دانشکده برق، کامپیوتر و فناوری های پیشرفته

گروه مهندسی برق-قدرت

دستورکار آزمایشگاه الکترونیک صنعتی

تهیه کنندگان:

آقای دکتر محمد فرهادی کنگرلو

آقای دکتر یوسف نیشابوری

تاریخ تنظیم:

شهریور ۱۴۰۲

فهرست مطالب

نکات ایمنی کار در آزمایشگاه الکترونیک صنعتی ۱

آشنایی با کلیات آزمایشگاه الکترونیک صنعتی ۲

روش ساخت مدار در آزمایشگاه ۲

لحیم‌کاری و لوازم آن ۳

لحیم‌کاری ۹

آزمایش شماره ۱: یکسوساز نیم‌موج دیودی ۱۱

الف) بار اهمی ۱۳

ب) حالت بدون بار و دارای خازن فیلتر ۱۳

ج) حالت دارای بار و خازن فیلتر ۱۳

آزمایش شماره ۲ یکسوساز تمام موج دیودی ۱۵

الف) بار اهمی ۱۷

ب) حالت بدون بار و دارای خازن فیلتر ۱۷

ج) حالت دارای بار و خازن فیلتر ۱۷

آزمایش شماره ۳ آشنایی با عملکرد تریستور ۱۹

خاموش‌شدن تریستور ۲۱

مشخصه ولتاژ-جریان ۲۳

آزمایش شماره ۴: یکسوساز تریستوری ۲۵

آزمایش شماره ۵: آشنایی با عملکرد IGBT/MOSFET (یک جلسه) ۲۷

آزمایش شماره ۶: مبدل DC-DC افزاینده (دو جلسه) ۳۳

آزمایش شماره ۷: مبدل DC-DC کاهنده (Buck) (دو جلسه) ۳۹

آزمایش شماره ۸: اینورتر نیم پل (Half-bridge) (دو جلسه) ۴۲

نکات ایمنی کار در آزمایشگاه الکترونیک صنعتی

(مطالب این صفحه را قبل از شروع آزمایشگاه حتماً مطالعه بفرمایید.)

۱- از آنجایی که در این آزمایشگاه با لوازم لحیم‌کاری کار می‌کنید، باید مراقب قسمت‌های داغ باشید تا سوختگی‌های جدی پیش نیاید. البته سوختگی جزئی دست بخصوص اوایل کار با لوازم لحیم‌کاری تا حدودی طبیعی است. ولی به هر حال باید کاملاً مراقب باشید و از اصول لحیم‌کاری درست پیروی کنید.

۲- در این آزمایشگاه ممکن است با ولتاژهای بالا سر و کار داشته باشید، بنابراین اصول ایمنی در برابر برق گرفتگی را باید کاملاً رعایت کنید. در این راستا موارد زیر را حتماً باید رعایت کنید:

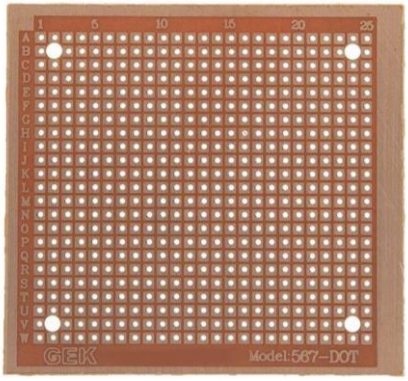
- با مدار دارای برق به هیچ وجه تماس نداشته باشید، اگر می‌خواهید تغییری در مدار ایجاد کنید حتماً اول تغذیه مدار را قطع و یا خاموش کنید.
- بدون اجازه و هماهنگی استاد درس یا مسئول آزمایشگاه، مدار خود را برقدار نکنید.

۳- از استشمام گازهای تولید شده در حین لحیم کاری جداً پرهیز کنید.

