



## Design and Construction of Simmer Circuit in Order to Drive Flash Lamp in Solid State Laser

Majid Zamani<sup>1</sup>, PhD.

<sup>1</sup> Faculty of Applied Sciences, Malek-Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Isfahan, Iran.

### Abstract:

In solid state lasers, the light pumping of the laser rod is done by a flash lamp. In order to drive the flash lamp, an electrical power supply consisting of four main parts is used, including the capacitor charging power supply, the trigger circuit, the pulse forming network and the simmer circuit. Using the high voltage output of the trigger circuit, the xenon gas inside the flash lamp is ionized. After the trigger action, the main task of the simmer circuit is to generate a low current in order to maintain the ionized state of the flash lamp. Using the simmer mode increases the life of the flash lamp and also significantly reduces electrical and electromagnetic interference. In this article, a new simmer circuit is proposed for driving flash lamp in solid state laser. The presented circuit has been completely designed and then simulated in the PSPICE software environment. After confirming the correctness of its operation, the proposed circuit has been implemented in a laboratory. Circuit simulation results and laboratory results are presented and reported in this article.

**Keywords:** Simmer, Flash lamp, Laser, Switching power supply, Trigger circuit.

**Received:** 02 November 2022

**Revised:** 18 December 2022

**Accepted:** 10 January 2023

**Corresponding Author:** Dr. Majid Zamani, Ma.zamani@sutech.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1972034.1047>



## طراحی و ساخت مدار زیمر به منظور تحریک فلاش لامپ در لیزر حالت جامد

مجید زمانی<sup>۱</sup>، دکتری

۱- پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

**چکیده:** در لیزرهای حالت جامد دمش نوری میله لیزری توسط فلاش لامپ انجام می‌شود. به منظور راه‌اندازی فلاش لامپ از یک منبع تغذیه الکتریکی متشکل از چهار بخش اصلی شامل منبع تغذیه شارژ کننده خازنی، مدار تریگر، شبکه شکل‌دهنده پالس و مدار زیمر استفاده می‌شود. با استفاده از خروجی ولتاژ بالای مدار تریگر، گاز زنون داخل فلاش لامپ یونیزه می‌شود. پس از عمل تریگر وظیفه اصلی مدار زیمر تولید جریان کم به منظور حفظ حالت یونیزه فلاش لامپ است. استفاده از حالت زیمر موجب افزایش طول عمر فلاش لامپ و همچنین کاهش چشمگیر تداخل مزاحم الکتریکی و الکترومغناطیسی می‌شود. در این مقاله یک مدار زیمر جدید جهت راه‌اندازی فلاش لامپ در لیزر حالت جامد پیشنهاد شده است. مدار ارائه شده به طور کامل طراحی و سپس در محیط نرم‌افزار PSPICE شبیه‌سازی شده است. پس از تأیید صحت عملکرد آن، مدار پیشنهادی به صورت آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی مدار و نتایج آزمایشگاهی در این مقاله ارائه و گزارش شده است.

**واژه‌های کلیدی:** زیمر، فلاش لامپ، لیزر، منبع تغذیه، مدار تریگر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

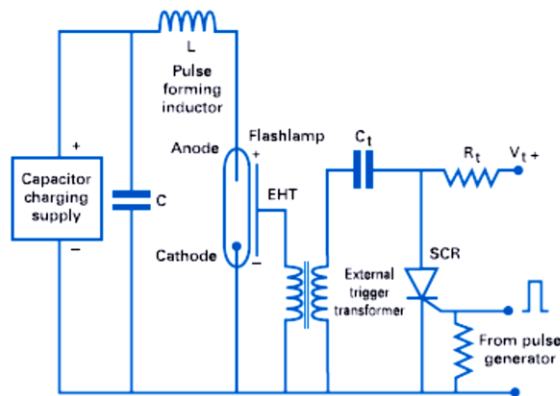
نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید زمانی، Ma.zamani@sutech.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teegees.2023.1972034.1047>



یکی از روش‌های مرسوم برای دمش محیط فعال لیزری، استفاده از فلاش لامپ است. به منظور راه‌اندازی فلاش لامپ از یک منبع تغذیه متشکل از چهار بخش اصلی شامل منبع تغذیه شارژ کننده خازنی ( $CCPS^1$ )، واحد تریگر<sup>۲</sup>، شبکه شکل‌دهنده پالس ( $PFN^3$ ) و مدار زیمر استفاده می‌شود [۲، ۱]. ساختار کلی یک منبع تغذیه فلاش لامپ در لیزرهای حالت جامد در شکل (۱) نشان داده شده است. اساس کار این مدار به این صورت است که ابتدا خازن به کمک یک واحد شارژ کننده (منبع تغذیه شارژ کننده خازنی) تا ولتاژی که تعیین کننده انرژی منتقل شونده به لامپ است، شارژ می‌شود. سپس محیط فیزیکی داخل لامپ توسط یک پالس ولتاژ بالا (حدود ۲۰ کیلوولت) که به وسیله مدار تریگر (بخش تریگر) ایجاد می‌شود، یونیزه می‌گردد. در این حالت انرژی ذخیره شده در خازن از طریق القاگر  $L$  درون فلاش لامپ تخلیه می‌شود. علت استفاده از القاگر  $L$  در مسیر تخلیه خازن، کنترل قله و پهنای پالس جریان است. مجموعه سلف، خازن و فلاش لامپ به شبکه شکل‌دهنده پالس یا PFN معروف است [۶-۱].

فلاش لامپ به عنوان یک منبع تحریک نوری میله لیزری، از لحاظ الکتریکی دارای امپدانس<sup>۴</sup> بسیار بزرگی در حد چند ده مگا اهم بوده و عملاً مانند یک اتصال باز عمل می‌کند [۷، ۱]. برای عبور جریان از فلاش لامپ که باعث تابش نور از آن می‌شود، باید به روشی این امپدانس را کاهش داد. به فرایندی که منجر به کاهش امپدانس فلاش لامپ می‌شود، تریگر گفته می‌شود. این فرآیند با اعمال یک ولتاژ زیاد لحظه‌ای به الکترودهای فلاش لامپ (روش تریگر سری<sup>۵</sup>) یا با اعمال یک میدان عرضی از طریق دیواره فلاش لامپ (روش تریگر خارجی<sup>۶</sup>) انجام می‌شود [۷-۱]. در روش تریگر خارجی که مدار آن در شکل (۱) آورده شده است خازن  $C_t$  از طریق مقاومت  $R_t$  تا ولتاژ  $V_t$  شارژ می‌شود. با روشن شدن کلید  $SCR^7$  خازن  $C_t$  در اولیه ترانسفورمر<sup>۸</sup> تخلیه می‌شود که باعث تولید یک پالس قوی ولتاژ در ثانویه ترانسفورمر تریگر می‌شود. این سر ثانویه به سیمی از جنس نیکل که به دور جداره خارجی لامپ پیچیده شده اعمال می‌شود. این روش تنها در لیزرهای هواخنک کاربرد دارد و یکی از ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های تریگر است که می‌توان آن را اجرا نمود. اصلی‌ترین عیب این طرح وجود ولتاژ بالا در بیرون لامپ است که به‌ویژه در مواقعی که کاواک<sup>۹</sup> لیزر از جنس فلزی ساخته شده است، با مشکل عایق‌بندی مواجه می‌شود [۷، ۴، ۳].

