فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵
صفحات ۵۲-۶۰
ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

سوئیچ HV-IGBT

محسن قربانعلی افجه، محمد فرزی، مهدی شاهپرستی

پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی

چکیده

هر چند که امروزه تحقیقات زیادی توسط واحدهای سازنده ادوات نیمه‌هادی برای ساخت نیمه‌هادی‌های با تحمل ولتاژ بالا در حال انجام است حداکثر ولتاژ قابل تحمل IGBT ها به ۶۵۰۰ ولت ارتقا یافته است. ولی بازهم بالا نیست و نیازمند سری‌سازی نیمه‌هادی‌ها خواهیم بود.مقاله حاضر برروی ساخت یک سویچ ولتاژ بالا با هدف که قابلیت کار در یک HVDC Light با ولتاژ لینک DC 20 کیلوولت می باشد.

واژه‌های کلیدی: HVDC Light ، سوئیچ HV-IGBT ، سری سازی سویچ های IGBT

۱- مقدمه

برای تشریح مشکل فنی می توان گفت هر چند که امروزه تحقیقات زیادی توسط واحدهای سازنده ادوات نیمه‌هادی برای ساخت نیمه‌هادی‌های با تحمل ولتاژ بالا در حال انجام است به عنوان مثال حداکثر ولتاژ قابل تحمل IGBT ها ظرف ۱۵ سال گذشته از ۱۲۰۰ ولت به ۶۵۰۰ ولت ارتقا یافته است. ولی بازهم ولتاژ یک نیمه هادی به حد کافی بالا نیست و در حال حاضر برای رسیدن به تجهیزاتی با عملکرد در ولتاژ بالاتر نیازمند سری‌سازی نیمه‌هادی‌ها خواهیم بود.

چند روش اجرایی برای بکارگیری آن می توان گفت با ساخت این ولو علاوه بر استفاده در پروژه خط انتقال توان DC (HVDC Light) امکان ساخت اینورترهای ولتاژ متوسط که قابل استفاده در حوزه‌های مختلف برق می‌باشد فراهم می‌گردد. از جمله می توان از آن برای ساخت کنترل دور موتورهای ولتاژ متوسط و ولتاژ بالا استفاده نمود.

۲- مشخصات کلی ولو نیمه‌هادی

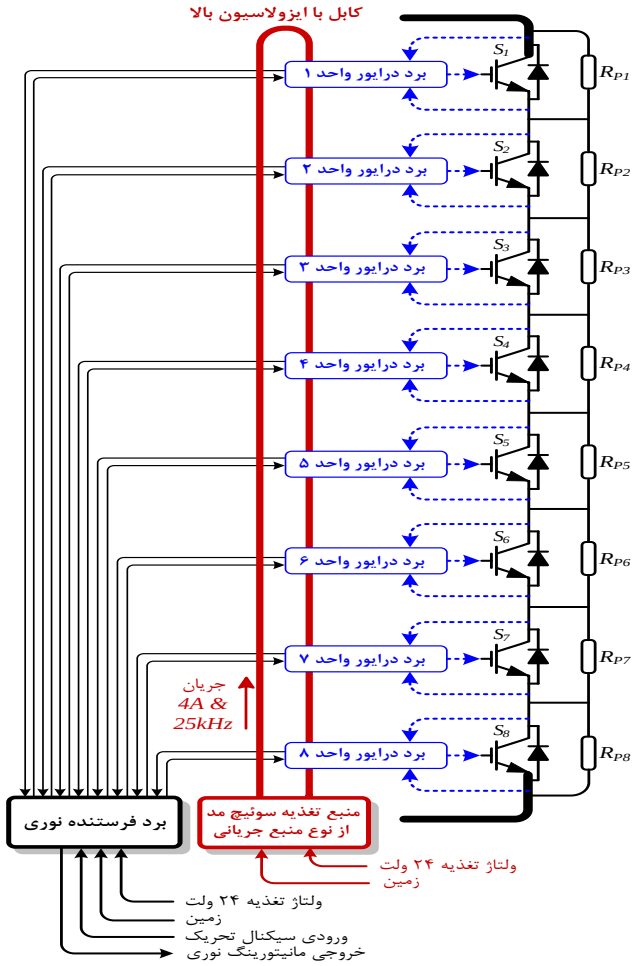
ولو مورد نظر در بخش قدرت از سری‌سازی ۸ عدد سوئیچ HV-IGBT که در شکل با نام‌های SS8 مشخص شده‌اند، تشکیل شده است. همچنین به منظور متعادل‌سازی ولتاژ استاتیکی بین سوئیچ‌ها از یک مجموعه مقاومت وات بالا موازی با هر یک از سوئیچ‌های نیمه‌هادی استفاده شده است. در شکل ۱- پیکره‌بندی کلی ولو نیمه‌هادی ولتاژ بالا.این مقاومت‌ها با نام RPRP8 مشخص شده‌اند. همچنین برای تحریک مناسب هر سوئیچ HV-IGBT از یک برد درایور مجزا و ایزوله استفاده شده است. این بردها سیگنال‌های PWM را به صورت نوری دریافت کرده و آن را به سیگنال‌های الکتریکی مناسب برای سوئیچ‌ها تبدیل می‌کنند. همچنین وظیفه متعادل‌سازی دینامیکی بین سوئیچ‌ها نیز به عهده این بردهای درایور است. (Zhau , 2001)

