

طراحی و شبیه‌سازی مدار راه‌انداز لامپ کلاسترون با رویکرد بهبود عملکرد ترانسفورماتور پالس

محسن گنجی^۱، ابوالفضل نصیری^۲

۱- مدرس دانشگاه هوافضا عاشورا

۲- استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

چکیده

در این مقاله از ساختار مبدل DC/DC تمام پل برای راه‌اندازی لامپ کلاسترون استفاده شده است. برای تأمین توان کلاسترون سه ماژول مبدل تمام پل، با ترانسفورماتور ولتاژ بالا - فرکانس بالا بکار رفته است. خروجی ترانسفورماتورها در یک ساختار ستاره، یکسو شده و پس از عبور از یک فیلتر π به کلاسترون اعمال می‌گردد. ولتاژ ورودی مبدل ۵۰۰ VDC است که از یک تغذیه سه فاز تأمین می‌گردد. مدار راه‌انداز کلاسترون عرض پالس ۱ms، فرکانس تکرار پالس ۳۰ Hz، زمان خیز ۷۰ μ S و زمان سقوط ۶۵ μ S را با تغییرات سطح ولتاژ $\pm 1\%$ تولید می‌کند. در این تحقیق با متعادل‌سازی جریان مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور فرکانس بالا، حداکثر جریان مغناطیس‌کنندگی کاهش می‌یابد و موجب بهبود عملکرد مدار راه‌انداز می‌شود. بدین ترتیب حداکثر جریان ترانزیستورها کاهش می‌یابد. علاوه بر کاهش حداکثر جریان مغناطیس‌کنندگی، ابعاد هسته ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. در نتیجه حجم و وزن مدار راه‌انداز کلاسترون کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از مدار تشدید سری شرایط کلید زنی نرم فراهم شده است. نتایج تحقیق با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و مورد تأیید قرار گرفت است.

واژگان کلیدی: ترانسفورماتور پالس، تشدید سری، لامپ کلاسترون، مدار راه‌انداز

۱- مقدمه

لامپ کلايسترون به عنوان شتاب‌دهنده ماکروویو در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. شتاب دهنده‌های خطی با تولید انرژی توان بالای پرتو الکترونی یا پرتو ایکس در پزشکی، صنعت، امنیت ملی و غیره استفاده می‌شود. این لامپ‌ها به عنوان متداول‌ترین عنصر برای کاربردهای فرکانس بالا و پهنای پالس باریک شناخته می‌شود. شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون، از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که یکی از اجزای اصلی آن مدار راه‌انداز می‌باشد. مدار راه‌انداز با تولید پالس‌های ولتاژ و توان بالا جهت راه‌اندازی لامپ‌های ماکروویو مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱] و [۲].

در مرجع [۳] مبدل توان پالسی بر پایه تخلیه شارژ خازن و جبران کننده ولتاژ سریع برای راه‌اندازی لامپ کلايسترون ارائه شده است. جبران کننده ولتاژ سریع به‌صورت ماژولار پالس ولتاژ بالا را تأمین می‌کند. ساختار پیشنهادی برای بهبود کیفیت توان AC در هر مبدل تخلیه شارژ خازنی قابل استفاده است. در مرجع [۴] ساختار تمام پل ماژولار برای تولید پالس ولتاژ بالا برای راه‌اندازی لامپ کلايسترون بکار رفته است. در ساختار ارائه شده از شش ماژول مبدل dc-dc برای تأمین ولتاژ مدنظر استفاده شده است. در مرجع [۵] یک مدولاتور توان پالس ولتاژ بالا با استفاده از ساختار مبدل چند سطحی برای راه‌اندازی کلايسترون پیشنهاد شده است. بدین ترتیب ماژول‌های مبدل چند سطحی برای تأمین سطح ولتاژ پالس به‌صورت سری در خروجی قرار می‌گیرد. ترکیب پیشنهاد شده موجب بهبود کیفیت توان خط AC و بهبود راندمان مدولاتور توان شده است. در مرجع [۶] از ساختار مبدل فلای بک کلمپ فعال برای تولید پالس ولتاژ بالا برای لامپ مایکروویو استفاده شده است. بدین‌صورت که با تغییر زمان کلید زنی موجب افزایش بهره مبدل شده است. در مرجع [۷] ساختار مدولاتورهای توان بر اساس ماژول‌های تقویت‌کننده ولتاژ چند سطحی ارائه شده است. همچنین با به‌کارگیری از ماژول‌های تقویت کننده ولتاژ ورودی موازی/خروجی سری پالس ولتاژ بالا تأمین شده است. در مرجع [۸] از ساختار مبدل افزایشنده چند مرحله‌ای برای منبع تغذیه پالس ولتاژ بالا استفاده شده است. ساختار ارائه شده در شرایط باری متفاوت امکان تولید پالس مدنظر را دارد. همچنین پالس تولید شده در خروجی، به‌صورت تک-قطبی و دوقطبی و با عرض پالس، فرکانس و دامنه قابل تنظیم ارائه شده است. در مرجع [۹] از ساختار مبدل نیم‌پل برای راه‌اندازی لامپ ماکروویو استفاده شده است. بدین ترتیب با تغییر فاز کلید زنی جریان مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور متعادل شده است. در مرجع [۱۰] یک مولد پالس با استفاده از مبدل کلید-خازنی، برای تولید پالس ولتاژ بالا با امکان تنظیم سطح ولتاژ و فرکانس ارائه شده است. بدین صورت که ساختار ماژول‌های سوئیچ-خازنی برای افزایش گام‌به‌گام ولتاژ ورودی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۱] از شارژ بانک خازنی برای تولید پالس ولتاژ بالا برای راه‌اندازی کلايسترون استفاده شده است. برای تأمین ولتاژ سطح بالا، مبدل‌های چند سطحی به‌صورت ماژولار بکار رفته‌اند. در مرجع [۱۲] از ساختار ماژولار چند سطحی به‌عنوان جایگزین ترانسفورماتور پالس برای راه‌اندازی لامپ کلايسترون استفاده شده است. هر ماژول از یک مبدل DC/DC با ترانسفورماتور فرکانس بالا - ولتاژ بالا تشکیل شده است. سپس در یک ساختار سری خروجی ماژول‌ها با هم جمع شده و ولتاژ سطح بالا برای