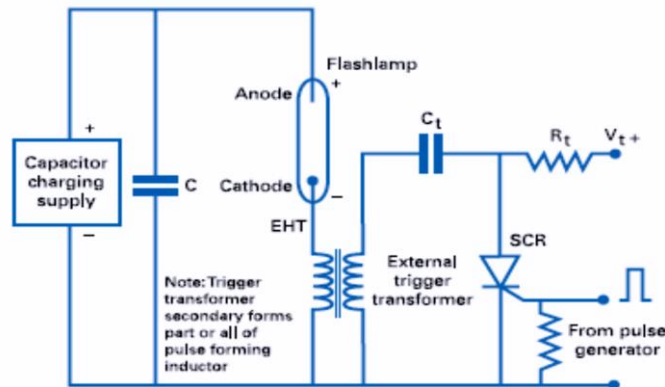


شکل (۱): ساختار کلی یک منبع تغذیه فلاش لامپ با مدار تریگر خارجی [۳]

روش تریگر سری که مدار آن در شکل (۲) نشان داده شده است، همانند روش تریگر خارجی، خازن  $C_t$  را از طریق مقاومت  $R_t$  تا ولتاژ  $V_t$  شارژ می‌کند. با روشن شدن کلید  $SCR$  خازن  $C_t$  در اولیه ترانسفورمر تخلیه می‌شود با این تفاوت که پالس قوی ولتاژ که در ثانویه ترانسفورمر تریگر سری تولید شده است، به صورت سری در مسیر تخلیه قرار می‌گیرد. از آنجایی که تخلیه خازن در فلاش لامپ باعث عبور جریان زیادی از سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورمر است، هسته ترانسفورمر اشباع شده و اندوکتانس<sup>۱۰</sup> ثانویه کاهش پیدا می‌کند. مقدار اندوکتانس کاهش یافته در این حالت همان مقدار اندوکتانس مورد نیاز برای سلف شکل‌دهنده پالس است. ترانسفورمر تریگر سری نسبت به ترانسفورمر تریگر خارجی بزرگ‌تر، سنگین‌تر و گران‌تر است. تریگر سری نسبت به تریگر خارجی قابلیت اطمینان بیشتری داشته و



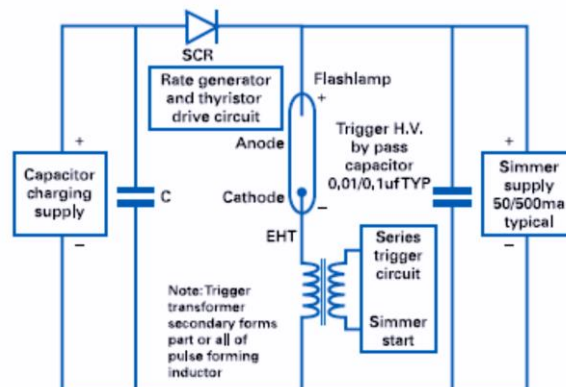
همچنین در این روش هیچ ولتاژ بالایی در سطح خارجی لامپ وجود ندارد که این امر مزیتی بزرگ نسبت به تریگر خارجی است [۴].  
[۷,۲]



شکل (۲): مدار راه انداز فلاش لامپ با روش تریگر سری [۳]

در این روش‌ها (تریگر سری و خارجی) پس از اعمال تریگر و صفر شدن جریان اصلی، امپدانس لامپ پس از گذشت زمان باز یابی دومرتبه به مقدار زیاد بر می‌گردد. در این طرح‌ها، فلاش لامپ به‌مانند یک کلید ولتاژ بالا عمل می‌کند که کنترل آن توسط پالس تریگر انجام می‌شود؛ بنابراین در این طرح‌ها با هر بار اعمال پالس ولتاژ بالا یک عمل تخلیه و دمش محیط فعال انجام می‌شود. باید توجه داشت فاصله بین پالس‌های تریگر به اندازه‌ای باشد که خازن فرصت شارژ شدن توسط CCPS تا ولتاژ مطلوب را داشته باشد در غیر این صورت انرژی خازن و به تبع آن انرژی دمش لامپ کاهش می‌یابد.

شکل (۳) یک طرح حرفه‌ای تر موسوم به مدار زیمر را نشان داده است [۳]. در روش زیمر با اعمال اولین پالس تریگر و یونیزه شدن گاز داخل لامپ، یک جریان دائم ضعیف (بسته به نوع و ابعاد لامپ بین ۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌آمپر متغیر است) از درون لامپ گذرانده می‌شود. این جریان باعث می‌شود تا گاز داخل لامپ همواره به حالت یونیزه باقی بماند و به این ترتیب امپدانس لامپ در مقادیر متوسط در حدود یک کیلو اهم نگه‌داشته شود. عمل تخلیه اصلی (تخلیه خازن درون لامپ) توسط یک کلید SCR صورت می‌پذیرد و دیگر نیازی به اعمال پالس‌های تریگر ولتاژ بالا نیست. بنابراین یک منبع تغذیه زیمر باید در ابتدا یک ولتاژ متوسط (در حدود یک کیلوولت) برای شروع کار فلاش لامپ تولید کرده که به الکترودهای دو سر آن اعمال کند و در ادامه با اعمال تریگر امپدانس لامپ را کاهش داده و پس از آن جریان کمی را در لامپ عبور داده که مانع از خاموش شدن لامپ می‌شود. استفاده از مدار زیمر در تحریک فلاش لامپ دارای مزایایی نظیر افزایش طول عمر لامپ و همچنین کاهش چشمگیر EMI<sup>11</sup> و RFI<sup>12</sup> است [۱۱-۸].



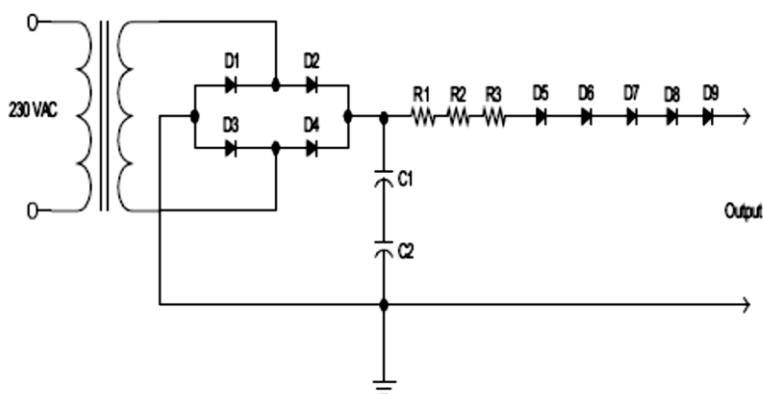
شکل (۳): اضافه کردن مدار زیمر به مدار راه انداز فلاش لامپ [۳]



از آنجایی که روش زیمر منجر به افزایش طول عمر لامپ می‌شود، معمولاً در ساخت لیزرهای با توان و نرخ تکرار بالا (که شامل اکثر لیزرهای حالت جامد صنعتی است) از این روش استفاده می‌کنند [۲، ۶، ۸، ۱۰، ۱۱]. در این روش در بخش تغذیه شارژ کننده خازنی، یک مدار تأخیر انداز در نظر گرفته می‌شود تا فرصت خاموش شدن کامل به تریستور داده شود و برای محافظت از تریستور استفاده از قطعات کمکی اجتناب‌ناپذیر است. در انتخاب تریستور مناسب بایستی تحمل‌پذیری این قطعه برای عبور جریان با قله و RMS بالا مدنظر قرار گرفته شود. از دیگر مزیت‌های روش زیمر این است که بازده دمش لیزر در چگالی جریان‌های پایین تا حدود ۲۰٪ افزایش پیدا می‌کند. همچنین این روش پایداری نوری خروجی پالس به پالس را نیز بهبود می‌بخشد [۲، ۴، ۱۱-۹].

تاکنون برای پیاده‌سازی منبع تغذیه زیمر آرایش‌های مختلفی ارائه شده است که به‌طور کلی به دو روش خطی و سوئیچینگ<sup>۱۳</sup> قابل طبقه‌بندی است [۱۱]. عمده‌ترین مشکل روش خطی زیاد بودن حجم و وزن منبع تغذیه است و از طرفی بازدهی این نوع منبع تغذیه کم هست. امروزه در اکثر لیزرهای صنعتی و پزشکی از منبع تغذیه زیمر با روش سوئیچینگ استفاده می‌شود [۱۴-۱۲].

شکل (۴) مداری متشکل از یک یکسو کننده تمام پل و یک مقاومت بالاست<sup>۱۴</sup> در [۱۵] معرفی شده است. مقاومت بالاست نه تنها توان تأمین شده به لامپ را تنظیم می‌کند؛ بلکه انرژی قوس الکتریکی (جریان عبوری از لامپ) را نیز محدود می‌کند. این ساختار ساده است، اما نقطه‌ضعف آن اتلاف توان در مقاومت و ریپل زیاد خروجی ناشی از فرکانس خط است.

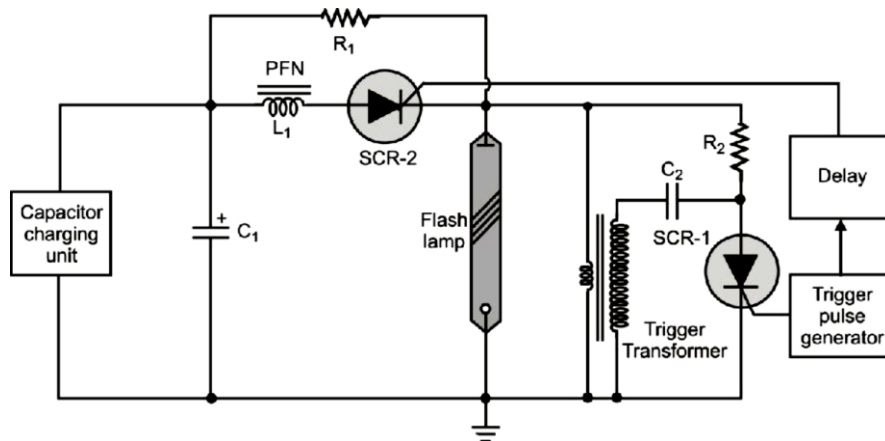


شکل (۴): مدار زیمر معرفی شده در [۱۵].

