

# طراحی و ساخت یکسوساز کموتاسیون خط جریان بالا بر اساس تریستورهای موازی

مهدی شاهپرستی، محمد فرزی، منصور عارفیان، روزه اسد و مهدی شرعی‌پور

بهره‌برداری است و باید از طریق یکسوساز ۱۲ پالسه تغذیه شود. مطابق شکل ۱ هر مبدل تریستوری سه فاز ۶ پالسه از شش ولو ساخته می‌شود. بزرگ‌ترین چالش پیش روی ساخت این ولو جریان بالا با استفاده از تریستورهای موازی، تقسیم یکسان جریان در دو حالت مانا (هدایت) و گذرا (لحظات خاموش شدن و روشن شدن) بین تریستورها می‌باشد. به طور کلی، عوامل برهم‌زننده تقسیم یکسان جریان بین تریستورهای موازی متنوع هستند [۱۱]. اختلاف مسیر آند مشترک به کاتد مشترک مهم‌ترین عامل تقسیم نامساوی جریان بین تریستورهاست [۱۲]. اختلاف مقاومت مسیر منجر به عبور جریان غیر یکسان مابین تریستورها در حالت مانا می‌گردد و اختلاف خاصیت خازنی و سلفی مسیر موجب جاری شدن جریان غیر یکسان بین تریستورها در حالت گذرا می‌شود. ساختار سخت‌افزار ولو، اتصالات باس‌بار و همچنین خنک‌سازی روی دقت موازی‌سازی تأثیرگذار است اما اهمیت آن از دو مورد قبل کمتر می‌باشد. پارامترهای یکسان تریستورها و طرز درآیو کردن آنها عاملی تأثیرگذار در تقسیم مساوی جریان است. برای تضمین تقسیم یکسان جریان در تریستورهای موازی روش‌های فعال و غیر فعال در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳]. روش غیر فعال، یک روش سخت‌افزاری در یکسان‌سازی جریان‌های تریستورها است که یک مقاومت و سلف با نیمه‌هادی‌ها سری می‌شود که تأثیر مطلوبی در کاستن از عدم تعادل جریان‌ها دارد. عیب اصلی این روش حجیم شدن قابل ملاحظه مدار قدرت و افزایش تلفات الکتریکی و هزینه‌های مربوط است. روش‌های فعال متعادل‌سازی جریان تریستورهای موازی، یک روش کنترلی برای حذف عدم یکسانی جریان در حالت گذرا و مانا است [۱۴]. برخی از روش‌های ممکن عبارتند از (۱) با تنظیم تأخیر گیت درآیوها و یا افزایش قدرت آنان می‌توان روشن شدن هم‌زمان و در نتیجه یکسان‌سازی جریان در حالت گذرا را تا حدودی تأمین کرد. (۲) با فیدبک‌گرفتن از ولتاژ فیوز و یا دمای تریستورها و خاموش کردن تریستورهای با جریان و دمای بالاتر به صورت موقتی، جریان متوسط کل تریستورها برابر می‌گردد.

در [۱۵] نتایج، تست موفقیت‌آمیز روش پرش آتش در نیروگاه Mc Donough در پل‌های یکسوسازی تریستوری مورد استفاده در تحریک ژنراتور سنکرون را نشان می‌دهد. اما نویسندگان هیچ گونه اطلاعاتی راجع به چگونگی پیاده‌سازی این روش ارائه نکرده‌اند و فقط نتایج ارائه شده‌اند. در [۱۶] از ۸ تریستور توان بالای موازی یک ولو ۳۵ کیلوآمپری ساخته شده است. سازه ولو برای داشتن حداکثر تقارن به صورت دیسکی (استوانه‌ای) است و با این عمل اندوکتانس‌ها و مقاومت‌های شاخه‌های تریستوری برابر خواهند بود. در [۱۷] ایده جدیدی برای یکسان‌سازی جریان تریستورهای موازی در مبدل‌های پل تریستوری موازی تغذیه‌کننده SMES پیشنهاد شده که به جای عدم روشن کردن یک تریستور در کل یک بازه هدایتی، در یک یا چند بازه هدایتی (بسته به میزان عدم تعادل جریان آن) دیرتر پالس آتش را دریافت کند. البته این

چکیده: این مقاله روند طراحی و ساخت یک یکسوساز جریان بالا از نوع کموتاسیون خط را ارائه می‌کند که در آن از شش ولو جریان بالا بهره گرفته شده و هر ولو از طریق موازی‌سازی چهارهای تریستوری موازی ساخته شده است. طراحی ساختار فیزیکی، چینش باس‌بارها و چیدمان تریستورهای موازی با استفاده از یک تکنیک ابتکاری چنان انجام شده که جریان به صورت مساوی بین آنها جاری شود. علاوه بر تمهیدات طراحی سخت‌افزاری و استفاده از روش‌های مرسوم در تحریک هم‌زمان و دقیق تریستورها، برای اطمینان از تقسیم جریان مساوی، یک تکنیک کنترلی جدید متکی بر اندازه‌گیری دمای هر یک از تریستورها و تصمیم‌گیری بر اساس آن، اقدام به آتش کردن آنها می‌نماید. در نهایت نتایج آزمایشگاهی یک یکسوساز نمونه ۱۷۰ ولتی - ۴۰۰۰ آمپری جهت تأیید طراحی‌ها ارائه شده است.

کلیدواژه: یکسوساز تریستوری جریان بالا، ولو تریستوری، موازی‌سازی تریستورها.

## ۱- مقدمه

در حال حاضر برای کنترل گشتاور موتورهای سنکرون سرعت متغیر از اتصال پشت به پشت یکسوساز کموتاسیون خط و اینورتر کموتاسیون بار استفاده می‌شود [۱] تا [۳] و هر دوی آنها در حقیقت یک مبدل تریستوری سه‌فاز ۶ پالسه هستند. جریان نامی این مبدل‌ها در حد چند کیلوآمپر است [۴] و [۵]. همچنین صنایع بزرگ مانند صنایع آلومینیوم‌سازی، کوره‌های قوس الکتریکی DC، کارخانجات روی، منیزیم و مس و سیستم‌های تحریک ژنراتورهای سنکرون به یکسوسازهایی با جریان‌های بسیار بالا نیاز دارند [۶] و [۷].

بدیهی است در ساختار یک یکسوساز جریان بالا استفاده از تک‌تریستور به دلیل در دسترس نبودن تریستور جریان بالا و ملاحظات قابلیت اطمینان غیر عملی است. بنابراین نیاز است ولوهای نیمه‌هادی با چندین تریستور موازی در این نوع از یکسوسازها استفاده شود [۸] و [۹]. البته تنها [۱۰] ایده استفاده از مبدل منبع جریان ۵ سطحی به جای موازی‌سازی تریستورها را مطرح کرده است اما این ساختار فقط به صورت اینورتر قابل

این مقاله در تاریخ ۴ مرداد ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۲۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

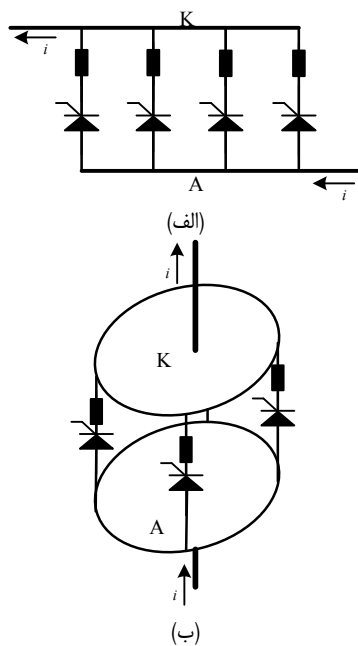
مهدی شاهپرستی، گروه مهندسی برق، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (email: mshahparasti@yahoo.com).

محمد فرزی (نویسنده مسئول)، گروه پژوهشی منابع تغذیه صنعتی، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، ایران، (email: mfarzi@jdevs.com).

منصور عارفیان، گروه پژوهشی منابع تغذیه صنعتی، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، ایران، (email: mnarefian@jdevs.com).

روزبه اسد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: asad@iust.ac.ir).