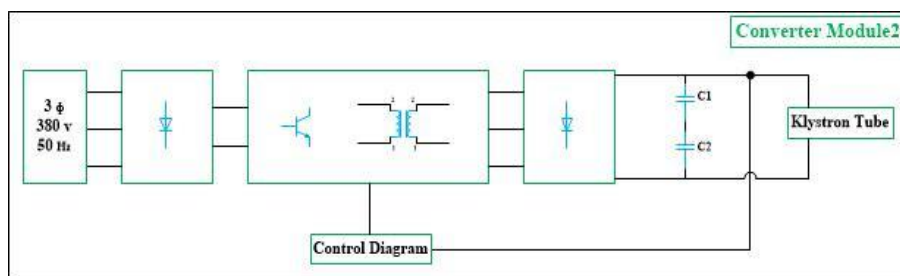
کلايسترون تأمین می‌گردد. در مراجع [۱۳] و [۱۴] از ساختار مبدل فوروارد کلمپ فعال برای تولید پالس ولتاژ بالا استفاده شده است. در آنها با تکنیک تغییر فاز بهره مبدل افزایش یافته است. در مرجع [۱۳] از ساختار تک کلید و در مرجع [۱۴] از ساختار دو کلید استفاده شده است.

در این مقاله با استفاده از مبدل تمام‌پل؛ طراحی و شبیه‌سازی مدار راه‌انداز لامپ کلايسترون با رویکرد بهبود عملکرد ترانسفورماتور پالس انجام شده است. از طریق ساختار سه مبدل dc-dc ماژولار همراه با ترانسفورماتورهای فرکانس بالا تولید پالس با ولتاژ بالا فراهم شده است. در خروجی مدولاتور، فرکانس تکرار پالس مدار راه‌انداز ۳۰ Hz، فرکانس کلید زنی ۵۰ kHz، عرض پالس خروجی ۱ ms، زمان خیز ۷۰ و زمان سقوط ۶۵ μ s با افت سطح ولتاژ $\pm 1\%$ به دست آمده‌اند.

مطالب مذکور در چهار بخش ذکر شده است. در ابتدا مقدمه ذکر شده و پس از آن در بخش دوم ساختار پیشنهادی مدار راه‌انداز در سه حوزه تشریح مدار تشدید، آفست جریان مغناطیس‌کنندگی و مدار کنترل عنوان شده است. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی مقاله در نرم‌افزار متلب تشریح گردیده است. در آخر نیز نتیجه‌گیری کلی بیان گردیده است.