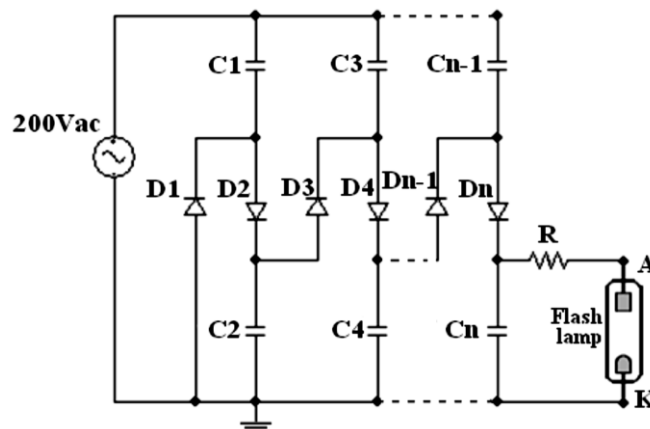
برای غلبه بر نقطه‌ضعف مدار معرفی شده در [۱۵]، یک مدار شبه زیمر<sup>۱۵</sup> با استفاده از یک مقاومت بالاست (R1) در کنار یک بانک خازنی (C1) در [۱۶] معرفی شد (مطابق با شکل (۵)). این مدار برای تأمین جریان کم مناسب است. ریپل خروجی کم است، اما وقتی اختلاف پتانسیل بین بانک خازنی و لامپ زیاد باشد، تلفات مقاومت بالاست زیاد است [۱۶]. در این روش نیز به‌طور مرسوم لامپ با یکی از روش‌های تریگر بیرونی و یا تریگر سری (با فرمان به تریستور SCR-1) یونیزه می‌شود. جریان ناشی از خازن ذخیره کننده انرژی ابتدا توسط مقاومت R1 به حدود ۵۰ میلی‌آمپر محدود می‌شود و بعد از تأخیر زمانی در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌ثانیه مقاومت R1 توسط تریستور SCR-2 اتصال کوتاه شده و تخلیه اصلی صورت می‌پذیرد.

در [۱۷] برای یونیزاسیون<sup>۱۶</sup> حالت پایدار گاز در داخل لامپ، مدار زیمر پیشنهادی توسط یک منبع تغذیه فلای‌بک<sup>۱۷</sup> با ۲۰۰ Vac و فرکانس خروجی ۶۴ کیلوهرتز تشکیل شده است که در شکل (۶) نشان داده شده است.

از آنجایی که ولتاژ خروجی برای فلاش لامپ کافی نیست، از یک طبقه مدار چند برابر کننده ولتاژ<sup>۱۸</sup> استفاده شده است. چند برابر کننده ولتاژ مورد استفاده از نوع چند برابر کننده ولتاژ کاکرافت-والتون<sup>۱۹</sup> است که در آن خازن‌ها یک اتصال مشترک دارند. اشکال اصلی این طرح در محدودیت جریان خروجی (۸ تا ۱۰ میلی‌آمپر) مدار زیمر است که برای فلاش لامپ‌های با اندازه کوچک مناسب است.



شکل (۵): مدار شبه زیمر معرفی شده در [۱۶].



شکل (۶): مدار زیمر معرفی شده در [۱۷].

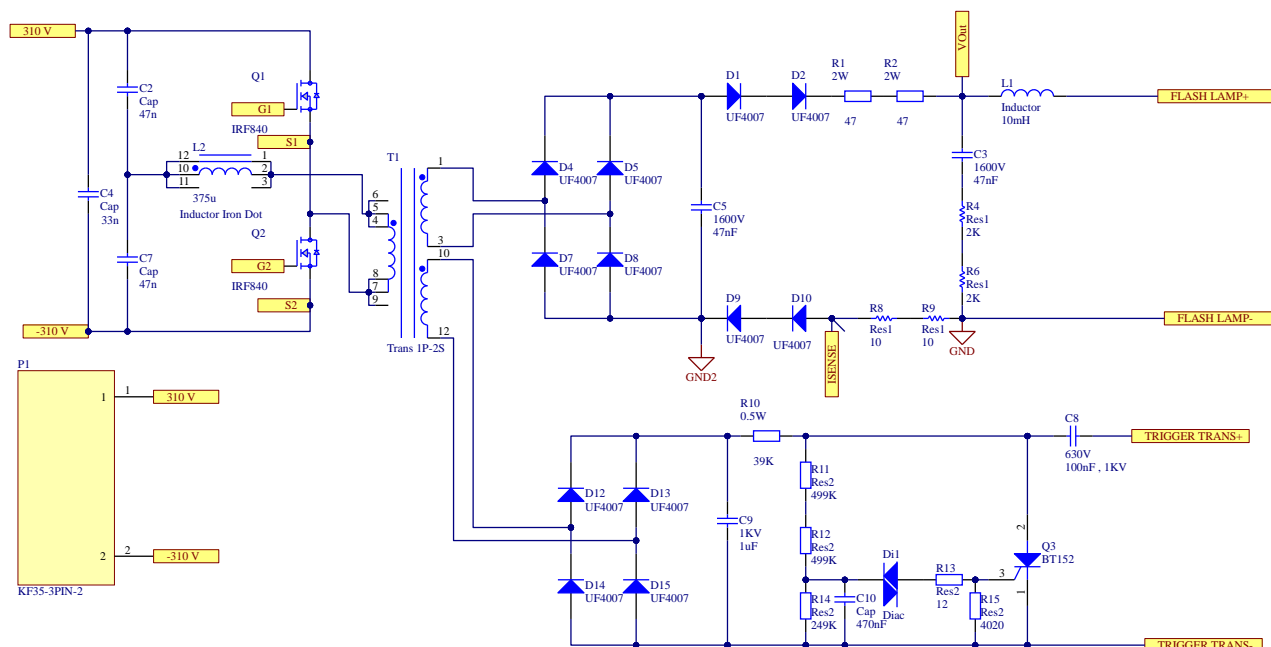
استفاده از مبدل‌های رزونانسی LCC برای مدار زیمر انتخاب دیگری است که طی سال‌های اخیر مورد توجه طراحان قرار گرفته است [۱۱]، [۱۸]. با وجود مزایای این نوع مبدل‌ها، نمی‌توان از نقاط ضعف آن‌ها چشم‌پوشی نمود. یک نقطه ضعف مبدل رزونانسی LCC محدودیت آن در بار کم است. از دیگر مشکلات این مبدل می‌توان به پیچیدگی روابط حاکم بر مدار و غیرخطی بودن معادلات جهت طراحی اشاره نمود.

در این مقاله طراحی و ساخت یک مدار زیمر به روش سوئیچینگ با استفاده از آرایش مبدل نیم پل<sup>۲۱</sup> برای اولین بار ارائه شده است. کنترل جریان فلاش لامپ توسط یک سلف اضافه شده به مدار مبدل نیم پل، قابل اجرا است. طرح پیشنهادی دارای سادگی در طراحی، کم حجم و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است و از نظر عملکرد دارای کارایی و جریان دهی خوب جهت راه‌اندازی فلاش لامپ است. مدار زیمر پیشنهادی شبیه‌سازی شده و پس از اطمینان از صحت عملکرد، به صورت آزمایشگاهی ساخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مدار عملی ساخته شده در این مقاله نشان داده شده است.