برای تغذیه بردهای درایور ذکر شده در بالا نیاز به تامین یک ایزولاسیون در حد 20 kVdc و بیشتر است که با استفاده از یک کابل با ایزولاسیون بالا قابل تامین است. این کابل توان را از طریق یک تبدیل ترانسفورمری به بردهای درایور منتقل می‌کند. در واقع کابل مذکور حامل یک جریان متناوب فرکانس بالا (۴ A و ۲۵ kHz) است که توسط یک منبع تغذیه سوئیچ مد از نوع منبع جریانی تولید می‌شود.

قابل ذکر است که در سری شدن IGBTها مسأله اصلی این است که چگونه تعادل ولتاژ میان ادوات در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی تضمین شود. زیرا عملکرد سری ادوات به دلیل تلرانس‌های موجود در مشخصات ادوات و یا عدم تطابق میان راه‌انداز آن‌ها، مشکل خواهد بود. در واقع عملکرد سری ادوات IGBT به دلائل عمده زیر ساده نمی‌باشد:

- مشخصات سوئیچینگ نامساوی ادوات
- جریانهای نشتی غیر یکسان قطعات
- اندوکتانس نشتی نابرابر در مدارهای سری
- تأخیرهای غیر مساوی در مدارهای راه‌انداز گیت

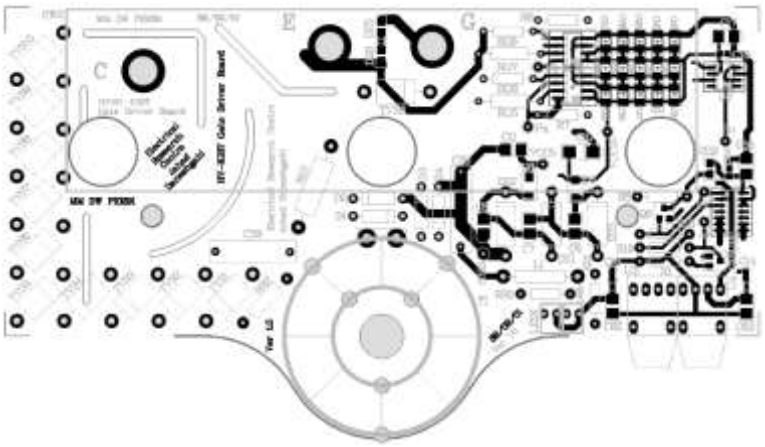
بنابراین سیستم ولو نیمه‌هادی از تعدادی نیمه‌هادی قدرت (IGBT) همراه با مجموعه ای از تجهیزات جانبی ساخته شده تا هرگونه تفاوت‌های مطرح در خصوص نیمه‌هادی‌ها توسط این مدارات جانبی جبران شده و تعادل ولتاژی لازم در حالت‌های استاتیک و دینامیک بین تمامی نیمه‌هادی‌ها تامین گردد.



شکل ۱- پیکره‌بندی کلی ولو نیمه‌هادی ولتاژ بالا.