۲- ساختار پیشنهادی مدار راه‌انداز لامپ کلايسترون

در این تحقیق، مشخصات پالس مورد نیاز برای راه‌اندازی لامپ کلايسترون ۲۵ kV، ۴ A، ۴ KW، ۱۰۰ است. مدار راه‌انداز لامپ کلايسترون از اجزای مختلفی تشکیل شده است (شکل ۱) که عبارت‌اند از: (۱) مدار یک‌سوساز ورودی: که در این بخش سه فاز ۳۸۰ V ورودی به ۵۰۰ VDC یکسو می‌گردد. (۲) مبدل DC/DC تمام‌پل که از طریق اینورترهای رزونانسی تمام‌پل با سلف و خازن موجود در مدار، ولتاژ یکسو شده را به پالس‌هایی با عرض و دامنه و فرکانس اشاره شده تبدیل می‌نماید (۳) یک‌سوساز خروجی: به سرعت دامنه پالس‌ها را یکسو و به‌صورت DC مورد نظر تبدیل می‌کند. (۴) مدار کنترل: وظیفه کنترل این چرخه حلقه بسته را از طریق نمونه‌برداری و تطبیق خروجی با سیگنال ورودی بر عهده دارد.

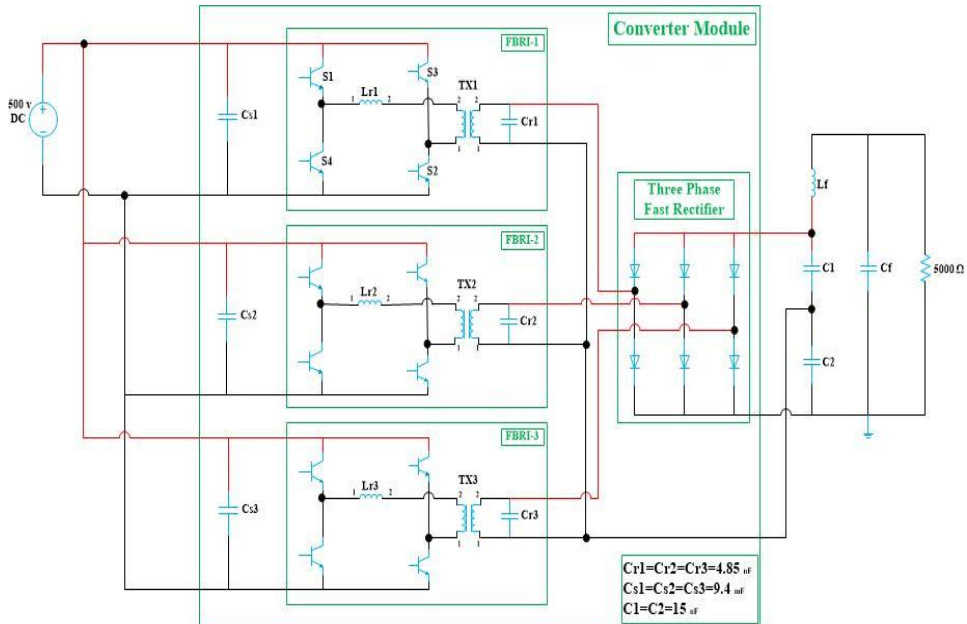


شکل ۱- بلوک دیاگرام مدار راه‌انداز لامپ کلايسترون

ترانسفورماتور پالس، یک جزء مبدل DC/DC بوده که در این مقاله با بهبود عملکرد ترانسفورماتور پالس، تلاش در ارتقاء عملکرد مدار راه‌انداز لامپ کلايسترون داریم. ساختار پیشنهادی، مبدل تمام‌پل ایزوله با تشدید سری و کنترل تغییر فاز می‌باشد. در این طرح با کنترل تغییر فاز کلید زنی، شرایط تعادل در جریان مغناطیس‌کنندگی برآورده می‌شود. بدین ترتیب از مقدار حداکثر جریان مغناطیس-