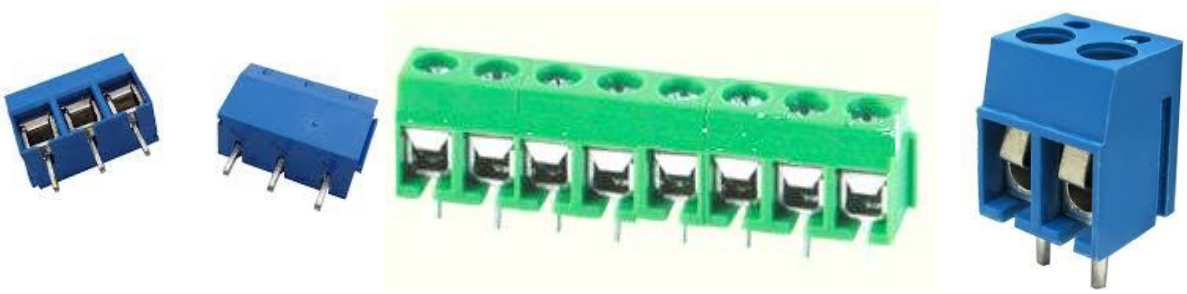
آشنایی با کلیات آزمایشگاه الکترونیک صنعتی

روش ساخت مدار در آزمایشگاه

در آزمایشگاه الکترونیک صنعتی برای یادگیری هرچه بهتر و بیشتر نکات عملی، از مجموعه‌های آزمایشگاهی آماده استفاده نمی‌شود و در هر یک از آزمایش‌ها دانشجویان مدار مربوط به آن آزمایش را روی بردهای فیبر سوراخ‌دار پیاده‌سازی می‌کنند. تصویر یک نمونه از برد فیبر سوراخ‌دار در شکل (۱) نشان داده شده است. در این روند، دانشجویان با سیم‌بندی و لحیم‌کاری نیز بیش از پیش کار می‌کنند. همچنین، برای این که دسترسی به ورودی و خروجی مدار برای اتصال به منبع و بار راحت‌تر باشد، از ترمینال‌های مخصوص برای این کار استفاده خواهد شد. تصویر چند نمونه از ترمینال‌های مورد استفاده در مدارهای الکترونیک قدرت در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): تصویر یک نمونه برد فیبر سوراخ‌دار



شکل (۲): تصویر چند نمونه از ترمینال‌های مورد استفاده در مدارهای الکترونیک قدرت

لازم است با واژه‌ها و عبارات رایج در آزمایشگاه الکتورنیک صنعتی آشنایی حاصل شود. در ادامه اطلاعات ضروری آورده می‌شود.

کلید: منظور کلید الکترونیک قدرت از نوع IGBT و یا MOSFET است. اگر در مورد این کلیدها اطلاعات ندارید می‌توانید در کتاب‌های الکترونیک قدرت و همچنین اینترنت اطلاعات کافی کسب کنید.

قطعه DIP: هر قطعه الکترونیکی و یا الکترونیک قدرت که دارای پایه بوده و هنگام نصب این قطعه‌ها روی مدار پایه‌های قطعه از طرف دیگر برد بیرون آمده و لحیم‌کاری می‌شوند.

قطعه SMD: در مقابل قطعه‌های DIP قطعه‌های SMD وجود دارد که دارای پایه نیستند و بلکه دارای اتصالات انتهایی هستند که روی برد لحیم می‌شوند. توجه کنید که امکان استفاده از قطعات SMD فقط در بردهای مدار چاپی (PCB) وجود داشته و استفاده از آن‌ها در سایر مدارها مانند فیبر سوراخ‌دار بسیار مشکل است. در شکل (۳) مقاومت با دو پکیج DIP و SMD نشان داده شده است.

توجه: تقریباً تمام قطعات مدار (مانند مقاومت، سلف، خازن، دیود، IGBT و MOSFET و غیره) هم به شکل DIP و هم به شکل SMD وجود دارند و اتقاقاً در مدارهای صنعتی استفاده از قطعات SMD ترجیح داده می‌شود. البته باید توجه کرد که قطعات توان بالا (ولتاژ بالا و جریان بالا) مانند کلیدهای الکترونیک قدرت توان بالا، خازن‌های ولتاژ بالا، مقاومت‌های توان بالا و سلف‌های جریان بالا همچنان به شکل DIP هستند.