۳- برد الکترونیکی درایور گیت IGBT

برد درایورIGBT علاوه بر تهیه ولتاژ ایزوله جهت راه‌اندازی مناسب گیت، دریافت سیگنال‌های تحریک نوری و تقویت و در نهایت تبدیل آن‌ها به پالس‌های الکتریکی، متعادل‌سازی ولتاژ IGBT در حالت استاتیکی را نیز بر عهده می‌گیرد. روش تامین تغذیه در این بردها بایستی علاوه بر ایزوله بودن از همدیگر، امپدانس موازی لازم و یکسانی را در کنار هر IGBT ایجاد نماید. تا تعادل دینامیکی و استاتیکی ولتاژی دو سر نیمه‌هادی‌ها با اتصال این بردها به ترمینال‌های نیمه‌هادی به هم نخورد. در این برد تمهیدات لازم برای کنترل ولتاژ دو سر نیمه‌هادی و کنترل آن در یک سطح محدود شده‌ای در نظر گرفته شده است همچنین گیرنده‌ها و فرستنده‌های نوری لازم برای دریافت و ارسال سیگنال‌های کنترلی تعبیه شده تا ضمن داشتن ایزولاسیون مناسب بین مجموعه بردهای کنترل و درایور امکان انتقال اطلاعات کنترلی لازم بین آنها فراهم گردد.



شکل ۲- برد گیت درایور

۴- پیکره‌بندی کلی مدار درایو IGBT

مدار درایو IGBT از چهار بخش کلی زیر تشکیل شده است:

۱) منبع تغذیه با ایزولاسیون ولتاژ بالا (High-Voltage Insolated Power Supply)،

۲) مدار درایور سوئیچ HV-IGBT (HV-IGBT Gate Driver)،

۳) ارتباط نوری (گیرنده و فرستنده) با مدار کنترل (Optic Communication)،

۴) مدار حفاظت در مقابل کاهش ولتاژ منبع تغذیه (Under Voltage Protection)،

۵) مدار حفاظت اضافه ولتاژهای گذرا (Active Clamping Protection).

۵- مدار درایو سوئیچ HV-IGBT

برای درایو سوئیچ HV-IGBT با شماره مدل CM400HB-90H از منبع تغذیه ولتاژ ۱۵ V+ و چهار تراتزیستور BJT و از نوع npn استفاده شده است. این ترانزیستورها جریان مورد نیاز برای درایو سوئیچ IGBT را از طریق مقاومت‌های گیت تامین می‌کنند. مقدار مقاومت گیت طبق نظر پیشنهادی برگه مشخصات فنی IGBT برابر ۲۲/۵ Ω تعیین شده است نحوه عملکرد این ترانزیستورها به این نحو است که به هنگام روشن بودن IGBT ولتاژ تغذیه ۱۵ V+ از طریق ترانزیستورها و مقاومت‌های گیت به ترمینال‌های گیت-امیتر سوئیچ IGBT اعمال می‌گردد. همچنین به هنگام خاموش بودن IGBT ولتاژ تغذیه ۱۵ V+ از طریق ترانزیستورها و مقاومت‌های گیت به ترمینال‌های امیتر-گیت سوئیچ IGBT اعمال می‌گردد. توجه شود که ولتاژ تغذیه هر چند همواره ۱۵V+ است ولی در هنگام روشن و خاموش بودن سوئیچ IGBT ولتاژهای به ترتیب ۱۵ V+ و ۱ V به ترمینال گیت نسبت به ترمینال امیتر سوئیچ اعمال می‌گردد. علاوه بر این مقدار مقاومت گیت که در حال روشن بودن و خاموش بودن نیز همواره ۲۲/۵ Ω می‌باشد.(Saiz, 2001)

۶- ارتباط نوری با مدار کنترل

یک ارتباط دو طرفه نوری بین مدار کنترل و مدار درایور IGBT در نظر گرفته شده است. گیرنده نوری فرمان‌های روشن و خاموش بودن سوئیچ را دریافت می‌کند، به طوریکه دریافت نور نشانه فرمان روشن بودن و عدم دریافت نور نشانه ارسال فرمان خاموش بودن سوئیچ از سوی مدار کنترل است. از فرستنده نوری نیز به دو منظور استفاده شده است. یکی برای ارسال سیگنال وقوع خطا در برد درایور و دیگری جهت نمایش وضعیت جاری سوئیچ. در وضعیتی که هیچ خطایی رخ نداده است وضعیت فرستنده نوری همواره عکس فرمانی است که مدار درایور از طریق گیرنده خود دریافت می‌کند. یعنی اگر فرمان روشن شدن