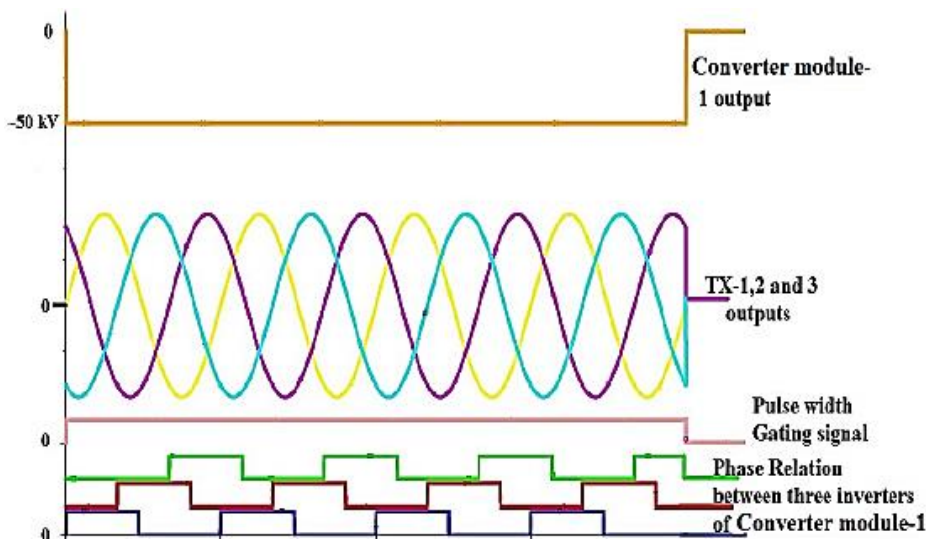
کنندگی ترانسفورماتور پالس کاسته شده و در نتیجه تنش جریان کلیدها کمتر و تلفات کلید زنی و تلفات هسته کاهش می‌یابد؛ بنابراین حجم، وزن و قیمت هسته‌ی ترانسفورماتور پالس نیز کاهش می‌یابد. علاوه با استفاده از اندوکتانس سری، مدار تشدید سری ایجاد نموده و ضمن کاهش تلفات ترانسفورماتور، شرایط کلید زنی نرم (ZVS) تأمین می‌شود [۱۵].

مدار راه‌انداز شامل یک ماژول مبدل با خروجی $kV \frac{8}{34}$ است که شامل سه اینورتر رزونانسی تمام‌پل با فرکانس بالا (FBRI)، ترانسفورماتورهای فرکانس بالا-ولتاژ بالای (TX1-TX3) مرتبط شده، مدارهای تانک تشدید و شش یکسو کننده سریع پالس می‌باشد. کنترل و درایو گیت، مدارهای جبران کننده افت سطح ولتاژ و مرحله فیلتر خروجی در بخش انتهایی مدار جانمایی شده است (شکل ۲).



شکل ۲- مدار راه انداز لامپ کلايسترون

در واقع، خازن‌های $Cs1$, $Cs2$, $Cs3$ به عنوان خازن‌های ورودی مبدل هستند. مدار تشدید سری با استفاده از اندوکتانس‌های $Lr1$, $Lr2$, $Lr3$ و خازن‌های $Cr1$, $Cr2$, $Cr3$ ایجاد می‌شود و موجب کلید زنی نرم در مبدل می‌گردد. دارند. در این بین ترانزیستورهای $S1$ تا $S12$ نقش سوئیچ‌های مبدل DC/DC را با فرکانس 50 KHz را در مدار بر عهده دارد. $Tx1$, $Tx2$, $Tx3$ ترانسفورماتورهای فرکانس بالای افزایشدهنده هستند. هر یک از این ماژول‌های اینورتر 120° درجه اختلاف فاز با هم دارند. در خروجی مدار نیز شاهد حضور مدار یکسوساز سه‌فاز $D1$ تا $D6$ هستیم که تا سه برابر فرکانس کلید زنی، رپیل خروجی را کاهش می‌دهد. $C1$, $C2$ در کنار Cf و فیلتر و صافی خروجی مدار راه انداز پیشنهادی ما هستند. ضمناً مقاومت 5000Ω به عنوان مقاومت معادل کلايسترون مدار محسوب می‌شود. شکل موج‌های نظری که اصل کار ماژول مبدل را نشان می‌دهد در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایش اساس عملکرد مازول مبدل با شکل موج‌های نظری

ورودی مازول مبدل، از منبع تغذیه VDC ۵۰۰ معمولی گرفته شده است. در ورودی مبدل FBRI مبتنی بر IGBT، ورودی DC را به ولتاژ سینوسی V ۵۰۰ فرکانس ۵۰ KHz تبدیل می‌کند. این ولتاژ ترانسفورماتور فرکانس بالا-ولتاژ بالا (با نسبت تبدیل ۱۷) را تغذیه می‌کند که این ترانسفورماتور از طریق یک سلف رزونانس به بازوی بار مربوط به اینورتر متصل شده است. درایوهای گیت هر سه مبدل FBRI مازول به‌طور متوالی ۱۲۰ درجه تأخیر فاز دارند. این پیکربندی شکل موج‌ها را تولید می‌کند که در خروجی‌های TX1 و TX2 و TX3 به ترتیب ۱۲۰ درجه و ۲۴۰ درجه جابجا می‌شوند، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است. هر ترانسفورماتور ولتاژ ۸/۳۴ kVrms تولید می‌کند. سیم‌پیچ‌های ثانویه هر سه ترانسفورماتور مازول مبدل به شکل ستاره متصل شده‌اند. این نوع اتصال نه تنها ولتاژ خطی ظاهر شده در یکسو کننده‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه فرکانس ریپل خروجی یکسوساز را نیز افزایش می‌دهد. خط ۱۸/۵ kVrms در دو پایانه در ورودی‌های یکسو کننده ظاهر می‌شود. یکسو کننده سریع شش پالسی ولتاژهای سینوسی سه فاز را به ولتاژ DC تبدیل می‌کند. پس از تبدیل DC به ولتاژ بالا AC و یکسوسازی، ۲۵ kV- در خروجی یکسو کننده ظاهر می‌شود. خروجی با استفاده از یک فیلتر نوع π صاف می‌شود تا دامنه ریپل ۳۰۰ kHz روی پالس کاهش یابد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، عرض پالس خروجی مورد نیاز با راه‌اندازی گیت درایوها توسط سیگنال‌های راه‌انداز ۱ ms به دست می‌آید.