## ۲- عملکرد مدار پیشنهادی

شکل (۷) طرح شماتیک مدار زیمر پیشنهادی را نشان داده است. این مدار از یک مبدل سوئیچینگ نیم پل بهره برده است. ولتاژ یک سو شده برق شهر به مدار اعمال شده و توسط دو خازن C2 و C7 نصف می‌شود. اندوکتانس L2 به منظور محدود کردن حداکثر جریان لامپ در نظر گرفته شده است. ترانسفورمر T1 دارای دو ثانویه است که ثانویه اول برای تولید ولتاژ استارت لامپ و تأمین جریان زیمر و ثانویه دوم برای تولید ولتاژ تریگر لامپ در نظر گرفته شده است. دو خازن C3 و C5 به صورت هم‌زمان تا ولتاژ حدود ۱۰۰۰ ولت شارژ می‌شوند. مقاومت‌های R1, R2, R4 و R6 برای جلوگیری از تخلیه آنی و کامل این دو خازن در موقع کاهش امپدانس لامپ در اثر

تریگر در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی که لامپ در حالت زیمری دارای مقاومت منفی است، برای جلوگیری از افزایش بی‌اندازه جریان لامپ از اندوکتانس بالاست L1 استفاده شده است. هم‌زمان با شارژ خازن‌های C5 و C3، خازن C9 از طریق ثانویه دوم شارژ می‌شود (خازن C8 نیز از طریق سیم‌پیچ اولیه ترانسفورمر تریگر تا ولتاژی برابر ولتاژ خازن C9 شارژ می‌شود). ولتاژ دو سر این خازن توسط مقاومت‌های R11, R12, R14 تقسیم شده و به دیاک Di1 اعمال می‌شود. ولتاژ شکست این دیاک برابر 30V است که با رسیدن ولتاژ دو سر آن به ولتاژ شکست یک پالس تریگر به تریستور Q3 زده شده و خازن C8 در اولیه ترانسفورمر تریگر تخلیه شده باعث تریگر شدن لامپ می‌شود.



شکل (۷): طرح شماتیک مدار زیمر

### ۳- محاسبات مشخصات و طراحی المان‌های مدار پیشنهادی

با مراجعه به برگه اطلاعات فلاش لامپ، جریان زیمر توصیه شده برای فلاش لامپ در حدود 300mA (جریان زیمر لامپ‌ها بین 100 تا 120 میلی‌آمپر است) و ولتاژ لامپ بین 8V/cm تا 15V/cm است [۳]. با توجه به فلاش لامپ استفاده شده در این لیزر که دارای طول قوس 10cm است، انتظار می‌رود ولتاژ دوسر لامپ حداکثر در حدود 150V باشد. بنابراین توان متوسط تحویلی توسط مدار زیمر به لامپ در حدود 45W خواهد بود. از طرفی ولتاژ دو سر این لامپ بین 840V تا 2200V است. بنابراین ولتاژ حدود 1000V برای ولتاژ راه‌انداز لامپ کافی به نظر می‌رسد.

#### ۳-۱- طراحی ترانسفورمر T1

##### ۳-۱-۱- محاسبه نسبت دور ترانسفورمر

برای طراحی ترانسفورمر T1، فرکانس سوئیچینگ مبدل برابر 100KHz در نظر گرفته شده است. ولتاژ ورودی مدار از ولتاژ یک‌سو شده برق شهر تأمین شده است؛ بنابراین ولتاژ ورودی با در نظر گرفتن ده درصد افت برق شهر برابر 280V است. با توجه به نصف شدن ولتاژ روی اولیه ترانسفورمر حداقل نسبت دور موردنیاز از رابطه (۱) قابل محاسبه است [۱۹]:

$$\frac{N_{S1}}{N_p} = \frac{840}{140} = 6 \quad (1)$$





که در این رابطه تعداد دور سیم پیچ اولیه با نماد  $N_p$  و تعداد دور سیم پیچ ثانویه اول با نماد  $N_{s1}$  نشان داده شده است. نسبت دور ثانویه سیم پیچ مربوط به مدار تریگر از رابطه (۲) محاسبه شده است. با توجه به اطلاعات فنی ترانسفورمر تریگر انتخابی (TB2) که در ضمیمه الف آمده است [۳]، حداکثر ولتاژ اولیه برابر 600V است. (حداکثر ولتاژ ورودی با احتساب ده درصد افزایش ولتاژ برق شهر برابر ۳۴۲ V است.)

$$\frac{N_{s2}}{N_p} = \frac{600}{171} \approx 3.5 \quad (2)$$

که در این رابطه تعداد دور سیم پیچ اولیه با نماد  $N_p$  و تعداد دور سیم پیچ ثانویه دوم با نماد  $N_{s2}$  نشان داده شده است.

### ۳-۱-۲- انتخاب هسته و محاسبه تعداد دور سیم پیچ‌ها

با توجه به فرکانس کاری و توان و نوع هسته انتخابی (PQ) مطابق با ضمیمه ب، هسته PQ2016 مناسب است. ولی با توجه به انجام محاسبات اولیه، فضا برای سیم پیچی در این هسته کم است؛ لذا از هسته PQ2625 استفاده شده است. اطلاعات مربوط به انتخاب هسته در ضمیمه ب آورده شده است. برای محاسبه تعداد دور اولیه از رابطه (۳) استفاده شده است [۱۹].

$$N_p = \frac{V \times \Delta t}{A \times \Delta B} \quad (3)$$

با مراجعه به اطلاعات فنی مربوط به هسته PQ2625 از شرکت چینی با ماده TY40، چگالی شار اشباع در دمای  $C^\circ 100$  برابر  $390 \text{ mT}$  است [۲۰]. همچنین سطح مقطع مؤثر هسته نیز برابر  $1/18 \text{ Cm}^2$  است. بخشی از اطلاعات فنی مربوط به این هسته در جدول (۱) آورده شده است [۲۰]. با توجه به این داده‌ها، در حداقل ولتاژ ورودی و حداکثر ضریب وظیفه تعداد دور اولیه از رابطه (۴) محاسبه شده است.

$$N_p = \frac{V \times \Delta t}{A \times \Delta B} = \frac{140 \times 5 \times 10^{-6}}{1.18 \times 10^{-4} \times 0.39} \approx 15.2 \quad (4)$$

جدول (۱): مشخصات هسته فریت استفاده شده [۷]

Initial Permeability	$\mu_i$	25°C	2300±25%
Saturation Magnetic	Bs(mT)	25°C	510
Flux Density	1194A/m	100°C	390
Remanence	Br(mT)	25°C	100
		100°C	50
Coercivity	Hc(A/m)	25°C	14
		100°C	9
Core Loss	Pcv(KW/m <sup>3</sup> )	25°C	650
	100KHz	100°C	410
	200mT	120°C	500

جریان مؤثر سیم پیچی اولیه در شبیه‌سازی برابر  $0.7A$  به دست آمده است. با توجه به این مقدار و فرکانس کاری (100KHz) برای سیم پیچی اولیه ۱۵ دور از سیم لیتز<sup>۲۲</sup> با تعداد ۲۰ رشته و ضخامت هر رشته برابر  $0.1 \text{ mm}$  در دولاپه (با در نظر گرفتن فاصله خزشی 2mm) استفاده شد. محاسبه تعداد دور سیم پیچ‌های ثانویه به صورت رابطه (۵) انجام گرفته است [۱۹].





$$\begin{aligned} N_{S1} &= 6 \times 15 = 90, \\ N_{S2} &= 3.5 \times 15 = 52.5. \end{aligned} \quad (5)$$

### ۳-۲- محاسبه و طراحی سلف L2

برای طراحی سلف با استفاده از رابطه (۶) معروف به رابطه حاصل ضرب مساحت‌ها<sup>۳۳</sup> استفاده شده است [۲۲،۲۱].

$$A_p = \frac{L \times \hat{I} \times I_{RMS}}{K_{cu} \times J_{RMS} \times \hat{B}} \quad (6)$$

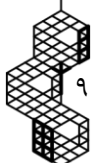
در این رابطه  $A_p$  حاصل ضرب سطح مقطع هسته در سطح بوبین سیم‌پیچی،  $L$  مقدار سلف مورد نیاز،  $\hat{I}$  دامنه جریان عبوری از سلف،  $I_{RMS}$  جریان مؤثر عبوری از سلف،  $K_{cu}$  ضریب پرشدگی سیم‌پیچی،  $J_{RMS}$  چگالی جریان سیم و  $\hat{B}$  حداکثر چگالی شار هسته است. مقدار  $K_{cu}$  در مراجع مختلف متفاوت عنوان شده است؛ ولی طبق تجربه عملی با توجه به عایق کاری و در نظر گرفتن فاصله خزشی مناسب مقدار آن بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ است. خزش<sup>۳۴</sup>، یک جریان هدایتی کوچک بین دو هادی از طریق یک سطح واسطه است و معمولاً تا وقتی منجر به شکست عایقی نشود مشکل‌ساز نخواهد بود. فاصله سطحی بین اتصالات فلزی دو طرف لایه‌های سیم‌پیچ از یکدیگر را فاصله خزشی می‌گویند و به میلی‌متر بیان می‌کنند. در صورت بروز قوس بر روی لایه‌ها، قوس تمامی فاصله خزشی را طی نموده و به طرف دیگر آن می‌رسد و هرچه مقدار این فاصله بیشتر باشد جریان نشتی (خزشی) کمتر است. برای داشتن مقدار سلف حداکثر  $\mu H$  ۳۰۰ و جریان حداکثر  $A$  ۱/۳۵ و جریان مؤثر  $A$  ۰/۷ و چگالی جریان  $A/mm^2$  ۳ و چگالی شار  $T$  ۰/۲۵ و با در نظر گرفتن مقدار ۰/۱ برای  $K_{cu}$  خواهیم داشت:

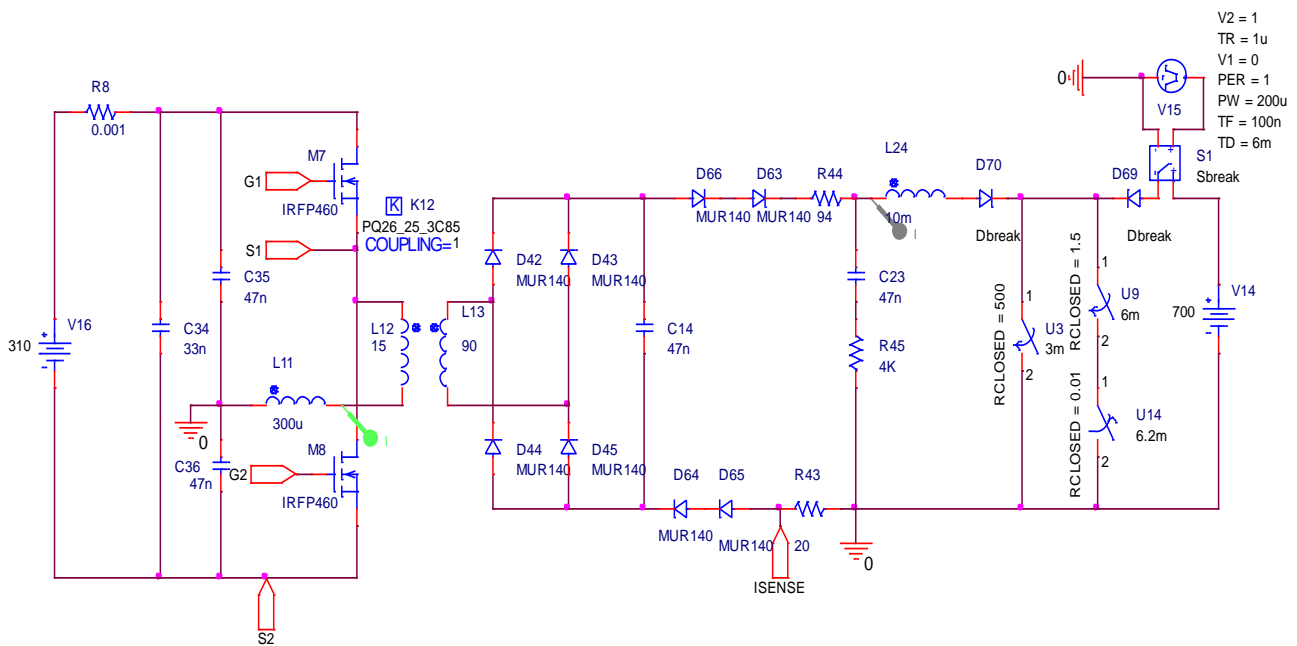
$$A_p = \frac{L \times \hat{I} \times I_{RMS}}{K_{cu} \times J_{RMS} \times \hat{B}} = \frac{300 \times 10^{-6} \times 1.35 \times 0.7}{0.1 \times 3 \times 0.25} = 0.378 cm^4 \quad (7)$$

هسته PQ2625 دارای  $A_p$  برابر  $592 \text{ Cm}^4$  بوده که مؤید انتخاب مناسب هسته برای ترانسفورمر است. از آنجاکه جریان این سلف با جریان اولیه ترانسفورمر برابر است در اینجا نیز از همان سیم لیتز با تعداد ۲۰ رشته و ضخامت هر رشته برابر  $0.1 \text{ mm}$  استفاده می‌شود. تعداد دوری که در بوبین این هسته جا می‌شود ۴۵ دور است. مقدار سلف با افزودن فاصله هوایی قابل تنظیم است [۲۲،۲۱].

### ۴- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور ارزیابی صحت عملکرد، مدار طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار PSPICE شبیه‌سازی شده است. از آنجایی که رفتار اмпدانس فلش لامپ کاملاً شناخته شده نیست (مخصوصاً رفتار مقاومت منفی آن) از یک مدل خطی تقریبی با استفاده از سوئیچ‌های باز و بسته شونده استفاده شده است. شکل (۸) مدار شبیه‌سازی شده را نشان داده است.