مهدی شرعی‌پور، مرکز مهندسی ترانسفورماتورهای خاص، جهاد دانشگاهی واحد علم و صنعت، تهران، ایران، (email: sharipur@gmail.com).

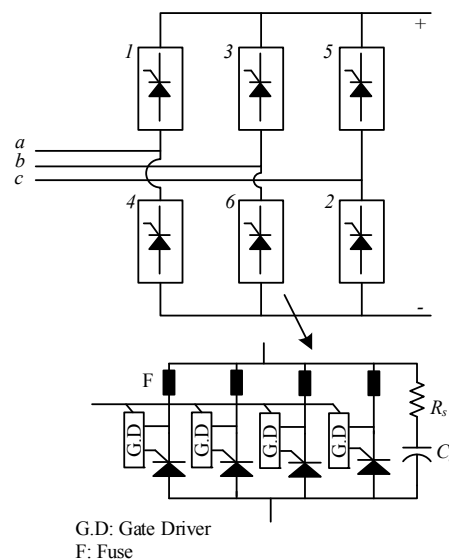


شکل ۲: چینش ترایستورهای موازی‌سازی بر روی هیت‌سینک، (الف) چینش غیر متقارن و (ب) چینش متقارن.

در زمان روشن شدن می‌گردد. علاوه بر تمهیدات اندیشیده شده برای اجتناب از شکل‌گیری اختلافات دمایی و جریانی بین ترایستورهای موازی، استفاده از فیوزهای سری با هر ترایستور هم با دو هدف حفاظتی و ایجاد فیدبک منفی در برابر افزایش جریان با هر ترایستور سری می‌شود.

باید اختلاف در دمای ترایستور و دمای مسیر و عناصر الحاقی (حفاظتی، اسنابری و مدار آتش) با طراحی سیستم خنک‌سازی مناسب برطرف شود. به بیان دیگر در هنگام موازی‌سازی ترایستورها، محدود کردن دما زیر یک مقدار مشخص توسط سیستم خنک‌سازی کافی نیست، بلکه سیستم خنک‌سازی باید نزدیک‌بودن دمای نیمه‌هادی‌های موازی و عناصر الحاقی آنها را تضمین نماید. یکی از اقدامات پیشنهادی، استفاده از هیت‌سینک<sup>۱</sup> مشترک جهت برای تمامی ترایستورهای هر ولو است. خاطر نشان می‌شود که مقاومت منفی ترایستور (کاهش ولتاژ دو سر ترایستور با افزایش دما) می‌تواند باعث بروز فیدبک مثبت شود. در حقیقت ترایستور با کشیدن جریان بیشتر، گرم‌تر شده که این مسئله باعث کاهش مقاومت داخلی ترایستور و در نتیجه افزایش هرچه بیشتر سهم جریان آن در مقایسه با سایر ترایستورهای موازی‌اش می‌گردد. این روند آن قدر ادامه می‌یابد تا ترایستور مذکور آسیب ببیند. خنک‌نشدن یکنواخت ترایستورها هم می‌تواند این پدیده را تشدید کرده و سوختن ترایستور را در پی داشته باشد. منحنی مشخصه ولتاژ-جریان ترایستورها با دما تغییر می‌کند. بنابراین در صورت عدم کنترل اختلاف دمای تمام ترایستورها در یک بازه دمایی کوچک، فرایند تطبیق، کمکی به نزدیک شدن جریان ترایستورهای موازی به هم نخواهد کرد. به همین دلیل حتی‌المقدور تمامی ترایستورهای موازی باید بر روی یک هیت‌سینک مشترک و در دمای کاری نزدیک به هم قرار گیرند.

در این مقاله با عنایت به بحث‌های انجام شده و با توجه به محدودیت‌های مکانیکی ساخت، یک یکسوساز مطابق شکل ۳ ساخته شده که در هر یک از شش ولو آن ۴ ترایستور موازی شده‌اند. ساختار ولو با جزئیات بیشتر در شکل ۴ ارائه شده که دارای خصوصیات ذیل می‌باشد:



شکل ۱: ساختار کلی یکسوساز کموتاسیون جریان خط با استفاده از چهار ترایستور موازی در هر ولو.

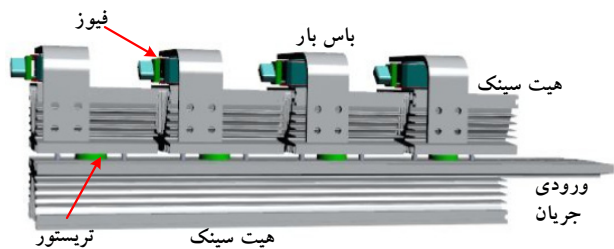
روش دارای یک مشکل است و آن احتمال عدم روشن شدن ترایستورهای دریافت‌کننده پالس آتش با تأخیر است. در [۱۸] یک شاخه از شش شاخه یک مبدل ترایستوری ac-dc با ۶ ترایستور موازی مورد بررسی قرار داده شده و با نتایج آزمایشگاهی نحوه تقسیم جریان آنها با هم مقایسه گردیده است.

در این مقاله روند طراحی و ساخت یکسوساز ۶پالسه ترایستوری ۱۷۰ ولتی- ۴۰۰۰ آمپری ارائه خواهد شد که در هر ولو آن مطابق شکل ۱، ۴ ترایستور با هم موازی شده‌اند. در بخش‌های دوم تا پنجم به ترتیب ساختار سخت‌افزاری ولو و یکسوساز، مدار اسنابری و راه‌انداز گیت تشریح خواهند شد و در نهایت در بخش ششم و هفتم نتایج آزمایشگاهی مبدل پیشنهادی و نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌شود.

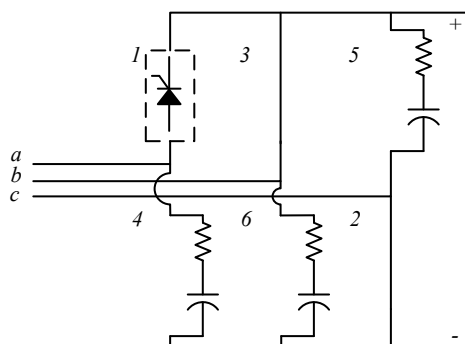
## ۲- ساختار یکسوساز و ولو

نحوه چینش ترایستورها و اتصالات باس‌بار روی موازی‌سازی تأثیرگذار است. باید توجه داشت که نه تنها خاصیت مقاومتی این اتصالات بلکه خاصیت سلفی و خازنی آن نیز در میزان سهم جریان ترایستورهای موازی مؤثر هستند. اتصالات را می‌توان به ۲ دسته متقارن و نامتقارن دسته‌بندی کرد. شکل ۲، دو روش رایج چینش ترایستورها در یک ولو را نشان می‌دهد. در شکل ۲-الف ترایستورها به صورت غیر متقارن چیده شده‌اند و مسیر میانی به دلیل شار نشستی بیشتر، اندوکتانس بیشتری خواهد داشت. در نتیجه، جریان ترایستورهای مسیر میانی در حالت گذرا کمتر از دو ترایستور دیگر خواهد بود. برای رفع این مشکل یا باید ترایستورها را به صورت متقارن چید و یا باید طول باس‌بار به نحوی تغییر کند که جریان به صورت مساوی بین آنها تقسیم شود. شکل ۲-ب از لحاظ تقارن، چینش سیلندری ترایستورها بهترین چینش است اما در عمل این نوع چینش باعث افزایش هزینه و پیچیدگی می‌شود و قابل استفاده برای ولوهای ولتاژ بالا نیست. در موازی‌سازی ترایستورها، افزودن مقاومت سری برای یکسان‌سازی جریان در حالت مانا و افزودن سلف سری برای یکسان‌سازی جریان در حالت گذرا کاربرد دارد. به دلیل ناچیز بودن سلف و مقاومت سوئیچ در برابر سلف و مقاومت سری اضافه‌شده، عملاً سلف و مقاومت اضافه‌شده غالب و تعیین‌کننده نحوه تقسیم سهم جریان بین سوئیچ‌ها خواهند بود. سلف سری در هر شاخه موجب بهبود توزیع جریان

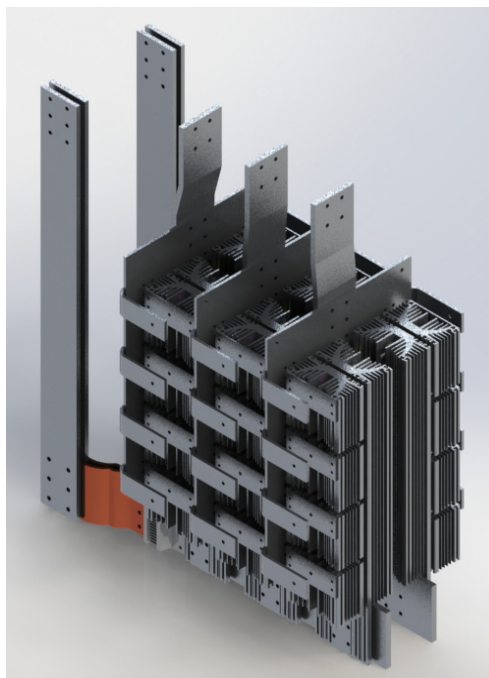
1. Heat Sink



شکل ۴: ساختار ولوی پیشنهادی متشکل از ۴ تریستور موازی.