۱-۲- مدار تشدید

در این ساختار برای اینکه تلفات ناشی از کلید زنی را کاهش دهیم از مدار تشدید استفاده شده است. بخش مدار تشدید ساختار پیشنهادی متشکل از Cr و Lr در هر طبقه می‌باشد. القاگرهای تشدید ($Lr1-Lr3$) و خازن‌های مدار تانک ($Cr1-Cr3$) با مقدار مؤثر ۴/۵۸ nF مدار تشدید می‌باشد. سلف

تشدید و خازن تشدید همراه با ترانسفورماتور غیر ایده آل یک مدار تشدید را تشکیل می دهند. فرکانس تشدید (fr) مدار تانک ۱۹ KHz است. فرکانس کلید زنی (fs) به دلیل مزایای ذاتی جریان تأخیر ناشی از حالت القایی عملکرد، کمی بالاتر از فرکانس تشدید نگه داشته شده است [۱۶]. یکی از پایانه های سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور ولتاژ بالا به نقطه میانی مدارهای یکسو کننده پل شش پالس فرکانس بالا متصل شده است.

خروجی دوم ترانسفورماتور برای تشکیل یک نقطه خنثی به یکدیگر متصل شده و از آنجا به نقطه مرکزی خازن ورودی فیلتر LC متصل می شود. این پیکربندی افزایش اندکی در ولتاژ خروجی در مقایسه با نقطه خنثی شناور نشان می دهد.

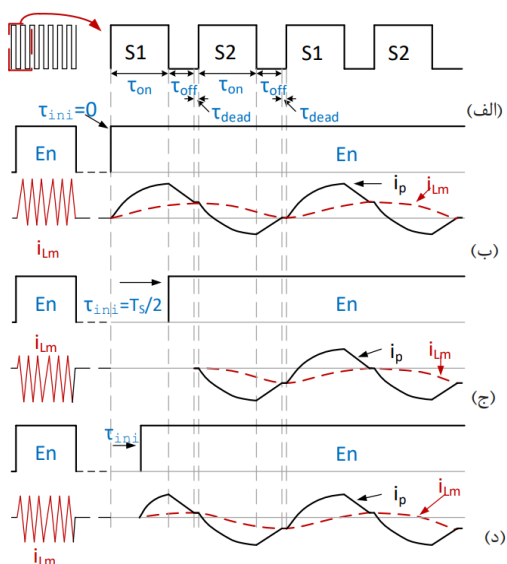
خروجی یکسو کننده به یک فیلتر π متصل شده است تا محتوای ریبیل فرکانس بالا (۳۰۰ KHz) را کاهش دهد. سمت ورودی فیلتر ۷/۵ nF - است که به دو قسمت ۱۵ nF تقسیم شده است. مقدار اندوکتانس فیلتر ۷۰ mH و ظرفیت فیلتر CF خروجی ۰/۵ nF است.

۲-۲- آفست جریان مغناطیس کنندگی

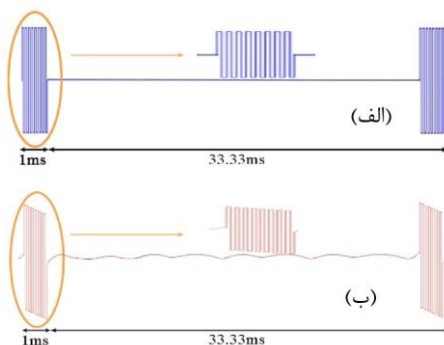
هنگام فعال بودن مدار راه انداز، ولتاژ اولیه آفستی در ترانسفورماتور پالس برقرار است که باعث ایجاد تلفات در هسته ترانسفورماتور پالس می گردد. ابتدا میزان آفست جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور پالس محاسبه می شود. سپس با تغییر فاز کلید زنی ترانزیستورها، جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور پالس متعادل می گردد. سیگنال گیت ترانزیستورها مطابق شکل ۴ از ۳ بخش تشکیل شده است. T_{on} زمان روشن بودن ترانزیستورها، T_{off} زمان خاموش بودن ترانزیستورها، T_s دوره ی تناوب کلید زنی مبدل تمام پل و fs فرکانس کلید زنی می باشد.