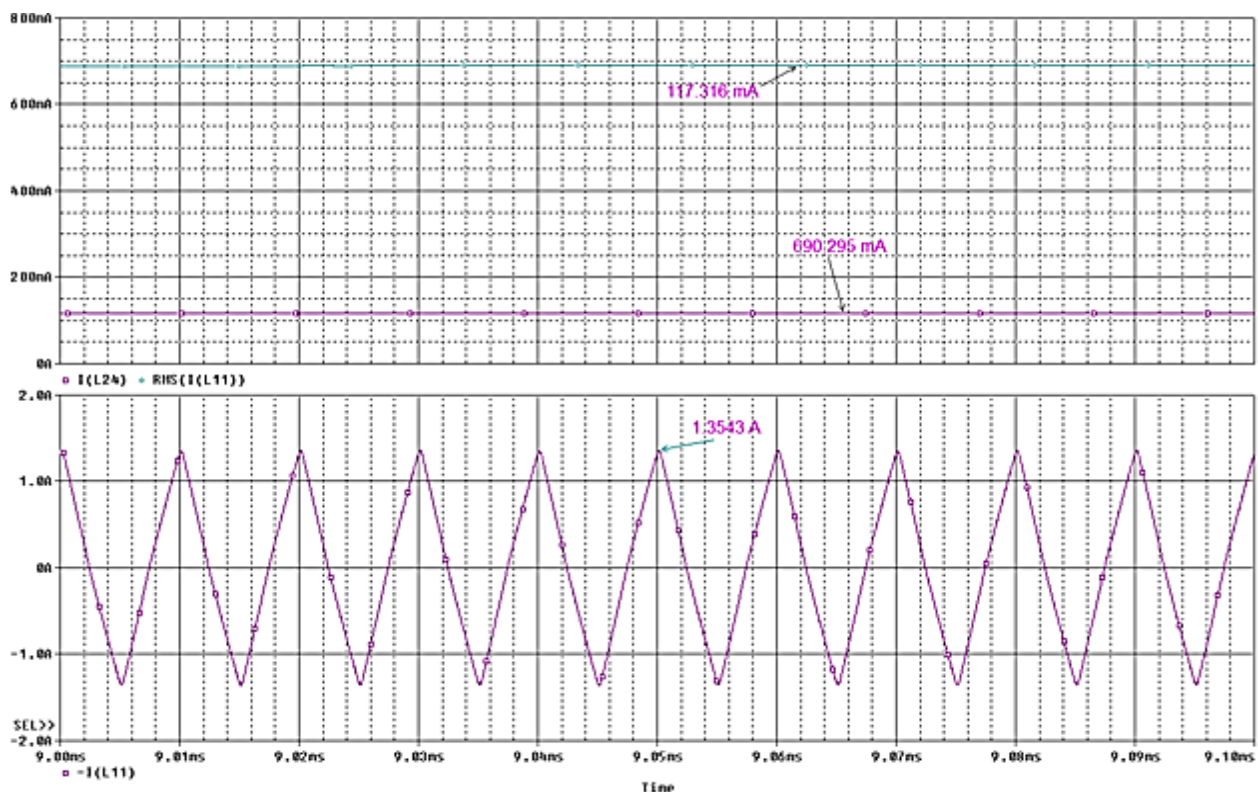
شکل (۸): مدار زیمر شبیه‌سازی شده

به منظور شبیه‌سازی عمل یونیزه شدن (تریگر) و کاهش امپدانس فلاش لامپ در زمان  $t=3\text{ms}$  سوئیچ U3 بسته شده که مقاومت بار ۵ کیلو اهم را معادل امپدانس فلاش لامپ به خروجی مدار زیمر اعمال می‌کند. از آنجا یک خازن خروجی منبع تغذیه شارژ کننده خازنی تا ولتاژ مشخصی (مثال ۷۰۰ ولت) شارژ شده و در این سطح ولتاژ تثبیت شده است، برای شبیه‌سازی خازن خروجی مدار شارژ کننده خازنی از یک منبع ولتاژ DC با مقدار ۷۰۰ ولت (V14) استفاده شده است. به منظور تخلیه خازن مدار شارژ کننده خازنی داخل فلاش لامپ (با مقاومتی ۵ کیلو اهم) از یک کلید ایده‌آل فرمان‌پذیر سری شده با یک عدد دیود در نقش تریستور تخلیه استفاده شده است. کلید فرمان‌پذیر S1 با فرکانس یک هرتز و پهنای پالس ۲۰۰ میکروثانیه (معادل پهنای پالس لیزر) روشن می‌شود. از آنجا یک هنگام تخلیه خازن مدار شارژ کننده خازنی (CCPS) داخل فلاش لامپ، جریانی با قله زیاد (حدود ۳۰۰ آمپر) از فلاش لامپ عبور می‌کند مقدار امپدانس لامپ نیز به شدت کاهش می‌یابد؛ لذا به منظور شبیه‌سازی این حالت از سوئیچ‌های U9 و U14 استفاده شده است. در زمان فرمان تخلیه  $t=6\text{ms}$  سوئیچ U9 بسته شده و با سوئیچ U14 به صورت سری مقاومت بسیار کم در حد ۱/۵ اهم را برای فلاش لامپ معادل سازی می‌کنند که این امپدانس فقط تا زمان  $t=6.2\text{ms}$  معادل پهنای پالس تخلیه که توسط کلید S1 تعیین شده است در خروجی مدار زیمر حضور دارد و پس از گذشت مدت زمان ۲۰۰ میکروثانیه، امپدانس لامپ با باز شدن سوئیچ U14 به مقدار قبل از تخلیه خازن مدار CCPS یعنی مقدار ۵ کیلو اهم برمی‌گردد.

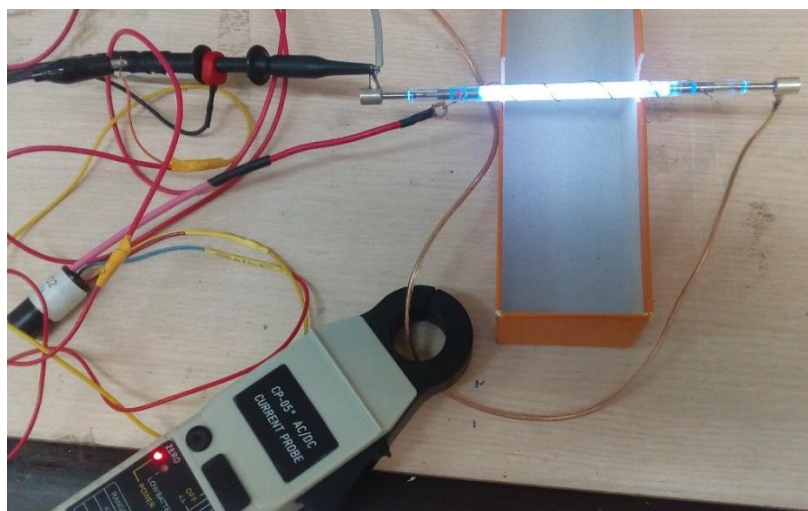
نتایج شبیه‌سازی در شکل (۹) آورده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، حداکثر جریان سلف برابر  $1/35\text{ A}$  و جریان مؤثر آن برابر  $70.5\text{ mA}$  است و جریان سلف خروجی که همان جریان فلاش لامپ است برابر  $117\text{ mA}$  است.

## ۵- نتایج عملی

پس از طراحی و شبیه‌سازی، یک نمونه مدار زیمر با طرح پیشنهادی ساخته شد. به منظور اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی و صحت عملکرد مدار زیمر ساخته شده خروجی آن به یک فلاش لامپ متصل شد. در شکل (۱۰) فلاش لامپ راه‌اندازی شده توسط مدار زیمر آزمایشگاهی با وجود پروب‌های ولتاژ و جریان نشان داده شده است. پروب جریان<sup>۲۵</sup> در مسیر برگشت جریان به مدار زیمر و پروب ولتاژ بالا به دو سر فلاش لامپ به صورت موازی متصل شده است.

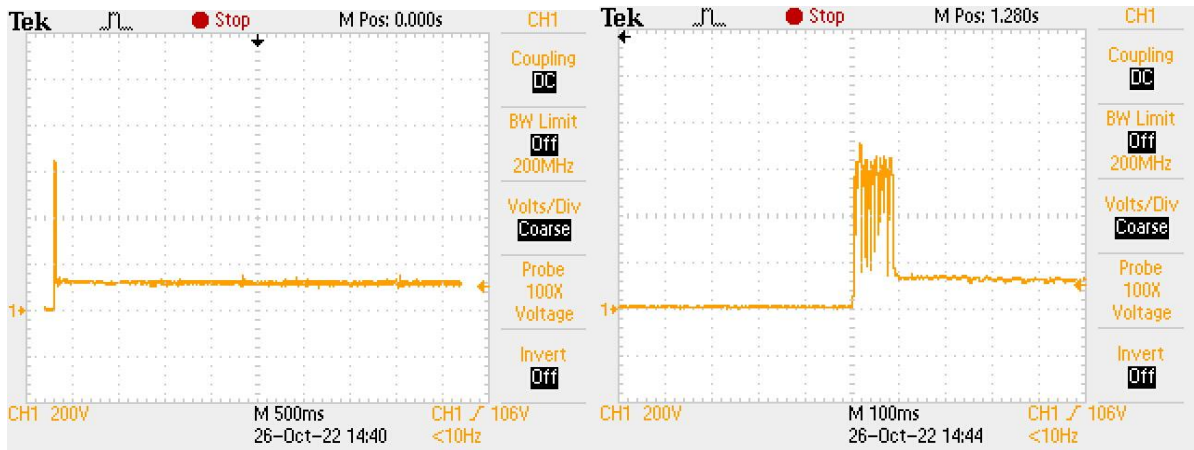


شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی مدار زیمر بدون مدار محدودکننده جریان



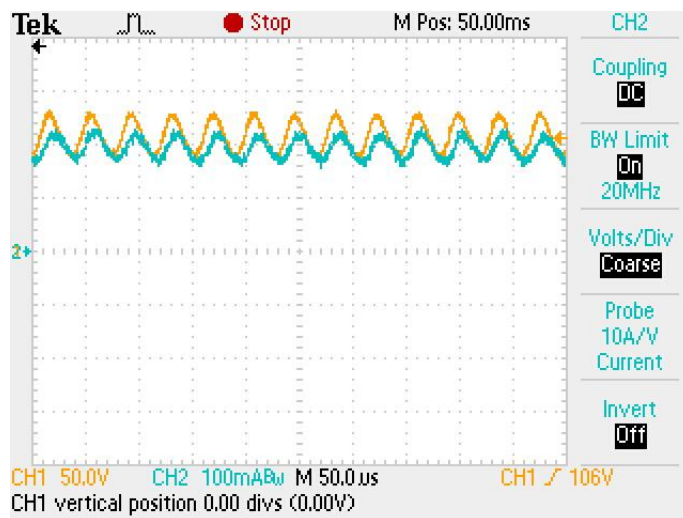
شکل (۱۰): فلاش لامپ راه‌اندازی شده توسط مدار زیمر ساخته شده

پس از راه‌اندازی فلاش لامپ، شکل موج‌های مربوط به آن توسط یک دستگاه اسیلوسکوپ<sup>۲۶</sup> دوکاناله تک‌ترونیکیس<sup>۲۷</sup>، پروب ولتاژ بالا با ضریب تضعیف ۱۰۰ و پروب جریان اندازه‌گیری و ثبت شد. شکل (۱۱) ولتاژ مربوط به دو سر فلاش لامپ راه‌اندازی شده را نشان داده است. همان‌طور که قابل مشاهده است ولتاژ قبل از تریگر و یونیزه شدن گاز داخل فلاش لامپ برابر ۶۰۰ ولت است و پس از مدت کوتاهی مقاومت لامپ کاهش یافته و ولتاژ خروجی مدار زیمر به ۱۲۰ ولت رسیده است.