سوئیچ ارسال شود (مدار گیرنده نور دریافت می‌کند) فرستنده نوری خاموش می‌گردد (هیچ نوری نمی‌فرستد) و بر عکس، هرگاه گیرنده دریافت نور نداشته باشد (در نتیجه سوئیچ خاموش است) آنگاه مدار فرستنده یک سیگنال نوری را به سمت مدار کنترلی ارسال می‌کند. ولی هرگاه وقوع خطایی توسط مدار درایو گیت تشخیص داده شود، منطق توضیح داده شده در بالا برعکس می‌گردد. یعنی یا هر دوی مدار گیرنده و فرستنده روشن هستند و یا هر دو خاموشند.

۷- مدار محافظت در مقابل کاهش ولتاژ منبع تغذیه

به هنگام وقوع کاهش ولتاژ در برد درایور IGBT به منظور جلوگیری از سوختن سوئیچ بایستی از ادامه عملکرد سوئیچ یا مبدل اینورتر جلوگیری کرد. لذا ابتدا به یک مدار برای تشخیص این کاهش ولتاژ نیاز است و سپس باید یک سیگنال خطا به مدار کنترلی اعمال گردد تا دستورات لازم را به سوئیچ‌ها اعمال نماید.

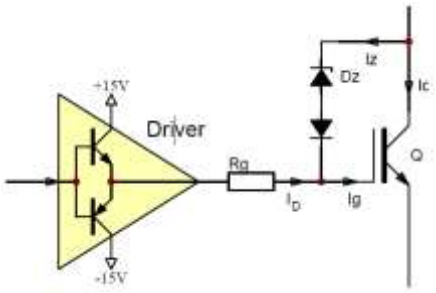
۸- مدار محافظ در مقابل اضافه ولتاژ

در کاربردهایی که از سری‌سازی IGBT ها برای دستیابی به یک ولتاژ کار بزرگ استفاده می‌شود، بحث تقسیم ولتاژ مناسب بین این سوئیچ‌های IGBT هم در حالت استاتیک و هم در حالت دینامیک جزو حساس‌ترین و پیچیده‌ترین مباحث است. به همین منظور مدارات محافظ مختلفی برای جلوگیری از وقوع این اضافه ولتاژها صورت می‌گیرد که در زیر شرح آن آمده است. اضافه ولتاژ در حالت گذرا به دو دلیل مختلف ممکن است رخ دهد:

۱) در اثر قطع یک جریان بزرگ (به طور مثال جریان اتصال کوتاه) ممکن است یک اضافه ولتاژ گذرای بزرگ ناشی از اندوکتانس نشتی موجود در لینک DC اینورتر بوجود آید.

۲) به دلیل متفاوت بودن مشخصه عملکردی سوئیچ‌هایی که با هم سری شده‌اند (حتی اگر همگی آن‌ها از یک مدل و ساخت یک کارخانه باشند) و یا به دلیل تاخیر در ارسال پالس‌های همزمان (مثلا در حد ۱ تا ۲ میکروثانیه) به سوئیچ‌های سری شده (ناشی از تاخیر ذاتی موجود در مدار کنترل)، یک یا چند سوئیچ ممکن است کمی زودتر روشن و یا خاموش شوند. در صورتیکه سوئیچ یا سوئیچ‌هایی زودتر روشن شوند، یک اضافه ولتاژ بزرگی روی بقیه سوئیچ‌هایی که هنوز روشن نشده‌اند قرار می‌گیرد. و در حالتی که سوئیچ یا سوئیچ‌هایی زودتر خاموش شوند یک اضافه ولتاژ بزرگ ولی این بار روی همان سوئیچ‌هایی که زودتر خاموش شده‌اند قرار می‌گیرد.

