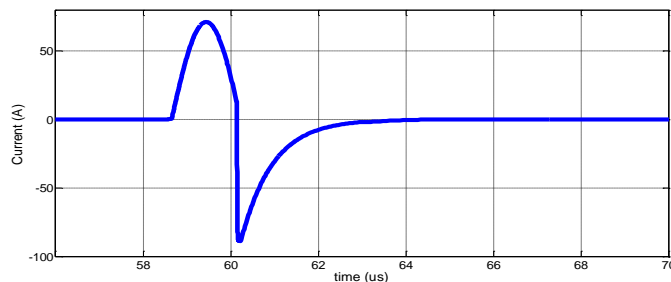
شکل (۱۴) جریان شارژ و دشارژ خازن C3 را نشان می‌دهد که در مدت شارژ شده و در طی ۵۰۰ نانوثانیه در بار مقاومتی دشارژ می‌گردد. شکل (۱۵) نیز جریان بار مقاومتی را نشان می‌دهد که باید در حدود ۱۰۰ آمپر باشد، ولی مقداری از آن کمتر است. دلیل این مسئله این است که خازن C3 دقیقاً تا V0 شارژ نشده و این امر به خاطر گرد کردن عدد تعداد دور سیم‌پیچی‌ها در طراحی است.

۵- پیاده‌سازی

در این قسمت قبل از این که به بررسی نتایج تست اشاره شود، ابتدا روش عملی اندازه‌گیری مشخصه هیستریزس هسته ارائه می‌شود و سپس نتایج تست مدار با هسته مورد نظر بررسی خواهند شد.

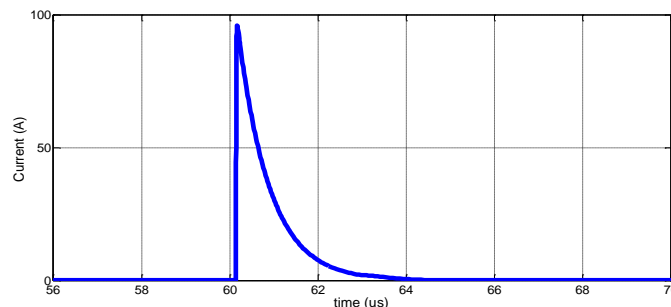
۵-۱- اندازه‌گیری مشخصه مغناطیسی هسته

با توجه به اینکه مشخصه‌های مغناطیسی که توسط تولیدکننده ارائه می‌شود، کلی بوده و دارای تolerانس است، باید مشخصه مغناطیسی هسته در آزمایشگاه اندازه‌گیری شود. به همین دلیل به یک ساختار تست برای اندازه‌گیری این مشخصه نیاز است.



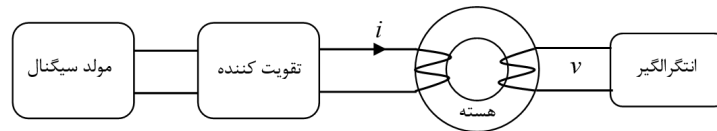
شکل (۱۴): جریان خازن C3

Figure (14): Current of C3

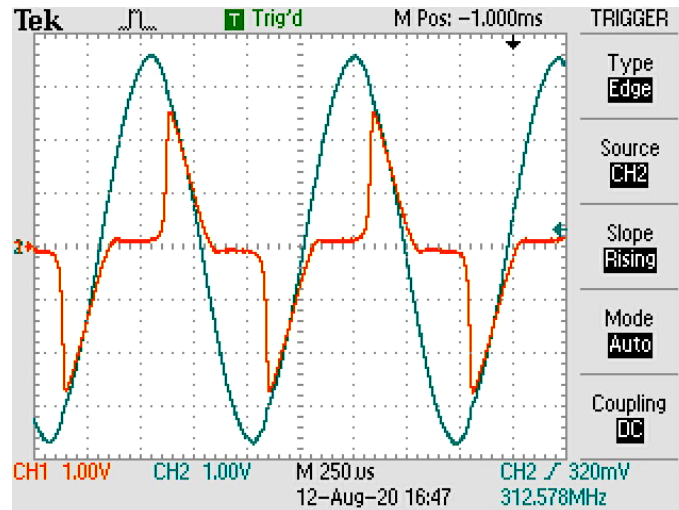


شکل (۱۵): جریان بار خروجی

Figure (15): Current of R_{LOAD}



شکل (۱۶): ساختار سیستم اندازه گیری مشخصه مغناطیسی هسته
Figure (16): Structure of the magnetic characteristic measurement system