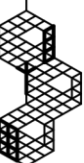
شکل (۱۱): ولتاژ فلاش لامپ راهاندازی قبل و بعد از راهاندازی توسط مدار زیمر ساخته شده (شکل سمت راست بزرگ‌نمایی شده است)

شکل (۱۲) شکل موج مربوط به جریان و ولتاژ خروجی مدار زیمر یا جریان عبوری از فلاش لامپ پس از تریگر شدن را نشان داده است. این شکل موج‌ها مربوط به حالت پایدار فلاش لامپ است و همان‌طور که قابل مشاهده است جریان عبوری از فلاش لامپ برابر ۲۰۰ میلی‌آمپر و ولتاژ اندازه‌گیری شده ۱۲۰ ولت را نشان می‌دهد؛ بنابراین توان تحویلی به فلاش لامپ توسط مدار زیمر ساخته شده برابر ۲۴ وات است. با توجه به توان دریافتی از ورودی مدار، بازده ۸۵ درصد به دست آمده است. این مدار در چیدمان آزمایشگاهی منبع تغذیه لیزر حالت جامد نئودیم یوگ<sup>۲۸</sup> مورد استفاده قرار گرفته و با موفقیت عمل نموده است.

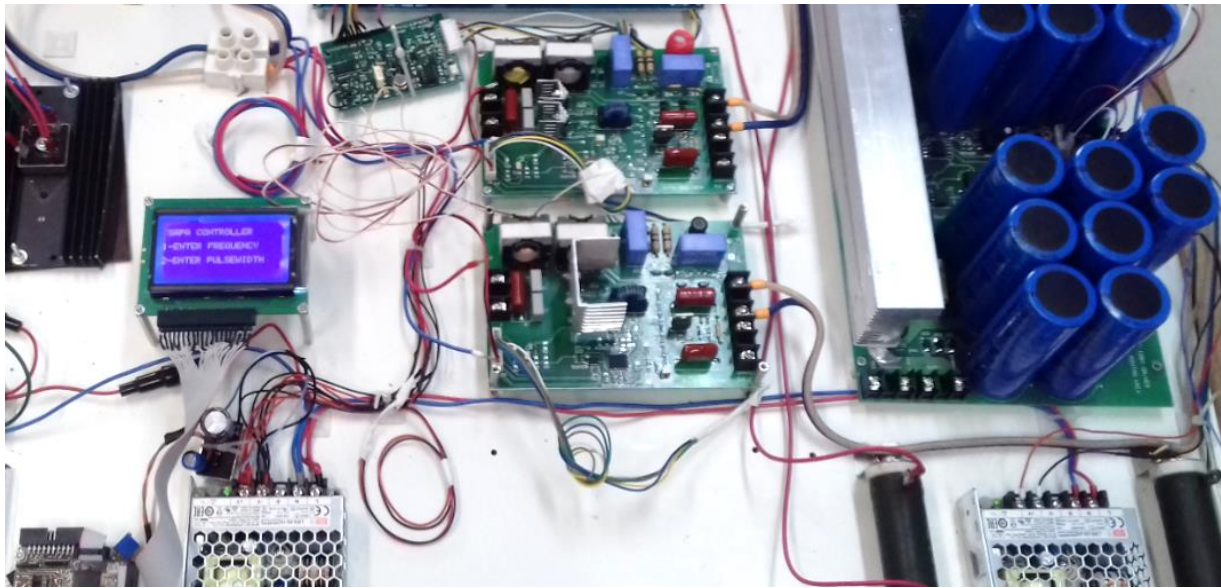


شکل (۱۲): شکل موج مربوط به جریان و ولتاژ خروجی مدار زیمر

مدار زیمر ساخته شده در منبع تغذیه لیزر حالت جامد بکار گرفته شده است. شکل (۱۳) تصویر مدار زیمر ساخته شده را نشان داده است.







شکل (۱۳): مدار زیمر ساخته شده

## ۶- نتیجه گیری

به طور کلی منبع تغذیه زیمر از دو بخش اصلی تشکیل شده است که شامل مدار تریگر و مدار زیمر است. وظیفه بخش تریگر تولید یک پالس ولتاژ متوسط در حدود ۶۰۰ ولت جهت اعمال به سیم پیچ اولیه ترانسفورمر تریگر است که پالس خروجی ثانویه این ترانسفورمر باعث یونیزه شدن گاز داخل فلاش لامپ می شود. پس از انجام یونیزاسیون گاز و کاهش امپدانس لامپ تولید یک جریان ضعیف در محدوده ۱۰۰ تا ۱۲۰ میلی آمپر و روشن نگه داشتن فلاش لامپ بر عهده بخش زیمر است. در این مقله یک مدار زیمر با روش سوئیچینگ جهت راه اندازی فلاش لامپ پیشنهاد شده است. این مدار با استفاده از یک سلف در آرایش مدار نیم پل جریان عبوری از فلاش لامپ را کنترل کرده است. مدار پیشنهادی به طور کامل طراحی و با استفاده از بسته نرم افزاری PSPICE شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی صحت طراحی و عملکرد مدار پیشنهادی را تأیید نموده است. در انتهای این مقاله نتایج مربوط به مدار ساخته شده اندازه گیری و گزارش شده است. مدار زیمر پیشنهادی با موفقیت عمل کرده و به خوبی فلاش لامپ را راه اندازی نموده است و موجب افزایش طول عمر، بازدهی بیشتر و کاهش تداخل الکتریکی و الکترومغناطیسی در لیزر حالت جامد شده است. باتوجه به عملکرد مدار زیمر که موجب روشن شدن فلاش لامپ به صورت پایدار می شود، در مقایسه با حالت تریگر سری و تریگر خارجی که لامپ پس از هر بار لیزر دهی خاموش شده و در چرخه بعدی بسته به فرکانس لیزر مجدداً روشن می شود، چون که تعداد روشن و خاموش شدن لامپ در حالت زیمر به طور کامل حذف می شود و در نتیجه طول عمر فلاش لامپ در مقایسه با تریگر سری و خارجی افزایش خواهد یافت.

از طرفی در حالت تریگر سری و تریگر خارجی قبل از تخلیه خازن شارژ کننده خازنی به داخل فلاش لامپ به یک پالس ولتاژ بالا با دامنه ۲۰ کیلوولتی و پهنای پالس در حد چند میکروثانیه نیاز است که این پالس تقریباً سوزنی ولتاژ بالا همانند یک چشمه مولد نویز عمل کرده و باعث اختلال در عملکرد دیگر وسایل جنبی لیزر خواهد شد و این فرایند در هر بار که پالس نوری لیزر تولید می شود بایستی تکرار شود. در حالی که در روش زیمر تنها یک مرتبه به این پالس تریگر قوی نیازمند است و در نتیجه به طور چشمگیری موجب کاهش تداخل الکتریکی و الکترومغناطیسی در لیزر حالت جامد می شود.



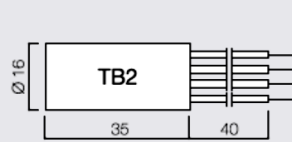
## ضمیمه الف

## مشخصات فنی ترانسفورمر تریگر مدل TB2

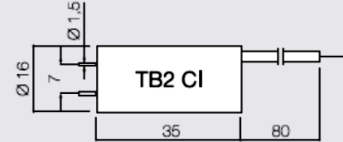
**TB2 / TB2 CI** (Output pins for soft soldering on elec. cards)

Max. Primary Voltage : 600 V  
 Max. Secondary Voltage : 22 kV  
 Max. peak current on primary : 20 A (50  $\mu$ s)  
 Average Power : 2,2 W

Discharge Capacitor : Min. 0,22  $\mu$ F  
 Max. 1  $\mu$ F  
 Typ. 0,47  $\mu$ F

**TB2**

Prim. : blue  
 yellow (earth)  
 Sec. : brown (HV)  
 black (earth)

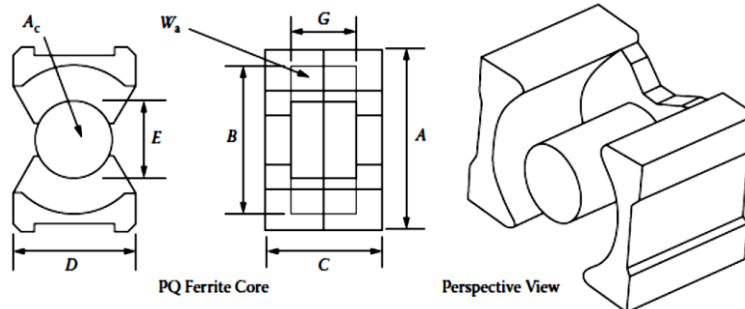
**TB2 CI**

Common (prim./sec.) : 1st plug (red mark)  
 Prim. : 2nd plug  
 Sec. : red wire (HV)

## ضمیمه ب

## مشخصات فنی هسته فریت PQ2625

مقدار  $A_L$  برای نفوذپذیری 1K نرمالیزه شده است. برای تقریب نزدیک  $A_L$  در مقادیر دیگر نفوذپذیری، مقدار نرمالیزه  $A_L$  را در نفوذپذیری جدید با واحد kilo-perm ضرب کنید. اگر نفوذپذیری جدید 2500 است، پس عدد 2/5 را استفاده کنید.