شکل (۳): تصویر مقاومت، (الف) DIP، (ب) SMD

لحیم‌کاری و لوازم آن

برد های الکترونیکی از قطعات سخت افزاری متفاوتی تشکیل شده که باید اتصال قطعات به صورت صحیح انجام شود. لحیم کاری یکی از روش های کاربردی و پر طرفدار برای وصل کردن قطعات روی برد الکترونیکی می باشد. معنی لغوی لحیم، "آلیاژ" می باشد که به معنای ترکیب دو یا چند فلز است .برای متصل کردن دو قطعه فلز از فلز سومی که مذاب بوده و پس از این که سرد می شود، قطعات فلز را در کنار یکدیگر محکم نگه می دارد.

مهارت لحیم کاری نیاز به دقت بالا داشته و تعمیرکاران لوازم الکترونیکی باید با تمرین زیاد، لحیم کاری را با سرعت بالایی انجام دهند.

هویه

هویه مهم ترین ابزار مورد استفاده در لحیم کاری می باشد. هویه ها در انواع متعددی با ویژگی های مختلف در بازار وجود دارد، اما عملکرد همگی آن ها مشابه است. در شکل (۴) تصویر دو نمونه هویه نشان داده شده است. هویه در دو مدل نوک اسکنه و نوک مخروطی در بازار وجود دارد. مدل نوک مخروطی بدون آسیب زدن به برد الکترونیکی و بخش های دیگر، قطعات کوچک را با ظرافت کافی لحیم کنید. برای لحیم کردن قسمت های بزرگ تر از مدل نوک اسکنه که نوک آن پهن‌تر است، استفاده می شود.

به دلیل اینکه هویه در هنگام کار داغ می‌شود، نباید آن را روی میز کار گذاشت، برای این کار از پایه‌های مخصوص نگهدارنده هویه استفاده می‌شود که تصویر یک نمونه از آن در شکل (۵) نشان داده شده است.

شکل (۴): تصویر دو نمونه هویه

شکل (۵): تصویر یک نمونه پایه هویه

سیم لحیم

تصویر یک نمونه سیم لحیم در شکل (۶) نشان داده شده است. سیم های لحیم در قطرهای مختلف متناسب با نیاز کار لحیم تولید می شوند در نتیجه انتخاب قلع مناسب می تواند در کیفیت لحیم کاری اثر مستقیم بگذارد. سیم لحیم ترکیبی از آلیاژ قلع و سرب می باشد. بهترین درصد ترکیب ۶۰ درصد قلع و ۴۰ درصد سرب است. بخصوص در لحیم کاری قطعات الکترونیکی نیاز است که درصد قلع حدود ۶۰ درصد باشد زیرا قلع نقطه ذوب پایین تری نسبت به سرب دارد و با دمای کمتری می توان آن را ذوب کرد در نتیجه می توان از رسیدن آسیب احتمالی به قطعات الکرتونیکی جلوگیری کرد.

شکل (۶): تصویر سیم لحیم

خمیر لحیم

خمیر لحیم کاری (خمیر قلع) که در آن قلع به کمک ماده فلاکس به شکل خمیری درآمده و زمانی که که به آن حرارت داده شود، با خشک شدن فلاکس و ذوب شده قلع لحیم کاری صورت می‌گیرد. خمیر قلع برای مونتاژ قطعات SMD کاربرد دارد. تصویر یک نمونه خمیر قلع در شکل (۷) نشان داده شده است.

شکل (۷): خمیر لحیم‌کاری (خمیر قلع)

اسفنج نسوز

اسفنج نسوز برای تمیز کردن قلع های اضافی نوک هویه کاربرد دارد. توجه داشته باشید هنگام استفاده از اسفنج، کمی آن را با آب مرطوب نگه دارید. تصویر یک نمونه اسفنج نسوز در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل (۸): تصویر یک نمونه اسفنج نسوز

قلع کش

ممکن است هنگام لحیم کاری، حجم زیادی از لحیم روی برد باشد و یا قلع در جای مناسب قرار نگرفته باشد و یا قطعه ای اتصال مناسبی نداشته باشد در نتیجه قلع کش ابزار مناسبی برای برداشتن اضافات قلع است. تصویر یک نمونه قلع‌کش در شکل (۹) برای این منظور باید ابتدا نقطه مورد نظر را با هویه گرم کرده و سپس توسط قلع کش، قلع را از روی برد برداشت.