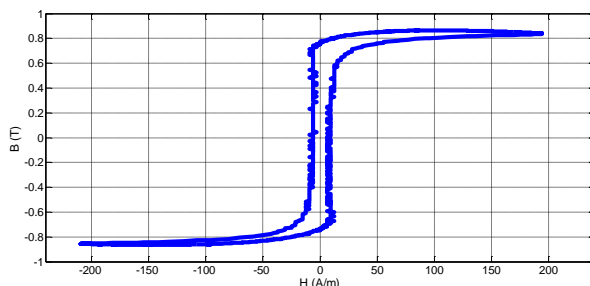


شکل (۱۷): شکل موج ولتاژ - جریان اندازه گیری شده از تحریک سیم پیچی (ولتاژ سینوسی و جریان غیر سینوسی است)
Figure (17): Waveforms of measured voltage- current of excited winding (sinusoidal voltage and nonsinusoidal current)

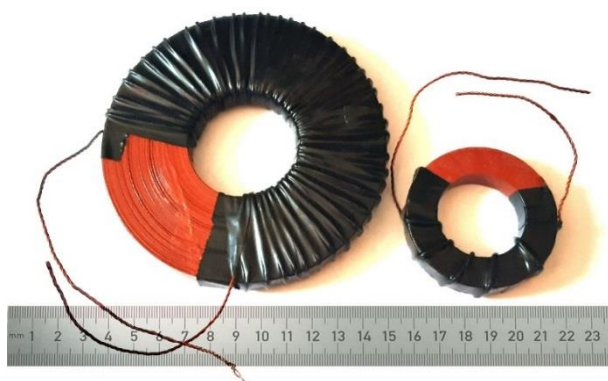


شکل (۱۸): تقویت کننده صوتی کلاس AB برای تقویت سیگنال اعمالی به هسته تحت تست
Figure (18): Class AB Amplifier for amplifying the applied signal to the core under test

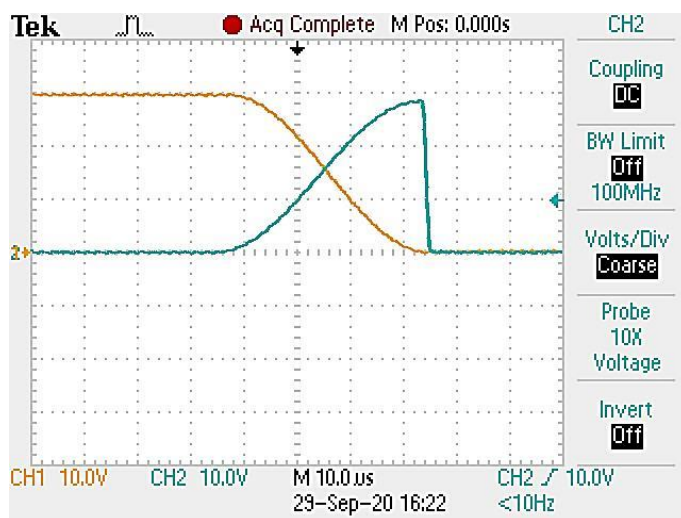
مشخصه مغناطیسی هسته عبارت است از نمودار تغییرات چگالی شار هسته B برحسب تغییرات شدت میدان سیم پیچی H. اما اندازه گیری مستقیم این پارامترها مقدور نیست و یا مشکل است، بنابراین مشخصه را به صورت غیرمستقیم با اندازه گیری ولتاژ- جریان سیم پیچی و تبدیل آنها به پارامترهای مورد نیاز تعیین می شود.