شکل ۵: وضعیت ولوهای تریستوری و اسنابرها در لحظه خاموش شدن تریستور ۱.



شکل ۳: ساختار کلی یکسوساز تریستوری ۶پالسه جریان بالا.

افزایش دما) منجر به افزایش ولتاژ دو سر مجموعه تریستور و فیوز شده و افزایش جریان آن را محدود می‌سازد و به یکسانی جریان بین مسیرهای موازی کمک می‌کند. (۵) در طراحی راه‌انداز گیت ملاحظات لازم انجام شده تا جریان در حالات گذرا و ماندگار به صورت مساوی بین تریستورها تقسیم شود.

### ۳- طراحی مدار اسنابر

با توجه به محدودیت‌های ذاتی تریستور،  $dv/dt$  و  $di/dt$  آن باید کمتر از مقدار مندرج در جدول مشخصات فنی آن باشد و بنابراین باید از اسنابر برای محافظت تریستور استفاده کرد. در کاربردهایی نظیر سوئیچ‌های AC هر تریستور، اسنابر مربوط به خود را دارد که با سایر مدارات اسنابری در زمان خاموش شدن ارتباطی ندارد ولی در یک مدار پل یکسوساز ۶پالسه اسنابرها را نمی‌توان مستقل از هم در نظر گرفت. در شکل ۱، در زمان خاموش بودن تریستور ۱، تریستورهای ۲ و ۳ در حال هدایت هستند و در نتیجه اسنابرهایی RC آنها اتصال کوتاه شده‌اند اما تریستورهای ۴، ۵ و ۶ در حالت سدکنندگی قرار دارند و مدار اسنابر آنها روی فرایند خاموش شدن تریستور ۱ تأثیر می‌گذارند. در فرایند خاموش شدن می‌توان مشاهده کرد که اسنابرهایی تریستورهای ۵ و ۶ به صورت موازی قرار گرفته‌اند و حاصل این مدار موازی به صورت سری با مدار اسنابر تریستور ۴ قرار گرفته است. شکل ۵ به صورت دقیق‌تر این وضعیت را نشان می‌دهد. محاسبه ظرفیت خازنی و مقدار مقاومت معادل مدار به این نتیجه منتج می‌گردد که تریستور ۱ در زمان خاموش شدن، یک مدار RC شامل  $R_{eq}$  و  $C_{eq}$  با مقادیر زیر را می‌بیند

$$R_{eq} = \frac{3}{5} R_s \quad (1)$$

$$C_{eq} = \frac{5}{3} C_s$$

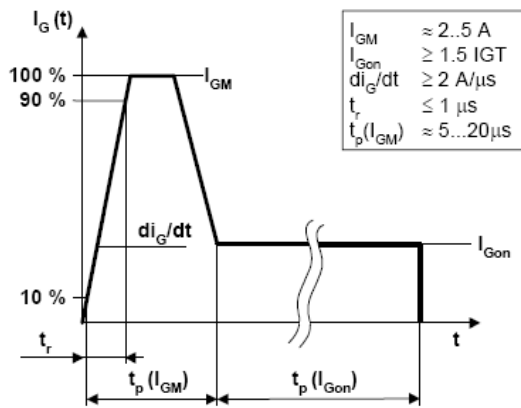
برای محاسبه اضافه ولتاژ پل ۶پالسه، باید مقادیر  $R_{eq}$  و  $C_{eq}$  در فرمول‌ها مورد استفاده قرار بگیرند و سپس با توجه به (۱) مقادیر  $C_s$  و  $R_s$  محاسبه شوند. در مبدل حاضر، یکسوساز از طریق یک ترانسفورماتور

(۱) اصلی‌ترین بخش ولو از یک هیت‌سینک مشترک تشکیل شده که در آن چهار تریستور جریان بالا با ساختار نامتقارن و ابتکاری به گونه‌ای با هم موازی شده‌اند که جریان ولو به صورت مساوی بین آنها تقسیم می‌شود. علاوه بر تمهیدات در نظر گرفته شده در طراحی اسنابرها و مدارات تحریک تریستورها، طراحی ساختار مکانیکی ولو نیز تقسیم جریان مساوی را تضمین می‌کند. نکات مهمی که در طراحی بخش مکانیکی مورد توجه بوده است عبارتند از یکسان بودن مسیرهای چهارگانه جریان از ورود تا خروج از ولو از نظر اهمی، سلفی و خازنی، مقاومت اهمی ناشی از فیوزهای سری با هر تریستور، اختلاف ناچیز دمایی ورودی و خروجی سیستم خنک‌ساز.

(۲) برای خنک‌سازی تریستورها از چرخش اجباری هوا استفاده شده که به نسبت خنک‌سازی با آب، کم‌هزینه‌تر است.

(۳) برای ارتباط بین تریستورها و فیوزها با باس‌بارهای ورودی و خروجی از باس‌بارهای لاتنی مسی (شینه‌های متشکل از ورق‌های نازک و چندلایه مسی) استفاده می‌شود. این شین‌ها از ورق‌های مسی بسیار نازک و منعطف ساخته شده‌اند و علاوه بر انعطاف‌پذیری بهتر و تنش‌های مکانیکی کمتر در برابر تغییرات جریان‌های لحظه‌ای می‌تواند منجر به کاهش اثر پوستی نیز شود. باس‌بارهای لاتنی این امکان را به سازنده می‌دهد که اختلافات طولی لازم بین مسیرهای موازی را با انتخاب طول‌های مختلفی از این شینه‌ها جبران کند. این تجهیز همچنین لرزش‌های مکانیکی را کاهش داده و آسیب‌دیدگی ولو از تکان‌های مکانیکی ناشی از تغییرات جریان الکتریکی را به حداقل می‌رساند.

(۴) برای محافظت تریستورها از فیوز استفاده شده است. این فیوزها علاوه بر نقش حفاظتی به عنوان تعدیل‌کننده اهمی سری با تریستور هم عمل می‌کنند به این ترتیب که با افزایش جریان تریستور جریان عبوری از فیوز سری با آن هم افزایش یافته و به علت مشخصه اهمی فیوز ولتاژ دو سر آن افزایش می‌یابد. این افزایش ولتاژ علاوه بر جبران افت ولتاژ آند و کاتد تریستور (به علت



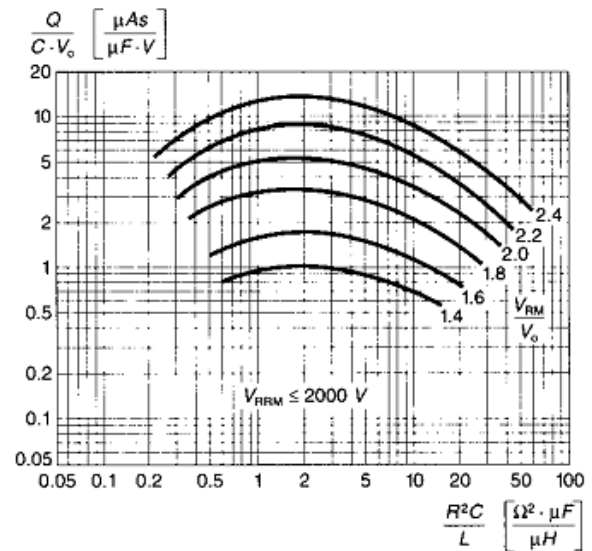
شکل ۷: شکل موج توصیه شده توسط شرکت سازنده تریستور برای جریان گیت [۲۱].