در کاربرد حاضر یعنی سری‌سازی ۸ سوئیچ HV-IGBT با IGBT های ۴۵۰۰ ولتی در حالیکه ولتاژ لینک DC اینورتر با در نظر گرفتن ۱۰٪ اضافه ولتاژ برابر ۲۲ kV است ولتاژ هرIGBT در شرایط خاموش حداکثر به ۲۷۵۰ ولت می رسد (استاتیک) ولی این مقادیر در شرایط واقعی و به بخصوص در زمانهای روشن و خاموش شدن (دینامیک) می تواند دست خوش تغییر شود ، از مدار نشان داده شده در مدارشکل ۳- مدار محافظت در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا. موسوم به Active Clamping برای جلوگیری از اضافه ولتاژ سوئیچ‌ها در حالت گذرا (دینامیک) استفاده شده است. توجه شود که این مدار سوئیچ‌ها را هم در برابر اضافه ولتاژهای گذرا محافظت کرده و هم در مقابل اضافه ولتاژهای دایمی کارائی دارد. (Hong , 1999)

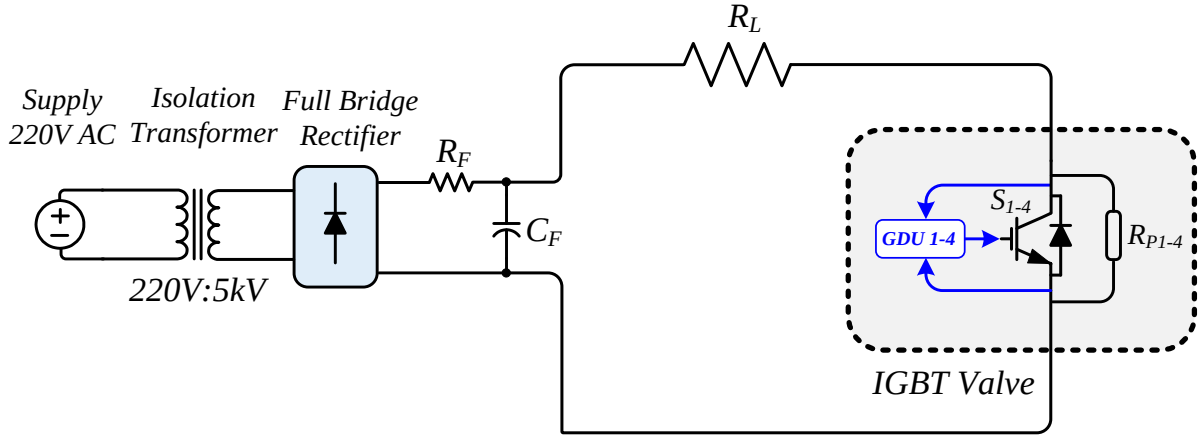


شکل ۳- مدار محافظت در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا.

در مدار محافظ نشان داده شده در مدار دیود Dz در واقع یک سوپرسور (suppressor) ولتاژ بالا است. به گونه‌ای که اگر ولتاژ کلکتور-امیتر سوئیچ از مقدار ولتاژ شکست دیود سوپرسور بیشتر شود آنگاه یک جریانی تصحیح‌کننده به ترمینال گیت سوئیچ تزریق شده و باعث روشن شدن آن (یا به عبارت دیگر جلوگیری از خاموش شدن آن به طور کامل) می‌گردد. در مدار طراحی شده برای درایور گیت HV-IGBT ها در این پروژه از مدار محافظ نشان داده شده در شکل استفاده شده است.. در این مدار از ۱۱ عدد دیود TVS (Transient Voltage Suppressor) با مقدار ولتاژ شکست ۳۲۸ V برای هریک استفاده شده است.

۹- نحوه سری‌سازی سوئیچ‌های IGBT و نتایج آزمایشگاهی:

در این بخش نحوه سری‌سازی سوئیچ‌های IGBT و نتایج آزمایشگاهی مربوطه ارائه می‌گردند. در ابتدا نحوه پیکره‌بندی کلی سیستم مورد آزمایش تشریح شده و سپس روش به کار گرفته شده برای سری‌سازی ۴ عدد سوئیچ HV-IGBT مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه نتایج آزمایشگاهی مربوط به این تست نمایش داده شده‌اند. در پایان نیز نمایی کلی از ولو ساخته شده، متشکل از ۸ عدد HV-IGBT سری شده به علاوه سیستم خنک‌سازی "آب خنک"، نشان داده شده است.