شکل (۱۹): مشخصه هیستریزیس حاصل از اندازه‌گیری برای هسته پرمالوی
Figure (19): Measured loop for Permalloy core

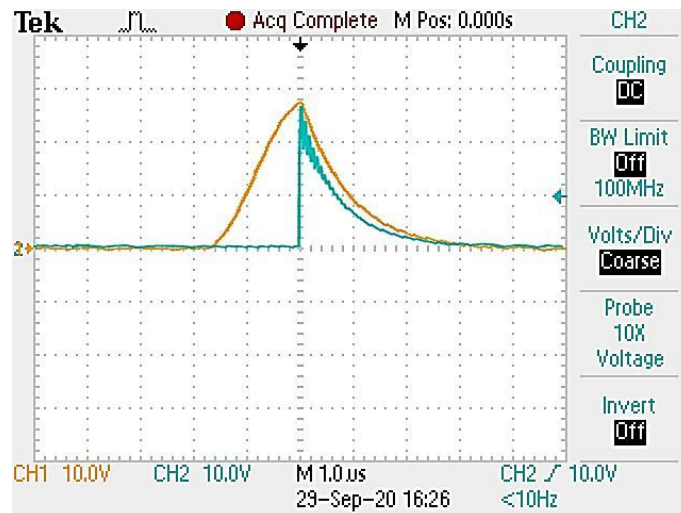


شکل (۲۰): هسته‌های شماره ۱ و ۲ با سیم‌پیچی لیتز
Figure (20): Cores #1 and #2 with litz windings



شکل (۲۱): ولتاژ خازن‌های C_1 و C_2
Figure (21): Voltages of C_1 and C_2

شکل (۱۶) ساختار مدار تست مورد نیاز را نشان می‌دهد. در این ساختار یک سیگنال سینوسی با فرکانس مورد نظر به یک تقویت‌کننده اعمال می‌گردد تا قابلیت جریان‌دهی آن افزایش یابد. برای تقویت سیگنال از یک تقویت‌کننده صوتی موجود در بازار استفاده شده است. سیگنال تقویت شده به سیم‌پیچی اولیه هسته اعمال می‌گردد و جریان عبوری از آن اندازه‌گیری می‌شود. مطابق قانون آمپر این جریان متناسب با H است. ولتاژ سیم‌پیچی ثانویه (یا اولیه) نیز باید اندازه‌گیری گردد. شکل (۱۷) مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان سلف را نشان می‌دهند. در این شکل ولتاژ دو سر سیم‌پیچی با توجه به سینوسی بودن ولتاژ منبع، سینوسی است ولی به دلیل اشباع، جریان غیرسینوسی شده است



شکل (۲۲): ولتاژ خازن C_3 و بار خروجی
Figure (22): Voltages of C_3 and R_{Load}

انتگرال این ولتاژ نیز مطابق قانون فارادی با B متناسب است. انتگرال‌گیری می‌تواند به‌صورت آنالوگ با استفاده از مدار RC انجام شود و یا ولتاژ اندازه‌گیری شده در یک نرم‌افزار به‌صورت دیجیتال انتگرال‌گیری شود. در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) تقویت‌کننده مورد استفاده به همراه مشخصه اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. در این شکل انتگرال‌گیری به‌صورت دیجیتال و در نرم‌افزار متلب انجام شده است.