$$P_R = k_s C_s E_{eq}^2 f \xrightarrow{k_i = r \cdot \tau} P_R = \epsilon_r \tau \lambda W \quad (۶)$$

#### ۴- مدار راه انداز گیت

هدف اصلی یک مدار راه انداز گیت در یک تریستور تأمین دامنه مناسبی از جریان راه اندازی برای روشن کردن تریستور می باشد [۱۹]. یک تریستور همانند یک ترانزیستور دوقطبی توسط جریان روشن می شود، بنابراین مدار راه انداز تریستور که به گیت وصل می شود در اصل یک منبع جریان است که شکل موج های خاصی از جریان را در مسیر گیت تا کاتد به تریستور اعمال می کند. ولتاژ گیت- کاتد تابعی از شکل موج جریان اعمالی و امپدانس گیت- کاتد می باشد و بنابراین سازندگان تریستور نیز تنها شکل موج جریان مورد نیاز گیت را مشخص می کنند [۲۰]. برای هرچه کمتر کردن تأثیر  $di/dt$  جریان در حین روشن شدن تریستور، باید پالس راه انداز تریستور (جریان گیت) با دامنه کافی و با  $di/dt$  بالا به تریستور اعمال گردد. اعمال یک پالس قوی به گیت باعث می شود که گیت تقویتی و گیت اصلی تریستور به صورت یکنواخت راه اندازی گردند و ناحیه هادی تریستور به سرعت در کل سطح تریستور منتشر شده و تریستور بتواند به صورت ایمن جریان اولیه را انتقال دهد. علی رغم این که می توان تریستور را در شرایط استاتیکی با اعمال جریانی با دامنه  $I_{GT}$  به گیت، تریگر نمود ولی برای دستیابی به عملکرد مناسب تریستور در شرایط دینامیکی به جریانی با دامنه چندین برابر  $I_{GT}$  نیاز است. شکل موج پالس گیت مناسب برای تریگر تریستور به صورت شکل ۷ است.

بخش اول پالس گیت که توسط پارامترهای  $I_{GM}$ ،  $di_G/dt$ ،  $t_r$  و  $tp(I_{GM})$  مشخص می شود به صورت مؤثری در موارد زیر تأثیر گذار است: تأخیر زمان روشن شدن، زمان نزول ولتاژ آند در حین روشن شدن، انرژی تلفاتی در حین روشن شدن تریستور و  $di/dt$  بحرانی جریان آند در حین روشن شدن. دامنه بالای  $I_{GM}$  به همراه  $t_r$  پایین و  $di_G/dt$  بالا سبب بهبود کلیه موارد فوق می گردد. دامنه  $I_{GM}$  نباید از مقدار مشخص شده در برگه مشخصات فنی تریستور تجاوز نماید ولی با این حال حد بالایی برای مقدار  $di_G/dt$  وجود ندارد. به وسیله ولتاژ درایو و اندوکتانس اتصالات گیت و ولتاژ گیت تا کاتد تعیین می شود. مدت زمان فراجاهش  $(t_p(I_{GM}))$  باید در بازه فوق قرار داشته باشد. برای جریان هایی با  $di/dt \geq 20 \text{ A}/\mu\text{s}$  زمان فراجاهش ۵ میکروثانیه کافی است ولی برای جریان هایی با  $di/dt \leq 5 \text{ A}/\mu\text{s}$  نوعاً زمان ۲۰ میکروثانیه مورد نیاز است. برای جریان هایی با  $di/dt$  بسیار پایین، زمان نزول جریان  $I_{GM}$  نباید خیلی کم باشد زیرا ممکن است با افت جریان گیت در مدت زمان کوتاه، تریستور خاموش شود. به منظور دستیابی به یک پالس گیت مناسب و



شکل ۸: نمودارهای محاسبه اندازه مقاومت و خازن اسنابر.

سه فاز به شبکه وصل می شود و ولتاژ مؤثر ثانویه ترانسفورماتور ( $E_{eq}$ ) و سلف نشتی آن ( $L_{eq}$ ) به ترتیب ۱۷۰ ولت و ۹/۲ میکروهنری هستند.

$$\begin{aligned} L_{eq} &= 2L_T = 18.4 \mu\text{H} \\ E_{eq} &= 170 \times \sqrt{2} = 240.4 \end{aligned} \quad (۲)$$

نرخ کاهش جریان در حین خاموش شدن کل ( $di/dt$ ) برابر است با

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{E_{eq}}{L_{eq}} = \frac{240.4}{18.4} = 13.1 \text{ A}/\mu\text{s} \quad (۳)$$

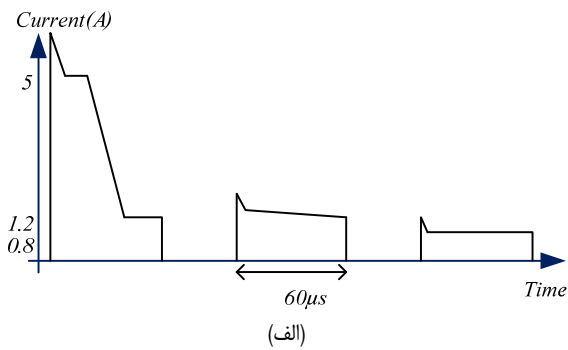
در صورتی که در انتخاب تریستور حاشیه امنیت بالایی در نظر گرفته شود، می توان برای محاسبه اضافه ولتاژ تنها مقدار  $Q_{rr}$  را در نظر گرفت و از نمودارهای شکل ۶ برای تعیین مقادیر  $R_s$  و  $C_s$  استفاده نمود. این نمودارها بر اساس داده های تجربی برای رنج وسیعی از عناصر نیمه هادی تولید شده اند. این منحنی ها را می توان بدین شرح مورد استفاده قرار داد: فرض می شود که ولتاژ معکوس پایدار  $V_R$  و اندوکتانس کموتاسیون  $L_{eq}$  مشخص هستند. بنابراین نسبت  $V_R/L_{eq}$  که مشخص کننده  $di/dt$  است تعیین می گردد و مقدار  $Q_{rr}$  از دیتاشیت قطعه بر اساس  $di/dt$  مشخص می شود. با دانستن  $V_{RM}/V_R$  دلخواه، مقدار حداقل  $C_s$  را می توان با خواندن  $Q_{rr}/(C_s \times V_R)$  از روی مقدار ماکسیمم منحنی مربوط در شکل ۶ به دست آورد. با تعیین  $C_s$  مقدار  $R_s \times C_s/L_{eq}$  که از روی محور افقی مشخص می شود، مقدار بهینه  $R_s$  را به دست خواهد داد

$$\begin{aligned} \frac{Q_{rr}}{C_{eq} V_R} = \gamma &\rightarrow C_{eq} = \frac{Q_{rr}}{\gamma V_R} = 1.19 \mu\text{F} \\ \frac{R_s^2 C_{eq}}{L_{eq}} = 2 &\rightarrow R_{eq} = \sqrt{\frac{2L_{eq}}{C_{eq}}} = 5.56 \Omega \end{aligned} \quad (۴)$$

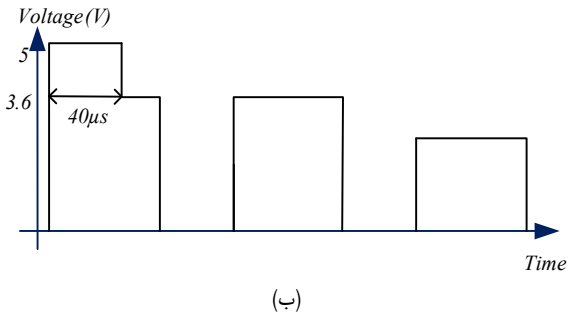
نهایتاً

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{5}{3} R_{eq} = 9.3 \Omega \cong 10 \Omega \\ C_s &= \frac{3}{5} C_{eq} = 0.715 \mu\text{F} \cong 0.68 \mu\text{F} \end{aligned} \quad (۵)$$