شکل ۴- پیکره‌بندی کلی مدار آزمایشی سری‌سازی سوئیچ‌ها در ولو IGBT.

۱۰- پیکره‌بندی کلی سیستم مورد آزمایش

ابتدا ولتاژ ۲۲۰ V برق شهر توسط یک ترانسفورماتور ایزوله به ولتاژ ۵ kV تبدیل می‌شود و سپس با استفاده از یک یکسوساز پل دیودی و یک فیلتر RC ولتاژ DC مورد نیاز برای تست ولو IGBT فراهم می‌گردد. البته لازم به ذکر است که با استفاده ار یک اتوترانسفورماتور قبل از ترانس ایزوله می‌توان ولتاژ لینک DC را براحتی کنترل کرده و آن را تغییر داد. ولو IGBT که

خود از ۴ سوئیچ سری‌شده HVIGBT تشکیل شده توسط یک مقاومت R_L به ولتاژ DC متصل می‌شود. مقدار مقاومت R_L به گونه‌ای انتخاب شده که در صورت وصل بودن ولو IGBT جریانی برابر ۲ آمپر از آن عبور کند. مقدار پارامترهای به کار گرفته شده در این آزمایش در

جدول ۱- مقادیر پارامترهای استفاده شده در آزمایش خلاصه شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای استفاده شده در آزمایش

پارامترها	مقادیر
R_F	۲۲۰ Ω
C_F	µF۳۳۰
R_L	۱۳۶۰ Ω
R_{P4}	MΩ۵/۷
S_4	Mitsubishi HVIGBT Modules CM400HB-90H
f_{SW}	Hz۹۰۰
Duty-Cycle	۰/۲

به منظور اندازه‌گیری ولتاژ کلکتور-امیتر هر سوئیچ از روش تقسیم مقاومتی استفاده شده است، به گونه‌ای که از دو مقاومت ۵۶ kΩ سری با یک مقاومت ۵/۶ MΩ استفاده شده است. کلیدزنی ولو IGBT نیز توسط یک اسیلاتور و با فرکانس نزدیک ۹۰۰Hz و دیوتی سایکل ۰/۲ انجام می‌گیرد.

۱۱- نتایج آزمایشگاهی

به منظور تست و ارزیابی ولو ساخته شده متشکل از ۸ سوئیچ IGBT سری شده به همراه بردهای الکترونیکی مربوطه (شامل ۸ عدد برد درایور گیت، ۱ عدد برد منبع تغذیه جریانی و ۱ عدد برد فرستنده نوری) مجموعه آزمایشات به شرح زیر ترتیب داده شد:

الف- تاخیر زمانی بین ارسال پالس توسط کنترلر و دریافت پالس توسط سوئیچ،

ب- شکل‌موج‌های ولتاژ و جریان مربوط به یک سوئیچ در هنگام کلیدزنی،

ج- نحوه همزمانی پالس‌های دریافتی توسط سوئیچ‌های سری شده در ولو و

د- نحوه تقسیم ولتاژ استاتیکی و دینامیکی بین سوئیچ‌های سری شده در ولو.

۱۲- تاخیر زمانی بین ارسال پالس توسط کنترلر و دریافت پالس توسط سوئیچ

در این آزمایش هدف تعیین میزان تاخیر زمانی از لحظه ارسال پالس PWM توسط کنترل‌کننده تا لحظه دریافت پالس توسط برد درایور گیت و اعمال آن به سوئیچ IGBT است. به این منظور ۲ شکل‌موج اندازه‌گیری می‌شود، یکی سیگنال پالس PWM ارسالی از سوی برد کنترلی با دامنه صفر و ۵+ ولت و دیگری ولتاژ گیت-امیتر سوئیچ IGBT با دامنه ۱ و ۱۵+ ولت. نتیجه این آزمایش یک تاخیر ۷۵۰ نانوثانیه‌ای بین این دو را نشان می‌دهد.یعنی حدود ۷۵۰ نانو ثانیه تاخیر بین ارسال تا دریافت پالس PWM است. علاوه بر این خود سوئیچ ۵ میکرو ثانیه پس از دریافت پالس به طور کامل روشن می‌گردد.