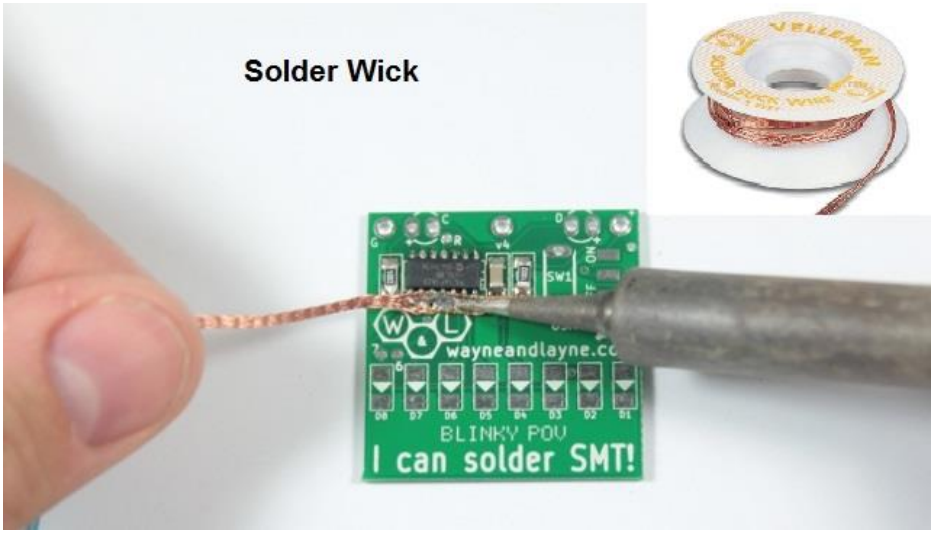
شکل (۹): تصویر یک نمونه قلع‌کش

روغن لحیم

روغن لحیم کاری به صورت یک خمیر شیمیایی بوده که از یک اسید ضعیف برای تمیز کردن نوک هویه و اجزا باقی مانده روی هویه مورد استفاده قرار می گیرد. هم چنین روغن لحیم کاری مانع از اکسید شدن نوک هویه در زمانی که مورد استفاده قرار نمی گیرد، می شود.

فتیله لحیم

جذب کننده لحیم (فتیله لحیم) که یکی از قطعات مورد استفاده در انجام لحیم کاری برای پاک کردن قطعات از روی برد می باشد. جذب کننده به صورت نواری شکل بوده و از سیم های مسی نازک به هم تابیده شده، تشکیل شده است. به وسیله سیم مسی موجود در جذب کننده لحیم، لحیم های اضافی پاک می شوند. تصویر یک نمونه فتیله لحیم در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): سیم جذب کننده لحیم (فتیله لحیم)

ماژیک ذوب کننده لحیم

ماژیک ذوب کننده لحیم از ماده ای شیمیایی به نام Fluex به منظور نرم کردن قطعات سخت و انجام اتصالات لحیم بهتر و با کیفیت‌تر ساخته شده است. پس از انجام لحیم کاری باقی مانده های ماژیک ذوب کننده لحیم را از روی برد الکترونیکی پاک کنید.

گیره

گیره می تواند به شما کمک کند تا قطعه شما هنگام لحیم کاری ثابت قرار گیرد، که این می تواند باعث افزایش امنیت و دقت هنگام کار گردد. تصویر یک نمونه گیره لحیم‌کاری در شکل زیر نشان داده شده است.

شکل (۱۱): تصویر گیره برد

سیم چین

بعد از لحیم کاری قطعات برای جداسازی بخش های اضافی احتیاج به یک سیم چین خواهید داشت. تصویر یک نمونه سیم‌چین در شکل زیر نشان داده شده است.

شکل (۱۲): تصویر یک سیم‌چین

لحیم‌کاری

به دلیل این که گازهای حاصل از لحیم کاری خطرناک می‌باشد، توصیه می‌شود که عملیات لحیم کاری در محیطی با تهویه مناسب و با استفاده از ماسک و محافظ انجام شود. سعی کنید هویه و سیم لحیم را در فاصله ۲۰ تا ۳۰ سانتی متری از صورت خود قرار دهید.