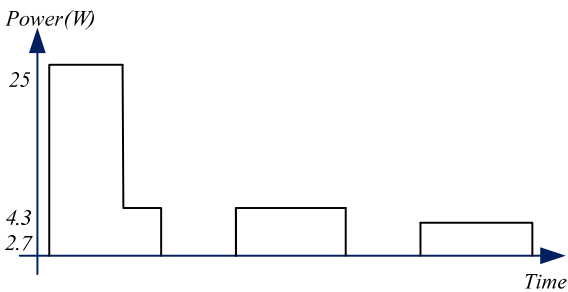
توان نامی مقاومت اسنابر مساوی است با



(الف)



(ب)



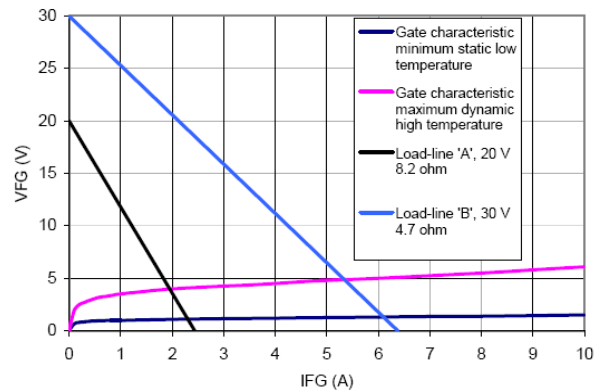
(ج)

شکل ۹: شکل موج‌های مربوط به گیت، (الف) جریان گیت، (ب) ولتاژ گیت به کاتد و (ج) توان مصرفی گیت.

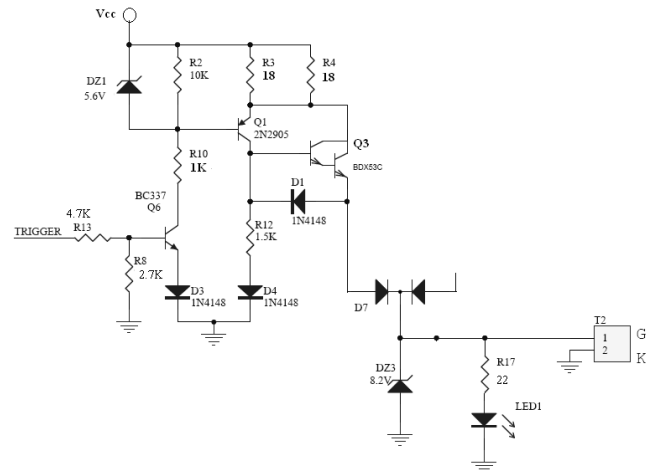
$I_{GM}$  که حدود ۵ آمپر است و دیگری جریان  $I_{GON}$  را تولید می‌کند. شکل ۱۰ منبع جریان مربوط به  $I_{GON}$  را نشان می‌دهد. در این مدار با دریافت فرمان تریگ ترانزیستور  $Q6$  روشن شده و باعث روشن شدن  $Q1$  و دیود زبر  $DZ1$  می‌گردد. با روشن شدن  $Q1$  جریان بیس ترانزیستور  $Q3$  نیز تأمین شده و این ترانزیستور نیز روشن می‌شود. جریان جاری شده در مقاومت‌های  $R3$  و  $R4$  توسط دیود  $DZ1$  در سطح ثابتی نگه داشته می‌شود. این جریان ثابت از طریق  $Q3$  و دیود  $DY$  به گیت وارد می‌گردد. دیود  $DY$  به‌منظور جلوگیری از بازگشت جریان به مدار و ایجاد اعوجاج در آن و دیود  $DZ3$  به‌منظور جلوگیری از افزایش بیش از حد ولتاژ گیت - کاتد قرار داده شده است. LED قرار داده شده در خروجی، در صورت سالم بودن بورد و تولید پالس گیت، روشن خواهد شد. جریان خروجی منبع جریان برابر است با

$$I = \frac{V_{DZ1} - V_{EBQ1}}{R_3 \parallel R_4} \quad (7)$$

منبع جریان مربوط به تأمین جریان  $I_{GON}$  مستقیماً از منبع ولتاژ مدار تغذیه می‌گردد ولی مطابق شکل ۱۱ منبع جریان مربوط به تأمین جریان  $I_{GM}$  از طریق یک مدار RC به منبع تغذیه متصل گردیده است. شکل ۱۱ مدار مربوط به این منبع را نشان می‌دهد. در این مدار، در مدت زمانی که سیگنال فرمان به مدار وارد نمی‌شود، خازن‌های  $C1$ ،  $C2$ ،  $C7$  و  $C10$  از طریق مقاومت  $R1$  شارژ شده و با دریافت فرمان تریگر منبع روشن شده و انرژی این خازن‌ها از طریق مقاومت پایین  $R5$ ،  $R6$ ،



شکل ۸: خط بار درایور گیت.



شکل ۱۰: منبع جریان مربوط به  $I_{GON}$ .

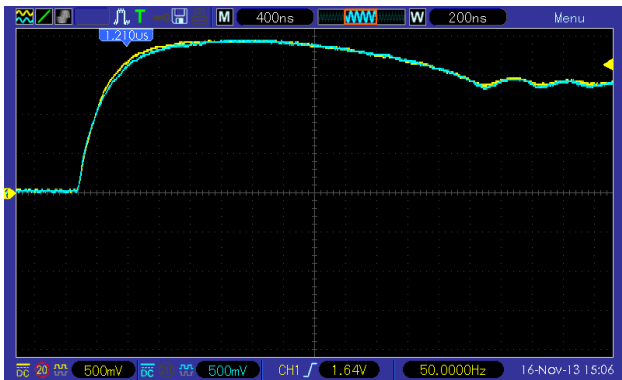
جلوگیری از ایجاد اعوجاج در جریان گیت، مدار راه‌انداز گیت باید با یک خط بار مناسب طراحی شود. مطابق شکل ۸ با کشیدن خط بار بر روی گراف مشخصه گیت، جریان گیت تعیین می‌گردد. خط بار A  $(20V/8.2\Omega)$  جریان گیت ۲ آمپر را تحت شرایط دینامیک نتیجه می‌دهد که برای کاربردهای معمولی قابل قبول است. خط بار B  $(30V/4.7\Omega)$  جریان گیت حدود ۵/۵ آمپر را در شرایط دینامیک نتیجه می‌دهد که استفاده از آن برای جریان‌هایی با  $di/dt$  بالا در کاربردهای سری‌سازی و موازی‌سازی توصیه می‌گردد.

در این مقاله، مدار درایور طراحی شده از نوع منبع جریان بوده و با دریافت فرمان، جریان مورد نیاز گیت را به آن تزریق می‌کند. مدار درایو دارای دو منبع جریان می‌باشد که به وسیله آنها سعی شده تا شکل موج جریان گیت پیشنهاد شده توسط شرکت سازنده ایجاد و به گیت اعمال گردد. مدار راه‌انداز گیت در اولین پالس به گیت، جریانی در محدوده ۴ تا ۵ آمپر اعمال می‌کند. در پالس دوم دامنه جریان در حدود ۱/۲ آمپر بوده و در سه پالس باقیمانده دامنه جریان در حدود ۸۰۰ میلی‌آمپر می‌باشد. شکل ۹ شکل موج جریان، ولتاژ و توان گیت را نشان می‌دهد. در پالس اول جریان در مدت زمان حدود ۱۰ میکروثانیه در محدوده ۴ تا ۵ آمپر باقیمانده و سپس به‌صورت نمایی به سمت صفر میل می‌کند تا در حدود زمان ۴۰ میکروثانیه پس از شروع پالس به مقدار ثابت حدود ۱/۲ آمپر می‌رسد. به‌منظور ساده‌سازی محاسبات فرض شده که در طی این ۴۰ میکروثانیه دامنه جریان ثابت باشد. شکل موج ولتاژ، جریان و توان مصرفی گیت در بدترین شرایط در این شکل نمایش داده شده است.