PQ, Ferrite Cores (TDK)												
Part No.	$W_{\text{leg}}$ grams	$W_{\text{ifc}}$ grams	MLT cm	MPL cm	$W_1$		$A_c$ cm <sup>2</sup>	$W_2$ cm <sup>2</sup>	$A_p$ cm <sup>4</sup>	$K_g$ cm <sup>5</sup>	$A_l$ cm <sup>2</sup>	*AL mh/1K
					$A_c$	$A_c$						
PQ20/16	7.4	13.0	4.4	3.74	0.765	0.620	0.620	0.474	0.294	0.0166	16.9	1617
PQ20/20	10.4	15.0	4.4	4.54	1.061	0.620	0.658	0.408	0.0230	19.7	1313	
PQ26/20	31.0	31.0	5.6	4.63	0.508	1.190	0.604	0.719	0.0611	28.4	2571	
PQ26/25	17.0	36.0	5.7	5.55	0.716	1.180	0.845	0.997	0.0826	32.6	2187	
PQ32/20	18.9	42.0	6.6	5.55	0.475	1.700	0.808	1.374	0.1415	36.3	3046	
PQ32/30	35.5	55.0	6.7	7.46	0.929	1.610	1.496	2.409	0.2315	46.9	2142	
PQ35/35	59.0	73.0	7.5	8.79	1.126	1.960	2.206	4.324	0.4520	60.7	2025	
PQ40/40	97.2	95.0	8.4	10.20	1.622	2.010	3.260	6.553	0.6272	77.1	1792	
PQ50/50	158.5	195.0	10.3	11.30	1.321	3.280	4.332	14.209	1.8099	113.9	2800	

\* This AL value has been normalized for a permeability of 1K. For a close approximation of AL for other values of permeability, multiply this AL value by the new permeability in kilo-perm. If the new permeability is 2500, then use 2.5.



- [1] W. Koechner, "Optical Pump Systems," in *Solid-State Laser Engineering*, Springer, 2013, pp. 281-392, doi: 10.1007/978-3-662-14105-2.
- [2] S. Ruoyan, L. Jianjun, W. Ruihua, L. Hairong, and L. Haibing, "Pulsed xenon lamp power supply," *High Power Laser and Particle Beams*, vol. 31, no. 02, pp. 100-120, Feb. 2019, doi: 10.11884/HPLPB201931.180331.
- [3] W.H. Rashid, B.R. Mhdi, N.A. Aljabar, and L.G. Abdulatif, "Experimental Investigation of Xenon Flash lamp Driving Circuit for Nd: YAG Laser," *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 501-508, Sept. 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.3297.0727.
- [4] S.H. Song, C.G. Cho, S.M. Park, H.I. Park, and H.J. Ryoo, "Comparative study of pulse trigger and DC trigger circuit for xenon flash lamp drivers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 2, pp. 397-404, Mar. 2019, doi: 10.1109/TDEI.2018.007726.
- [5] O. Chowdhury, Y. Sahu, S. Maskawade, M.S. Ansari, and P. Shahane, "Embedded control system for flash lamp pumped solid-state nd: Glass laser power supply," in *2018 IEEE Punecon*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/PUNECON.2018.8745373.
- [6] S.H. Song, C.G. Cho, S.M. Park, H.I. Park, and H.J. Ryoo, "Design and implementation of novel series trigger circuit for xenon flash lamp driver," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 46, no. 10, pp. 3584-3590, Oct. 2018, doi: 10.1109/TPS.2018.2842200.
- [7] C.G. Cho, Z. Jia, S.H. Song, J.B. Ahn, and H.J. Ryoo, "Integrated 15-kV DC Trigger and Simmer Power Supply for Light Sintering," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 10, pp. 4473-4480, Oct. 2019, doi: 10.1109/TPS.2019.2909639.
- [8] J. Zuo, and X. Lin, "High-Power Laser Systems," *Laser and Photonics Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 1-32, May 2022, doi: 10.1002/lpor.202100741.
- [9] R. Arya, J.M. Thomas, A.G. Bhujle, and D.D. Bhawalkar, "Effects of simmer current on flashlamp impedance and their combined influence on the output of a quasi-CW Nd:YAG laser," *IEEE journal of quantum electronics*, vol. 36, no. 7, pp. 872-878, Jul. 2000, doi: 10.1109/3.848361.
- [10] D. Liu, M. Ma, and Y. Zhang, "Research of pulsed Xenon lamp power supply based on STM32," *Journal of Physics*, vol. 1754, no. 1, pp. 120-160, Feb. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1754/1/012016.
- [11] S.H. Song, C.G. Cho, S.M. Park, H.I. Park, W.C. Jeong, and H.J. Ryoo, "Design and analysis of an LCC resonant converter for xenon flash lamp simmer circuit," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 2, pp. 484-491, Apr. 2019, doi: 10.1109/TDEI.2019.007696.
- [12] R. Perez, "A comparative assessment between linear and switching power supplies in portable electronic devices," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record*, 2000, pp. 839-843, doi: 10.1109/ISEMC.2000.874731.
- [13] M.N. Boukoberine, Z. Zhou, and M. Benbouzid, "A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects," *Applied Energy*, vol. 255, no. 1, pp. 1-23, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113823.
- [14] M. Vesali, H. Ranjbar, and A. Motamedi-Nasab, "A Two Input High Step Converter with Zero Current Switching Condition for Switches Turn-On Instances," *Technovations in Electrical Engineering and Green Energy System*, vol. 1, no. 2, pp. 63-76, Jul. 2022, doi: 10.30486/teees.2022.1960073.1017.
- [15] A. Demir, and M. Irfan, "Design and construction of holmium:yttrium aluminum garnet laser for lithotripsy applications," *Journal of Laser Applications*, vol. 33, no. 2, pp. 63-76, Apr. 2021, doi: 10.2351/7.0000270.
- [16] F. Almabouada, and D.A. Louhibi, "A simmer circuit for flash-lamp pumping of solid-state lasers," in *19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/PPC.2013.6627430.
- [17] F. Almabouada, D. Louhibi, A. Haddouche, A. Noukaz, and R. Beggar, "A new automated trigger circuit for a pulsed Nd: YAG laser," in *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*, 2010, pp. 559-566, doi: 10.1007/978-3-642-11628-5\_62.
- [18] J.B. Ahn, S.H. Song, and H.J. Ryoo, "Design and Implementation of 3-kW Simmer and 30-kV DC Trigger Power Supply System for Driving Xenon Flash Lamps in Large-Area Processes," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 11999-12008, Dec. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3128898.
- [19] R.L. Steigerwald, R.W. DeDoncker, and H. Kheraluwala, "A comparison of high-power DC-DC soft-switched converter topologies," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 32, no. 5, pp. 1139-



- 1145, Sept. 1996, doi: 10.1109/28.536876.
- [20] A. Verma, M.I. Alam, R. Chatterjee, T.C. Goel, and R.G. Mendiratta, "Development of a new soft ferrite core for power applications," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 300, no. 2, pp. 500-505, May 2006, doi: 10.1016/j.jmmm.2005.05.040.
- [21] G. Capua, and N. Femia, "A novel method to predict the real operation of ferrite inductors with moderate saturation in switching power supply applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2456-2464, Mar. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2438952.
- [22] J. Kaiser, and T. Dürbaum, "An overview of saturable inductors: Applications to power supplies," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 9, pp. 10766-10775, Sept. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3063411.

## زیر نویس ها

- 
- 1 Charge capacitor power supply (CCPS)
  - 2 Trigger
  - 3 Pulse forming network (PFN)
  - 4 Impedance
  - 5 Series trigger
  - 6 External trigger
  - 7 Silicon control rectifier (SCR)
  - 8 Transformer
  - 9 Cavity
  - 10 Inductance
  - 11 Electromagnetic interference (EMI)
  - 12 Radio-frequency interference (RFI)
  - 13 Switching
  - 14 Ballast resistor
  - 15 Pseudo simmer
  - 16 Ionization
  - 17 Flyback
  - 18 Voltage multiplier
  - 19 Cockcroft-Walton
  - 20 Resonance
  - 21 Half-bridge converter
  - 22 Litz
  - 23 Product of Areas
  - 24 Creepage
  - 25 Current prob
  - 26 Osilloscope
  - 27 Tektronix
  - 28 Neodymium yag (Nd:YAG)