$$\tau_{on} + \tau_{off} = T_1 = T_r = T_s / \gamma \quad \text{و} \quad T_1 + T_r = T_s = 1 / F_s$$

در شکل ۴ شکل موج جریان اولیه ترانسفورماتور پالس (ip) و جریان مغناطیس کنندگی (iLm) می باشد. در شکل (۴ ب و ج) جریان مغناطیس کنندگی متعادل نیست. عدم تعادل در جریان مغناطیس کنندگی باعث اتلاف توان ناشی از ایجاد ولتاژ در زمان های غیر فعال بودن مبدل در ترانسفورماتور پالس می گردد. با کنترل تغییر فاز، ولتاژ ترانسفورماتور پالس در زمان غیر فعال بودن مبدل، صفر می شود. در شکل (۴ د) با کنترل زمان تأخیر شروع (τ_{ini}) فعال نمودن مبدل، مقدار آفست جریان مغناطیس کنندگی را می توان به حداقل رساند. τ_{ini} به عنوان زمان تأخیر در شروع فعالیت مدار راه انداز تعریف می شود. شکل ۵ نیز مطابق توضیح شکل خروجی موارد فوق را نشان می دهد.



شکل ۴- جریان مغناطیس‌کنندگی (الف) سیگنال گیت (ب) آفست مثبت (ج) آفست منفی (د) آفست متعادل



شکل ۵- ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور قدرت در (الف) جریان iLm نامتعادل (ب) جریان iLm متعادل

۳-۲- مدار کنترل

بلوک کنترل مدار راه‌انداز لامپ کلاسترون از سه بخش اصلی مدار فیدبک، مدار کنترل توان، مدار کنترل تغییر فاز تشکیل شده است. مدار فیدبک وظیفه نمونه‌برداری از ولتاژ و جریان خروجی و تحویل به مدار کنترل توان مبدل را دارد. در مدار کنترل توان؛ اگر ولتاژ خروجی در سطح ۲۵ kV باشد، حداکثر توان میکروویو توسط کلاسترون تقویت می‌شود. بر این اساس مطابق شکل ۶ جهت کنترل جریان خروجی با نمونه‌گیری از جریان کاتد-آند (i_f) و مقایسه آن با مقدار جریان مرجع (i_m) خطای جریان i_{error} به دست می‌آید. سپس توسط کنترل‌کننده P_I خطای خروجی تصحیح می‌شود. برای

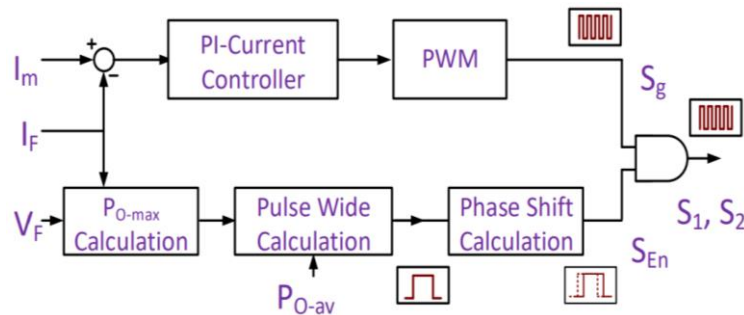
دستیابی به متوسط توان مورد نظر، باید زمان فعال بودن مبدل محاسبه گردد. به همین دلیل زمان فعال بودن مبدل (E_n) و بیشینه توان به صورت رابطه زیر حاصل می شود.

$$P_O = V_t \cdot i_O + R_{m_O} \cdot i_O^2$$

$$T_{En} = P_{O-av} / P_{O-max}$$

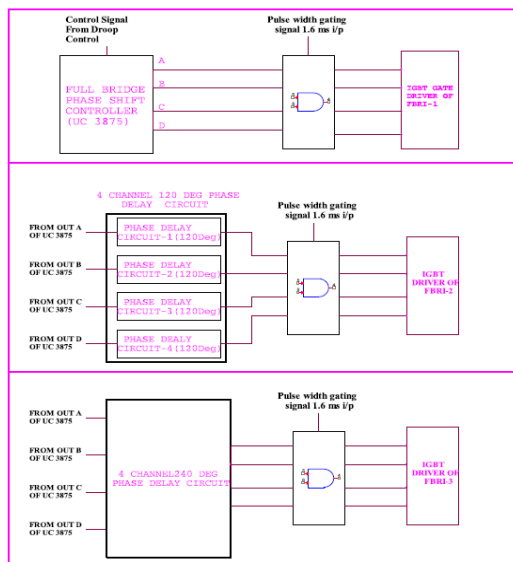
$$S_{En} = \begin{cases} 1 & \text{Converter is ON} \\ 0 & \text{Converter is OFF} \end{cases}$$