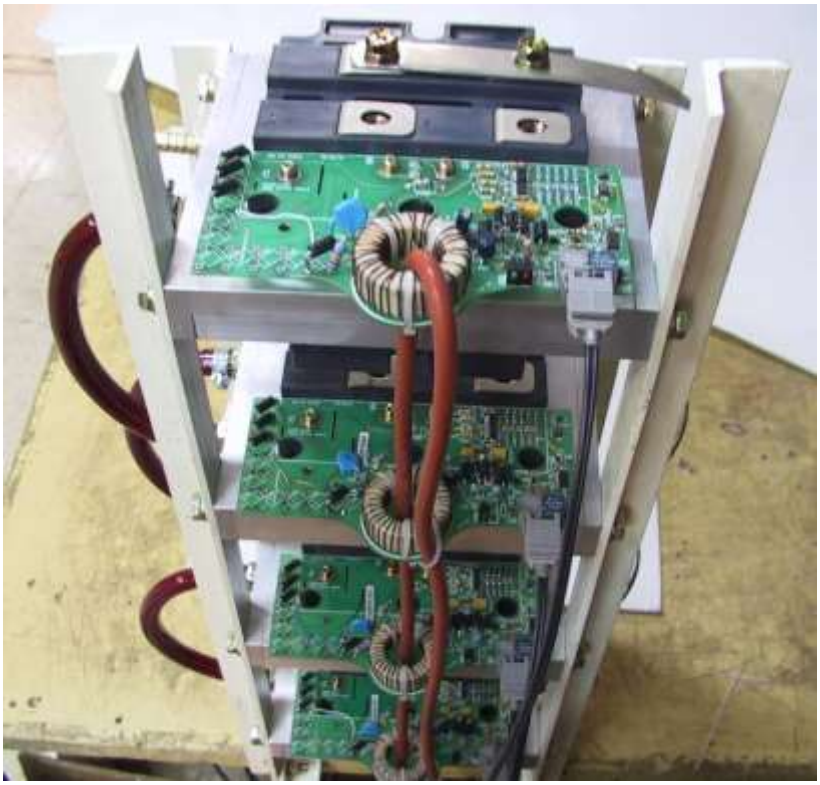
آزمایش دیگری با هدف بررسی نحوه روشن و خاموش شدن یک سوئیچ IGBT در حضور برد درایور گیت ساخته شده انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که سوئیچ ۶ میکروثانیه پس از دریافت فرمان خاموش شدن به طور کامل خاموش می‌شود و سوئیچ ۵ میکرو ثانیه پس از دریافت فرمان روشن شدن به طور کامل روشن می‌شود.

نحوه همزمانی پالس‌های دریافتی توسط سوئیچ‌های سری شده در ولو

آزمایش دیگری برای بررسی این موضوع که آیا سیگنال‌های PWM اعمالی به سوئیچ‌های سری شده در یک ولو به طور همزمان به همه آن‌ها اعمال می‌گردد یا خیر انجام شد. نتیجه این آزمایش نشان داد که لحظه روشن شدن و خاموش شدن همه سوئیچ‌ها با هم برابر است و تنها اختلاف‌هایی کمتر از ۲۰۰ ns بین آن‌ها دیده می‌شود.

نحوه تقسیم ولتاژ استاتیکی و دینامیکی بین سوئیچ‌های سری شده در ولو

آزمایش بعدی به منظور بررسی نحوه توزیع و تقسیم ولتاژ بین سوئیچ‌های سری شده در یک ولو ترتیب داده شد. در این آزمایش به دلیل مسایل ایزولاسیون در هر بار آزمایش ولتاژ کلکتور-امیتر دو سوئیچ سری شده و ولتاژ گیت-امیتر یک از آن سوئیچ‌ها قابل نمایش در اسیلوسکوژ بود این آزمایش دو به دو برای ۴ سوئیچ سری شده تکرار شد.. در این آزمایش ابتدا ولتاژ ولو به اندازه‌ای افزایش یافت که مدار محافظ فعال نشود. نتیجه این آزمایش برای دو سوئیچ نشان داد که تقسیم ولتاژ بین سوئیچ‌ها در شرایطی که مدار محافظ غیر فعال است وضع مطلوبی ندارد. اما با بالا بردن ولتاژ اعمالی به ولو و در نتیجه فعال شدن مدار محافظ نحوه تقسیم ولتاژ استاتیک و دینامیک به شکل مطلوبی بین سوئیچ‌های سری شده در ولو تقسیم می شود.