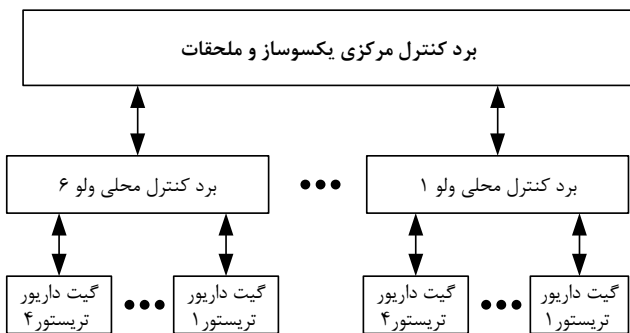
در مدار راه‌انداز گیت پیشنهادی، منابع جریان مذکور توسط ترانزیستورهای BJT پیاده‌سازی شده‌اند. یکی از این منابع جریان، جریان



شکل ۱۴: اختلاف زمانی دو بورد.



شکل ۱۵: مقایسه دامنه خروجی دو بورد.



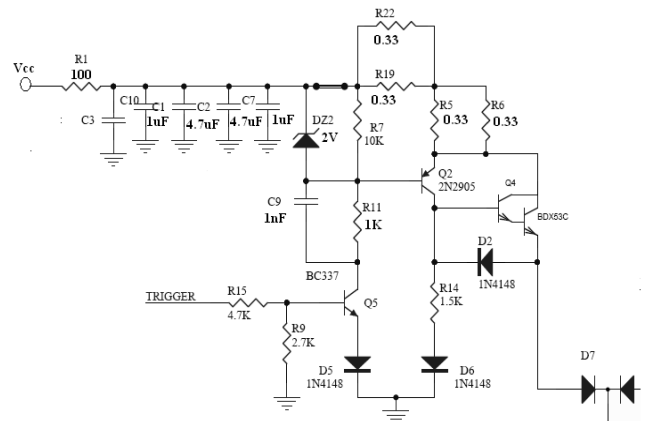
شکل ۱۶: طرحواره روش کنترل پیشنهادی برای یکسوساز.

ساخته شده هر یک به نوبت به یک تریستور متصل شده اند و هر بار جریان گیت اندازه گیری شده است. شکل ۱۴ جریان اعمالی هر یک از بوردها را به تریستور نشان می دهد که در آن اختلاف زمانی پاسخ دو بورد بسیار ناچیز می باشد. شکل ۱۵ پیک جریان دو بورد را نشان می دهد و همان گونه که مشخص است، خروجی هر دو بورد تقریباً با یکدیگر برابر است.

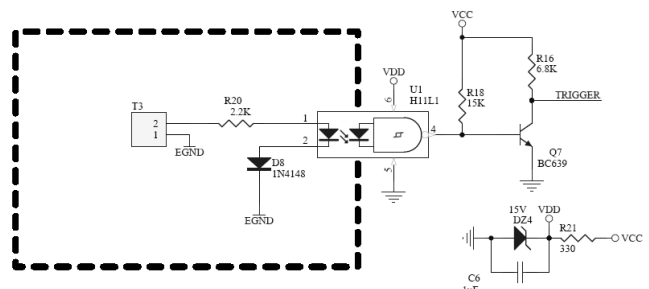
به منظور هر چه شبیه تر شدن شکل موج خروجی بوردها باید قطعات استفاده شده حداکثر تطابق را با یکدیگر داشته باشند، قطعات مشابه باید همگی ساخت یک سازنده بوده و تاریخ تولید یکسان باشند، در صورت امکان از خازن ها و مقاومتهای با تلورانس پایین استفاده گردد و ارسال فرمان برای بوردها باید به صورت هم زمان صورت گیرد.

### ۵- روش پیشنهادی برای بهبود تقسیم یکسان جریان

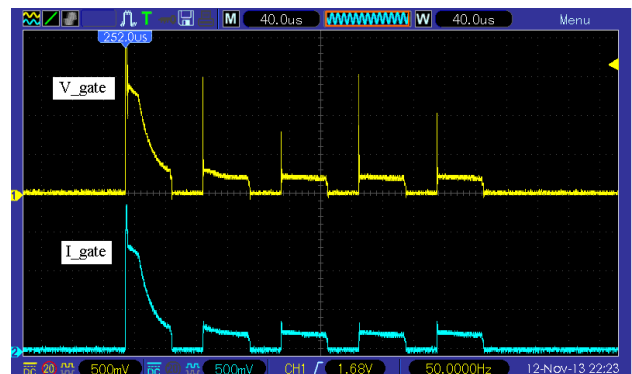
طرحواره روش کنترل پیشنهادی برای یکسوساز با تریستورهای موازی در شکل ۱۶ نمایش داده شده است که در آن برد کنترل مرکزی بر اساس ولتاژ خط و ولتاژ خروجی مرجع، زاویه آتش تریستورها را تعیین کرده و سیگنال های فرمان را به شش برد محلی کنترل ولو ارسال می کنند.



شکل ۱۱: منبع جریان  $I_{GM}$ .



شکل ۱۲: مدار ورودی فرمان.



شکل ۱۳: ولتاژ و جریان گیت تریستور.

$R_{19}$  و  $R_{23}$  در داخل گیت تخلیه می گردد. خازن های  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $C_7$  و  $C_{10}$  از نوع تانتالیوم و پلی استر انتخاب شده اند زیرا مقاومت داخلی آنها در مقایسه با خازن های الکتrolیتی بسیار کمتر است. مشاهده شد که با قراردادن خازن  $C_9$  نوسانات جریان گیت در حین عمل کردن این منبع کاهش می یابد.

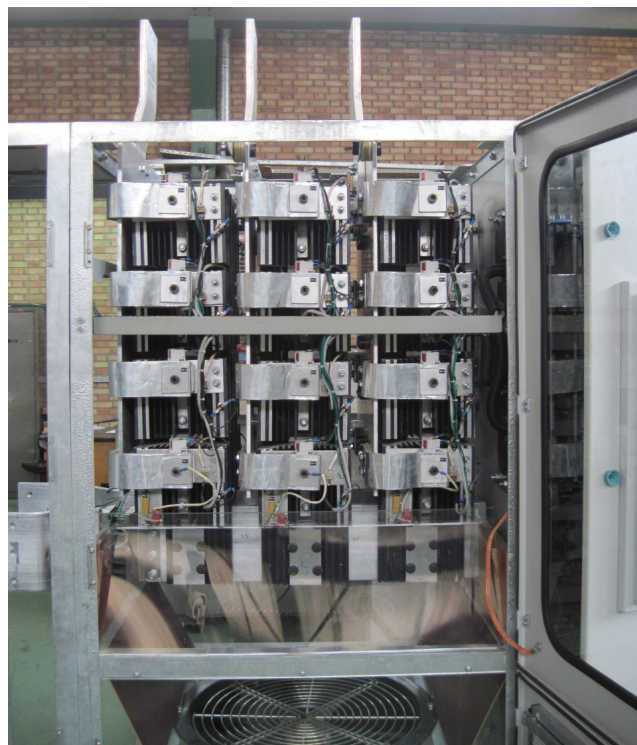
شکل ۱۲ مدار مربوط به ورودی فرمان را نشان می دهد. فرمان ورودی مدار از طریق یک اپتوکوپلر H11L1 وارد مدار می گردد و سپس توسط یک ترانزیستور BJT فرمان ورودی not می گردد. برای تغذیه IC اپتوکوپلر از یک دیود زبر ۱۵ولتی استفاده شده است.

تغذیه ادوات مدار توسط یک رگولاتور ۱۸ ولت تأمین می گردد. در صورت نیاز به پیک جریان بالاتر و یا نرخ افزایش جریان بالاتر، می توان این رگولاتور را bypass کرد و از ولتاژ ۲۴ ولت ورودی به صورت مستقیم استفاده نمود که البته در این صورت وضعیت قطعات مدار مورد بازبینی قرار می گیرد.

شکل ۱۳ ولتاژ و جریان گیت یک تریستور نوعی را نشان می دهد. در شکل موج ولتاژ هر خانه عمودی نمایشگر ۵۰۰ میلی ولت و در شکل موج جریان هر خانه عمودی نمایانگر ۲ آمپر است. بوردهای راه انداز گیت



شکل ۱۸: تصویر یکسوساز نهایی.