۲-۵- نتایج نمونه آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی نتایج تست عملی مدار ارائه شده پرداخته می‌شود و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی انجام شده مقایسه می‌گردند. با توجه به طراحی و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مرحله نتایج نمونه آزمایشگاهی مدار MPC دو-طبقه ارائه شده است. شکل (۲۰) سلف‌های اشباع‌پذیر مورد استفاده در مدار با کمک سیم‌پیچی لیتز را نشان می‌دهد. در شکل (۲۱) ولتاژ خازن‌های C_1 و C_2 نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری ولتاژ از یک تقسیم مقاومتی با مقاومت‌های ۳۳۰ کیلوهم و ۲۲ کیلوهم استفاده شده تا ولتاژ ۵۰۰ ولت را به ۳۰ ولت تبدیل نماید و با استفاده از پروب معمولی به راحتی اندازه‌گیری شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود دامنه ولتاژ خازن C_1 در ۵۰۰ ولت بوده ولی به دلیل افت روی سلف، خازن C_2 ولتاژ کمتری دارد. در شکل (۱۹) نیز ولتاژ خازن C_3 و بار خروجی نشان داده شده‌اند. افت ولتاژ روی کلید باعث شده این دو ولتاژ کمتر از ۵۰۰ ولت شده و به دلیل عناصر پارازیتی مدار و بار ولتاژ خروجی دارای نوسان شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا الگوریتمی برای طراحی یک مدار MPC چند-طبقه بیان شد که براساس آن با داشتن مقادیر مطلوب ولتاژ خروجی، عرض پالس خروجی و مقدار مقاومت بار خروجی به‌صورت مرحله به مرحله پارامترهای مدار نهایی مشخص شدند. سپس با انتخاب پارامترهای مطلوب برای یک مدار، پارامترهای آن مشخص شد و نتایج شبیه‌سازی مدار نشان داده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که با استفاده از این الگوریتم به آسانی می‌توان یک مدار MPC به‌طور صحیح طراحی شود. در نهایت برای نشان دادن درستی نتایج شبیه‌سازی یک نمونه آزمایشگاهی تست و نتایج آن نشان داده شد.

References

مراجع

- [1] J.H. Rhee, Y.M. Cho, S.H. Kim, K.C. Ko, "Design for compression improvement of a magnetic pulse compressor by using a multiwinding magnetic switch", IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 45, no. 12, pp. 3252-3257, Dec. 2017 (doi: 10.1109/TPS.2017.2767067).