شکل۵-ولو IGBT ساخته شده

۱۳- جمع‌بندی

در این فصل نتایج مربوط به ولو ساخته شده، متشکل از ۸ عدد سوئیچ IGBT سری شده، ارائه شد. به این منظور یک مجموعه آزمایشگاهی برای تست ولو و کارایی روش به کار گرفته شده برای تقسیم ولتاژ بین سوئیچ‌های سری شده ترتیب داده شد. به طوریکه ولو IGBT با فرکانسی نزدیک ۱ kHz کلیدزنی شد در حالیکه این ولو یک بار ۱۴۰۰ Ω را از طریق یک ولتاژ DC نزدیک ۲ kV تغذیه می‌کرد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده روش به کار گرفته شده با موفقیت ولتاژ لینک DC را به طور مساوی بین سوئیچ‌های سری شده تقسیم کرد. همچنین در این فصل نمایی از ولو ساخته شده و همچنین مجموعه تست آزمایشگاهی نمایش داده شد.

ویژگیهای ولو ولتاژ بالای IGBT

۱) همه سوئیچ‌های سری شده در ولو همزمان فرمان روشن و خاموش شدن را دریافت می‌کنند.

۲) ولتاژ اعمال شده به ولو به خوبی در دو حالت استاتیک و دینامیک بین سوئیچ‌های سری شده تقسیم می‌گردند.

۳) ایزولاسیون مناسب بین مدارات کنترلی و سوئیچ‌ها از طریق استفاده از ارتباطات نوری برای ارسال و دریافت اطلاعات و همچنین استفاده از یک کابل با ایزولاسیون ولتاژ بالا برای تغذیه بردهای درایور به دست آمد.

۴) هر ولو دارای یک منبع تغذیه جریانی بوده که توان مورد نیاز هر ۸ سوئیچ سری شده در آن ولو را تامین می‌کند. این منبع ؛ توان را به صورت یک جریان با دامنه A ۴ و فرکانس kHz ۲۵ از طریق کابل ذکر شده در بالا به بردهای درایور منتقل می‌کند.

۵) به ازای هر سوئیچ یک برد درایور IGBT (۸ برد به ازای یک ولو) در نظر گرفته شده است. این بردها علاوه بر درایو مناسب سوئیچ‌های HV-IGBT دارای یک ارتباط نوری با مدار کنترل اصلی بوده و از مدارات محافظ مناسب برای حفاظت IGBT ها بهره می‌برند.

۶) ساختار سوئیچ به نحوی طراحی شده است که مدارات جانبی آن قابل استفده برای تعداد بیشتری از نیمه هادی بوده و بنابراین می توان ولتاژ کار ولو افزایش داد.

۱۴ -مراجع

1. S. Hong , V. Chitta And D. A. Torrey, member IEEE. Series Connection of ICBT's with Active Voltage Balancing, IEEE Transaction an Industry Applications, Vol. 35, No. 4, July-August 1999.
2. J. Saiz, M. Mermet, D. Frey, P.O. Jeannin. J.L. Schanen, Optimization and Inlegrotion of an Active Clamping Circuit for 1GBT Series Associoeion. IAS 2001
3. Y. Lausenaz, D. Chatroun, J-F. Villard, CEA VALRHO, Pierrelatte, FR And J-M. Li, D. Lafore, CEGEMAIESIM, Marseille, FR, And L. Gamier, Centralp Enenanic, SI. Quentin Fallavier, FR, Seri'ol Connected Active Voltage Clamping, EPE'99 Lausanne, CH. pp. 1-6.
4. D. Zhau And D. H. Braun, Rockwell Automation Mequon WI, A Pracricol Series Connection Technique ,fir Mulriple 1GBT Devices, PESC2001, 17-21 June2001,Vol4,pp. 2151-2155