شکل ۱۷: تصویر ولو نهایی.

می‌باشند. تصاویر ولو نهایی و یکسوساز نهایی به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمایش داده شده است.

برای تست واقعی یکسوساز از اتو ترانسفورماتور برای تغذیه استفاده می‌شود. برای تأمین جریان خروجی بالا بدون نیاز به منبع AC ورودی توان بالا، خروجی یکسوساز اتصال کوتاه شده و با افزایش ولتاژ اتو ترانس جریان‌های مختلف از یکسوساز کشیده خواهد شد. نتایج تست یکسوساز پس از یک ساعت کار مداوم در جدول‌های ۱ و ۲ ذکر شده است. در جدول ۱ به ازای جریان ۳۱۶۰ آمپر در خروجی، برای ولوهای ۱، ۲، ۳ و ۵ انحراف تقسیم جریان حدود ۱۲ درصد و تنها در ۲ ولو دیگر مقدار انحراف تقسیم جریان بالای ۲۰ درصد است. متوسط انحراف تقسیم جریان در این تست ۱۶٫۶۷ درصد است. اگر جریان خروجی تا ۴۰۰۰ آمپر افزایش داده شود، آن گاه نتایج نشان داده شده در جدول ۲ حاصل خواهد شد. در این تست انحراف تقسیم جریان برای تریستورهای ۱ و ۳ کمتر از ۱۵ درصد و برای مابقی تریستورها بین ۲۲ تا ۲۸ درصد است.

در موازی‌سازی تریستورها در صنعت انحراف تقسیم جریان تا ۶۰٪ نیز گزارش شده است. در مقاله حاضر حداکثر انحراف تقسیم جریان تریستورها بعد از یک ساعت کار مداوم کمتر از ۳۰٪ است که نشان‌دهنده مؤثر بودن ساختار پیشنهادی برای ساخت ولو با تریستورهای موازی است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله روند طراحی و ساخت یک یکسوساز کموتاسیون خط ۴۰۰۰ آمپری ارائه شد که در هر ولو آن ۴ تریستور با هم موازی شده بودند. طراحی دقیق بخش‌های مختلف این مبدل اعم از ساختار مکانیکی ولو و چینش باس‌ها و تریستورهای موازی، انتخاب پارامترهای مدار اسنابر و همچنین راه‌انداز گیت ارائه شده‌اند. نتایج تست عملی راه‌انداز گیت نشان‌دهنده عملکرد مطلوب آن در تریگ تریستور با استفاده از قطار پالس با دامنه جریان کنترل‌شده بود. برای تقسیم جریان مساوی بین تریستورهای موازی، یک روش مؤثر بر پایه فیدبک دمای تریستورها

بردهای محلی این سیگنال را به گیت درایور تریستورها ارسال می‌کنند و هر گیت درایور اقدام به روشن یا خاموش کردن تریستور مربوط می‌نماید. از طرفی وضعیت هر تریستور توسط گیت درایور مربوط به صورت پیوسته چک شده و به برد محلی ارسال می‌شود و برد محلی بر اساس وضعیت تریستورها یک سیگنال برد مرکزی را ارسال می‌کند. برد مرکزی در صورت دریافت فرمان خطا از هر یک از بردهای محلی اقدام به خاموشی یکسوساز و نمایش خطا به کاربر می‌نماید.

در نمونه‌های کارشده در جهاد دانشگاهی علم و صنعت و قبل از اجرای این روش علی‌رغم این که تمامی روش‌های متعادل‌سازی جریان بین نیمه‌هادی‌ها استفاده شده بود، عمدتاً در ابتدای شروع کار دستگاه جریان بین نیمه‌هادی‌ها تقریباً یکسان بود ولی به مرور و با افزایش زمان کار دستگاه، اختلافات جریان به حدی می‌رسید که منجر به سوختن فیوزهای سری با تریستورها و تریپ سیستم می‌شد. در دستگاه آخر که موضوع این مقاله است برای تقسیم یکسان جریان بین تریستورهای موازی علاوه بر سایر روش‌های مرسوم از فیدبک دمای هر یک از تریستورها نیز استفاده شد. به این ترتیب که در نزدیک‌ترین نقطه به هر تریستور سنسورهای دمایی مناسبی بر روی هیت‌سینک نصب شدند تا دمایی همان تریستور و المان‌های الحاقی آن را اندازه‌گیری کنند. در مرحله بعد، دمایی همه تریستور به واحد کنترل مرکزی یکسوساز ارسال می‌شود و تجزیه و تحلیل می‌شود. ارسال فرمان آتش به تریستوری که دمایی آن بالاتر از حد مجاز قطع می‌شود تا دمایی آن به محدوده دمایی مجاز بازگردد.

در صورتی که دمایی بیش از دو تریستور در یک ولو از حد مجاز تخطی کند، کل مبدل تریپ خواهد خورد.

## ۶- مبدل نهایی و نتایج تست آزمایشگاهی

خروجی این مقاله یک یکسوساز جریان بالا است. در هر ولو ۴ عدد تریستور شماره ۲۱۴۰۰ STP شرکت ABB [۲۲] با رعایت دقیق تمامی ملزومات با یکدیگر موازی می‌شوند. هر یک از این تریستورها دارای ولتاژ در حدود ۱۴۰۰ ولت و جریان متوسط در حدود ۲۰۰۰ آمپر

current waveform for improved drive performance," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 997 - 1006, Feb. 2017.

- [11] M. D. Singh and K. B. Khanchandani, *Power Electronics*, McGraw-Hill, 2006.
- [12] W. P. Wilson, "A high-reliability solid-state ignitron replacement," *IEEE Trans. on Industry and General Applications*, vol. 4, no. 6, pp. 659-664, Nov. 1968.
- [13] I. A. Gibbs and D. S. Kimmel, "Active current balance between parallel thyristors in multi-bridge AC-DC rectifiers," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 16, no. 4, pp. 334-339, Dec. 2001.
- [14] A. L. Gattozzi, S. P. Pish, and J. A. Pappas, "Effect of converter packaging techniques on device electrical conduction," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 39, no. 1, pp. 418-421, Jan. 2003.
- [15] I. A. Gibbs, "Testing of active current balance in parallel thyristor bridges," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 481-484, Jun. 2005.
- [16] T. Ding, J. Wang, H. Ding, L. Li, B. Liu, and Y. Pan, "A 35 kA disc-shaped thyristor DC switch for batteries power supply of flat-top pulsed magnetic field," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, Article No. 5400404, Jun. 2012.
- [17] R. Kustom, J. Skiles, S. Akita, and H. Okada, "Experimental studies of current sharing in parallel driven Graetz bridge units for diurnal superconductive magnetic energy storage," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 21, no. 2, pp. 1119-1121, Mar. 1985.
- [18] R. Fuentes, "Current distribution in paralleled thyristors-a comparative analysis of 5 real cases in high current transformer-rectifiers," in *Proc. 39th IAS Annual Meeting Conf. Record of the IEEE Industry Applications Conf.*, vol.1, pp. 469-476, Seattle, WA, US, 3-7 Oct. 2004.
- [19] J. Waldmeyer, *Gate-Drive Recommendations for Phase Control Thyristors*, ABB, 2002.
- [20] SEMIKRON, *Application Manual Power Semiconductors*, 2011.
- [21] ABB Switzerland Ltd, *Application Note 5SYA 2034-02: Gate-Drive Recommendations for Phase Control and Bi-Directionally Controlled Thyristors*, 2013.
- [22] ABB Switzerland Ltd., *Phase Control Thyristor 5STP 21F1400*, Doc. No. 5SYA1023, 4 Jan. 2002. <https://library.e.abb.com/public/300261548b96749e83257c3100532760/5STP%2021F1400.pdf>

**مهدی شاهپرستی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق قدرت در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه بیرجند و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق می‌باشد. شایان ذکر است از سال ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۶ نام‌برده به عنوان کارشناس ارشد الکترونیک قدرت در جهاد دانشگاهی واحد علم و صنعت مشغول به کار بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: منابع تغذیه بدون وقفه، کنترل دور موتورهای الکتریکی و کاربرد الکترونیک قدرت در منابع تولید پراکنده..