مطابق شکل ۶ هنگامی تعادل در جریان مغناطیس کنندگی برقرار است که متوسط جریان i_{Lm} صفر باشد. به همین دلیل زمان تغییر فاز T_{ini} مطابق رابطه زیر محاسبه شده و برای تنظیم آفست جریان مغناطیسی، فعال شدن مبدل به اندازه T_{ini} به تأخیر می افتد. در نهایت، سیگنال فعال شدن مبدل (S_{En}) جهت تعیین زمان فعالیت مبدل تولید می گردد. همچنین باید تأخیر تغییر فاز محاسبه و به مدار کنترل افزوده گردد.



شکل ۶- بلوک دیاگرام کنترل مدولاتور توان جهت عملکرد مدار در حالت فعال بودن مبدل

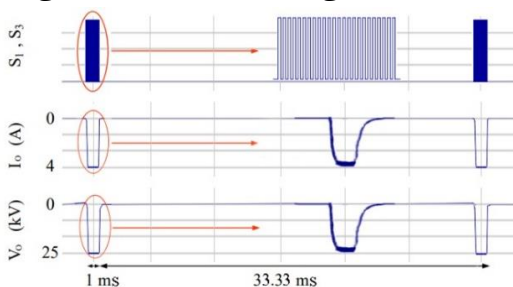
همچنین کنترل کننده جریان خروجی، سیگنال گیت S_g را در طول زمان فعال بودن مبدل تولید می کند. بدین ترتیب هر دو کنترل کننده جریان و توان در تأمین حداکثر و متوسط توان کلایسترون مؤثر هستند. سیگنال اعمالی به گیت کلیدها S_1, S_2 از ترکیب سیگنال S_g با سیگنال فعال کننده S_{En} از رابطه حاصل می گردد. دیاگرام شماتیک مدار تأخیر فاز و کنترلر در شکل ۷ آمده است.



شکل ۷- دیاگرام شماتیک کنترل کننده و مدار تأخیر فاز

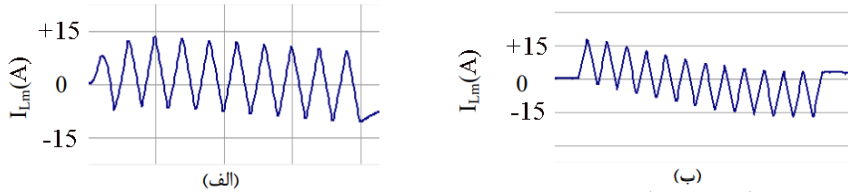
۳- نتایج شبیه سازی

سیگنال فعال کننده گیت کلیدهای مبدل و منحنی ولتاژ و جریان باریکه الکترونی کلاسترون با فرکانس کاری ۳۰ Hz در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و در شکل ۸ نشان داده شده است. در زمان فعال بودن مبدل، جریان باریکه الکترونی ۴ A در ولتاژ باریکه الکترونی ۲۵ kV را نشان می دهد.

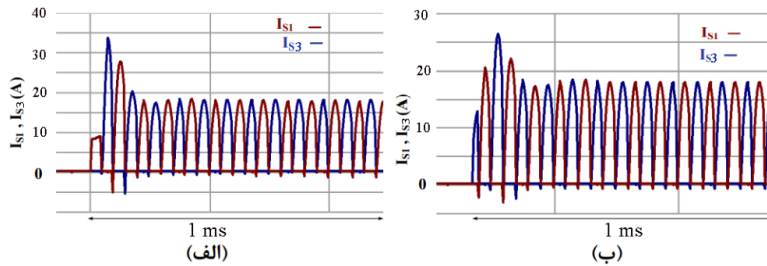


شکل ۸- الف) سیگنال دروازه کلیدها ب) جریان باریکه الکترون کلاسترون ج) ولتاژ باریکه الکترون کلاسترون

هنگامی که تغییر فاز به مدار کنترل اعمال نشده است عدم تعادل جریان مغناطیس کنندگی در بخش الف شکل ۹ به وجود آمده و موجب افزایش حداکثر جریان مغناطیس کنندگی می شود. بدین ترتیب امکان اشباع هسته ترانسفورماتور پالس را افزایش می دهد. همچنین با اعمال تغییر فاز، تعادل جریان مغناطیس کنندگی فراهم می گردد بخش ب شکل ۹.