- [2] J.H. Rhee, Y.M. Cho, J.E. Baek, S.H. Kim, C.J. Lee, K.C. Ko, "Design of a low-stray inductance magnetic switch for high compression of the pulse width in a magnetic pulse compressor", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 46, no. 7, pp. 2599-2604, July 2018 (doi: 10.1109/TPS.2018.2841040).
- [3] R. Narsetti, R.D. Curry, K.F. McDonald, T.E. Clevenger, L.M. Nichols, "Microbial inactivation in water using pulsed electric fields and magnetic pulse compressor technology", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 34, no. 4, pp. 1386-1393, Aug. 2006 (doi: 10.1109/TPS.2006.878386).
- [4] S. Li, J. Gao, H. Yang, D. Zhu, B. Qian, Y. Cui, Q. Wu, Jun Zhang, "Investigation on adjustable magnetic pulse compressor in power supply system", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 2, pp. 1540-1547, Feb. 2019 (doi: 10.1109/TPEL.2018.2830106).
- [5] J. Rhee, S. Kim, J. Baek, K. Ko, "Method for self-resetting of magnetic switches in a magnetic pulse compressor without additional reset circuits", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 46, no. 10, pp. 3708-3712, Oct. 2018 (doi: 10.1109/TPS.2018.2860975).
- [6] A.S. Druzhinin, V.G. Kuchinsky, B.A. Larionov, A.G. Roshal, V.P. Silin, V.F. Soikin, "Pulse power systems using inductive energy storage", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 1, pp. 410-413, Jan. 1992, doi: 10.1109/20.119898.
- [7] J. Liu, X. Li, Y. Chi, J. Li, D. He, X. He, G. Pei, L. Shang, "Development of a solid-state, high-current, repetitive pulse power system for positron source prototype", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 50, no. 1, pp. 88-96, Jan. 2022 (doi: 10.1109/TPS.2021.3132149).
- [8] Z. Yang, K. Wang, P. Zhu, P. Liu, Q. Zhang, C. Xu, H. Jian, R. Shen, "A reusable planar triggered spark-gap switch batched-fabricated with PCB technology for medium- and low-voltage pulse power systems", *Defence Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 1572-1578, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.dt.2020.11.017).
- [9] R. Xiao, G. Wang, L. Fu, F. Ma, C. Li, R. Huang, X. Hao, "An adaptive hybrid dynamic state estimation method of the medium-voltage DC integrated power system with pulse load", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 134, Article Number: 107441, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepe.2021.107441).
- [10] L. Xu, J. Zhang, J. Liu, H. Wang, J. Dong, "Development of a 200-kJ capacitive pulsed power system for vehicular electrothermal-chemical launcher", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 48, no. 10, pp. 3378-3385, Oct. 2020 (doi: 10.1109/TPS.2020.3005954).
- [11] M. Jafarboland, M. Peyvandi, "Multi-objective optimization of pulsed power supply for a railgun", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 25-30, Aug. 2011 (dor: 20.1001.1.2322-3871.1390.2.6.3.9).
- [12] M. Song, D. Le, B. Go, M. Park, I. Yu, "Design of an attractive force circuit of pulsed power system for multistage synchronous induction coilgun", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 46, no. 10, pp. 3606-3611, Oct. 2018 (doi: 10.1109/TPS.2018.2827372).
- [13] Y. Liu, S. Liu, Y. Han, Y. Ge, Q. Zhang, F. Lin, "Optimization design of a repetitive nanosecond pulse generator based on saturable pulse transformer and magnetic switch", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 43, no. 9, pp. 3277-3285, Sept. 2015 (doi: 10.1109/TPS.2015.2459102).
- [14] S. Kim, M. Ehsani, "Control and analysis of magnetic switch reset current in pulsed power systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 529-533, Feb. 2014 (doi: 10.1109/TPEL.2013.2269908).
- [15] J. Kolek, M. Holub, "Practical design of a high-voltage pulsed power supply implementing sic technology for atmospheric pressure plasma reactors", *Applied Sciences*, vol. 9, no. 7, Article Number: 1451, April 2019 (doi: 10.3390/app9071451).
- [16] Z. Fang, Y. Shi, F. Liu, R. Zhou, "Compact microsecond pulsed power generator driven by solar energy for dielectric barrier discharge applications", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 2, pp. 390-396, April 2019 (doi: 10.1109/TDEI.2018.007725).
- [17] M. Manoochehri, J. Faiz, G. Shahgholian, "Improving the drive system of permanent magnet linear synchronous motor based on direct thrust force control applying space vector modulation", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 3, no. 11, pp. 41-52, Sept. 2013 (dor: 20.1001.1.23223871.13-91.3.11.6.9).
- [18] M. Watanabe, J. Kamiya, T. Takayanagi, "Design and circuit simulation of a magnetic switching system for kicker magnet power supply of 3 GeV RCS in J-PARC", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, pp. 1681-1684, June 2010 (doi: 10.1109/TASC.2010.2040612).
- [19] W. Ding, H. Ren, Q. Zhang, L. Yang, "Repetitive frequency marx generator based on magnetic switches and its application in dielectric barrier discharge", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 40, no. 10, pp. 2373-2378, Oct. 2012 (doi: 10.1109/TPS.2011.2174807).
- [20] A. Soldooy, A. Esmaeli, H. Akbari, S.Z. Mazloom, "Optimal design of power transformers with the help of a new innovative algorithm to minimize the cost and electromagnetic forces applied to the coil", *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, vol. 10, no. 2, pp. 53-64, 2021 (dor: 20.1001.1.23222468.1400.10-.2.6.3).

- [21] J. García, M. Méndez, S. González, V. Vega, R. Caballero, V.M. Prida, "2 - Electrochemical methods assisted with ALD for the synthesis of nanowires", *Magnetic Nano- and Microwires*, pp. 21-60, Second Edition, Woodhead Publishing, 2020 (ISBN: 9780081028322).
- [22] A.V. Svalov, I.R. Aseginolaza, A. Garcia-Arribas, I. Orue, J.M. Barandiaran, J. Alonso, M.L. Fernández-Gubieda, G.V. Kurlyandskaya, "Structure and magnetic properties of thin permalloy films near the "Transcritical" state", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 46, no. 2, pp. 333-336, Feb. 2010 (doi: 10.1109/TMAG.2009.2032519).

زیر نویس ها

1. Magnetic pulse compressor
2. Electric milk pasteurization
3. Saturable pulse transformer
4. Dielectric barrier discharge
5. Full width at half maximum
6. Skin effect
7. Litz wire