**محمد فرزی** در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق الکترونیک خود را از دانشگاه علم و صنعت و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی خود را از همین دانشگاه دریافت نمود. از سال ۱۳۷۴ الی ۱۳۸۵ نام‌برده به عنوان کارشناس ارشد طراحی و تولید در جهاد دانشگاهی واحد علم و صنعت به کار مشغول بوده و از سال ۱۳۸۵ تا کنون به عنوان هیأت علمی و مدیر پروژه‌های پژوهشی متعدد فعالیت‌های علمی خود را در پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی دنبال کرده است و اینک نیز با عنوان مدیر گروه پژوهشی منابع تغذیه در این پژوهشکده مشغول فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده عمدتاً حوزه الکترونیک قدرت شامل موضوعاتی مانند مبدل‌های الکترونیک قدرت، کنترل دور موتورهای الکتریکی، سیستم رانش در قطارهای مترو، رکتیفایرهای جریان بالا، اینورترهای متصل به شبکه و... می‌باشد.

**منصور عارفیان** در سال ۱۳۷۲ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه فردوسی مشهد و در سال ۱۳۸۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه تحصیلات تکمیلی واحد جنوب تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۷۳ تا کنون به عنوان کارشناس فنی بخش طراحی منابع تغذیه خاص، مدیر فنی و مدیر مرکز خدمات تخصصی رکتیفایرهای صنعتی جهاد دانشگاهی فعالیت داشته است. مهندس عارفیان از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۹۲ نیز به عنوان مدیر گروه پژوهشی منابع تغذیه صنعتی در پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی مشغول به فعالیت بوده و اینک عضو هیأت علمی جهاد دانشگاهی و شورای علمی این پژوهشکده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان موضوعات مرتبط با طراحی و ساخت منابع تغذیه پر قدرت صنعتی مورد استفاده در صنایع مختلف از جمله نفت، گاز، پتروشیمی و صنایع معدنی می‌باشد.

جدول ۱: جریان پیک تریستورها به ازای جریان خروجی ۳۱۶۰ آمپر.

ولو تریستور	تریستور اول	تریستور دوم	تریستور سوم	تریستور چهارم	انحراف درصد
۱	۸۰۱	۸۵۱	۷۳۴	۸۰۲	۱۳,۷
۲	۷۶۰	۸۰۷	۸۱۹	۸۲۳	۷,۶
۳	۹۳۵	۸۷۰	۸۹۶	۸۲۴	۱۱,۸
۴	۹۹۶	۹۰۲	۷۴۵	۸۶۱	۲۵
۵	۷۸۶	۹۰۰	۸۴۴	۷۴۴	۱۲,۶
۶	۸۳۰	۶۵۶	۹۲۶	۹۲۴	۲۹

جدول ۲: جریان پیک تریستورها به ازای جریان خروجی ۴۰۰۰ آمپر.

ولو تریستور	تریستور اول	تریستور دوم	تریستور سوم	تریستور چهارم	انحراف درصد
۱	۱۰۳۵	۱۱۱۵	۹۷۰	۱۰۷۵	۱۳
۲	۸۷۵	۱۱۱۰	۱۱۲۴	۱۱۳۱	۲۲
۳	۱۱۷۰	۱۰۷۰	۱۰۸۰	۹۹۱	۱۵
۴	۱۲۶۷	۱۱۳۰	۹۰۸	۱۰۴۴	۲۸
۵	۱۰۰۰	۱۱۲۵	۱۰۵۰	۸۰۰	۲۸
۶	۱۰۶۰	۸۵۰	۱۱۵۵	۱۱۶۰	۲۶

معرفی شد. نتایج آزمایشگاهی این یکسوساز با جریان خروجی ۴۰۰۰ آمپری نشان می‌دهد که حداکثر انحراف پیک جریان تریستورها بعد از یک ساعت کار مداوم کمتر از ۳۰٪ است.

## مراجع

- [1] A. B. Plunkett and F. G. Turnbull, "Load-commutated inverter/synchronous motor drive without a shaft position sensor," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 15, no. 1, pp. 63-71, Jan. 1979.
- [2] A. K. Chattopadhyay, "High power high performance industrial AC drives-a technology status review," in *Proc. IEEE Region 10 and the 3rd Int. Conf. on Industrial and Information Systems, Kharagpur*, 2 pp., Kharagpur, India, 8-10 Dec. 2008.
- [3] A. Tassarolo, C. Bassi, G. Ferrari, D. Giulivo, R. Macuglia, and R. Menis, "Investigation into the high-frequency limits and performance of load commutated inverters for high-speed synchronous motor drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 6, pp. 2147-2157, Jun. 2013.
- [4] E. Espinosa, et al., "Finite control set model predictive control with reduced switching frequency applied to multi-cell rectifiers," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology, ICIT'15*, pp. 2261-2267, Seville, Spain, 17-19 Mar. 2015.
- [5] C. Richu Sebastian and P. P. Rajeevan, "A new scheme for SCR based current source inverter fed induction motor drive with open-end stator windings," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Power Electronics Drives and Energy Systems, PEDES'16*, 5 pp., Trivandrum, India, 14-17 Dec. 2016.
- [6] E. Fiorucci and G. Bucci, "A low-cost contactless transducer for the measurement of DC currents up to 13 kA for the industry of anodized aluminum," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 4, pp. 845-852, Apr. 2013.
- [7] M. Morati, D. Girod, F. Terrier, V. Peron, P. Poure, and S. Saadate, "Industrial 100-MVA EAF voltage flicker mitigation using VSC-based STATCOM with improved performance," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31, no. 6, pp. 2494-2501, Dec. 2016.
- [8] J. H. Galloway, "Cascading failures in large rectifiers or the myth of N-1," in *Record of Conf. Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conf.*, pp. 129-132, Denver, CO, US, 12-14 Sept. 2005.
- [9] H. Behjati and A. Davoudi, "Reliability analysis framework for structural redundancy in power semiconductors," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4376-4386, Oct. 2013.
- [10] S. Mohamadian, S. Castellani, A. Tassarolo, M. H. Khanzade, and A. Shoulaie, "A novel thyristor-based CSI topology with multilevel



**مهدی شرعی پور** از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۷۱ در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق الکترونیک در دانشگاه صنعتی شریف تحصیل نموده و از سال ۱۳۸۱ الی ۱۳۸۴ در دانشگاه تهران در مقطع کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی تحصیل کرده است. ایشان در ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته کنترل صنعتی از دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب اخذ نموده است. مهندس شرعی پور از سال ۱۳۷۵ تا کنون در زمینه طراحی و ساخت و راه اندازی سیستم های الکترونیک صنعتی و اتوماسیون صنعتی در بخش های نرم افزار و سخت افزار در مرکز خدمات تخصصی رکتیفایرهای صنعتی جهاد دانشگاهی فعالیت داشته است. زمینه های علمی مورد علاقه ایشان عبارتند از: اتوماسیون صنعتی و طراحی مدارات کنترل انواع رکتیفایرهای صنعتی.

**روزبه اسد مقاطع** کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی برق به ترتیب در سال های ۱۳۸۳، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۲ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رساند و هم اکنون عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی راه آهن دانشگاه علم و صنعت ایران است. نامبرده دو روش کنترل ولتاژ توزیع شده، یک روش پخش بار و یک روش تعیین قیمت نقطه ای نوین برای شبکه های توزیع و ریز شبکه های DC ارائه کرده و دو اختراع ملی در زمینه مبدل سیکلوکانورتر ثبت نموده است. او عضو گروه تحقیق و توسعه چندین پروژه صنعتی از جمله پروژه ملی سیستم کنترل دور موتورهای الکتریکی ولتاژ متوسط و توان بالا نیز بوده است. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده عبارتند از: سیستم های تغذیه راه آهن برقی، سیستم های توزیع و ریز شبکه های AC و DC، شبکه هوشمند، کنترل و دینامیک سیستم های قدرت الکتریکی، الکترونیک قدرت و سیستم کنترل دور و پایش وضعیت موتورهای الکتریکی.