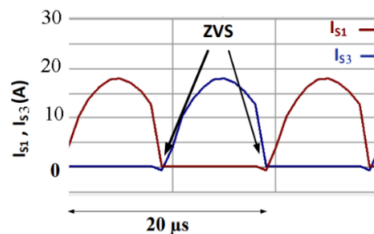


شکل ۹- الف) جریان i_{Lm} - عدم تعادل جریان مغناطیس‌کنندگی (گذرا) ب) جریان i_{Lm} - تعادل جریان مغناطیس‌کنندگی (پایدار)



شکل ۱۰- جریان کلیدها الف) حالت عدم تعادل در جریان مغناطیس‌کنندگی ب) ایجاد تعادل در جریان مغناطیس‌کنندگی

شکل ۱۰ جریان کلیدها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود ایجاد تعادل در جریان مغناطیس‌کنندگی باعث کاهش تنش جریان کلیدها می‌گردد. شکل ۱۱ ایجاد شرایط ZVS برای کلیدها را نشان می‌دهد. بدین ترتیب با در نظر گرفتن شرایط تشدید سری در مبدل، کلید زنی نرم برای کلیدها مهیا شده است.



شکل ۱۱- کلید زنی نرم در کلیدها

۴- نتیجه‌گیری

ایده مطرح‌شده در این تحقیق بدین صورت است که با استفاده از روش تغییر فاز، تعادل در جریان مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور پالس ایجاد می‌شود. در نتیجه حداکثر جریان مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور پالس از $16/2A$ به $11/4A$ کاهش یافت. بدین ترتیب که تعداد دورهای سیم‌پیچ ثانویه در حالت عدم تعادل جریان مغناطیس‌کننده‌گی ۵۸۳ دور بود که با ایجاد تعادل به ۵۲۴ دور کاهش یافت. با کاهش جریان مغناطیس‌کنندگی، ابعاد، وزن و حجم ترانسفورماتور پالس کاهش می‌یابد. همچنین ایجاد

تبادل در جریان مغناطیس‌کنندگی باعث کاهش تنش جریان کلیدها در زمان شروع ناحیه فعال مبدل گردید.

۵- منابع و مراجع

- [1] Z. Liu , H. Zha, J. Shi, and H. Chen “Study on the Efficiency of Klystrons” IEEE TRANS. ON PLASMA SCIENCE, vol. 48, no. 6, pp. 2089-2096, JUNE 2020.
- [2] L. J. R. Nix , L. Zhang , and A. W. Cross, “Design of a 48 GHz Gyroklystron Amplifier” IEEE TRANS. ON ELECTRON DEVICES, Vol. 68, no. 11, pp. 5792-5798, NOVEMBER 2021.
- [۳] وحید اصلانی، فریدون عباسی دوانی، محمد لامعی رشتی، فرشاد قاسمی - مقایسه انواع مدولاتورهای راه‌انداز لامپ کلاسترون شتاب‌دهنده خطی الکترون و طراحی و ساخت نمونه اولیه به روش استفاده از سوئیچ‌های نیمه‌هادی - ۱۳۹۱
- [4] R. Thekkeppat, V. Mandloi, and P. Shrivastava, “A Solid-State Converter Topology, -100 kV, 20 A, 1.6 ms, Modulator for High Average Power Klystron Amplifier” IEEE TRANS. ON PLASMA SCIENCE, Vol. 46, no. 10, pp. 3700-3707 , OCTOBER 2018
- [۵] حسین فرزانه فرد، رضا کبیری - طراحی مدولاتور پالسی نیمه هادی برای کلاسترون - ۱۳۸۴
- [6] M. R. Banaei, A. Nasiri, S. M. Alavi, and S. Hosseinzadeh “Voltage Control of Magnetron Power Supply Utilizing Active Clamp Flyback Converter” Scientific Journal of Applied Electromagnetics, vol. 7, no. 1, pp. 73-82, Spring & Summer 2019.
- [7] A. kholghkhiz, M.R. Banaei, A. Nasiri, “Power modulator based on multi-level voltage amplifier modules” 5th esdc vol. 5, no 1, pp. 36-47, 2019.
- [8] Devesh Malviya, and Mummadi Veerachary - A Boost Converter-Based High-Voltage Pulsed-Power Supply – 2020