نوک هویه واقعا داغ می‌شود پس در حین کار مراقب باشید. از ایمنی محل کار مطمئن شوید. بهتر است در حین کار از عینک محافظ استفاده کنید.

تصویر نشان داده شده در شکل (۱۳)، مراحل لحیم‌کاری را نشان می‌دهد. این مراحل عبارتند از:

۱ موقعیت برد را تنظیم نمایید.

۲ دمای هویه را در صورت امکان روی ۳۵۰درجه سانتیگراد تنظیم کنید.

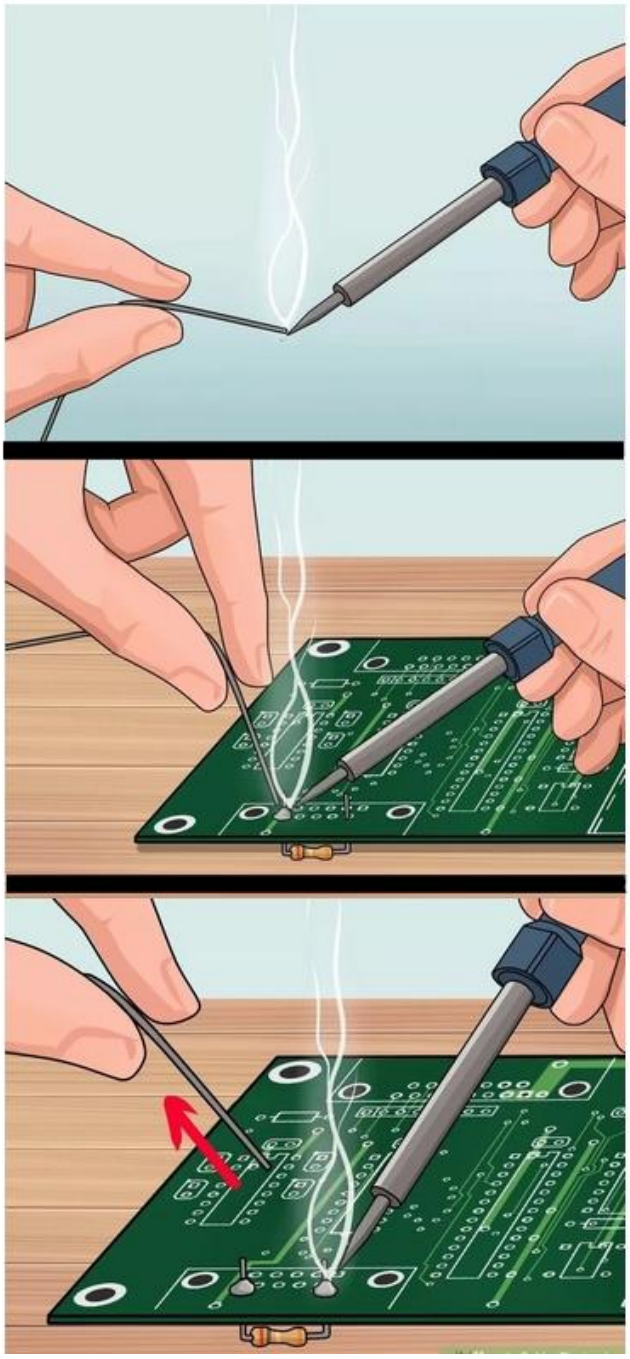
۳ نوک هویه را مقدار بسیار کمی به قلع آغشته کنید

٤ هم پایه قطعه و هم پد مورد نظر را با هویه حرارت دهید (توجه کنید از نوک هویه استفاده نکنید، از چند میلیمتر بالاتر و از پهلوی آن جهت گرم کردن استفاده کنید)

٥ سپس سیم لحیم را به پایه و پد مورد نظر نزدیک کنید(به نوک هویه نچسبانید) تا ذوب شود.

٦ ابتدا سیم لحیم و سپس هویه را از کنار قطعه فاصله دهید.

۷ لحیم صحیح باید شبیه به قیف معکوس باشد و شکل گرد یا توده ای نشان از لحیم کاری نامرغوب است.



شکل (۱۳): تصاویر مراحل لحیم‌کاری

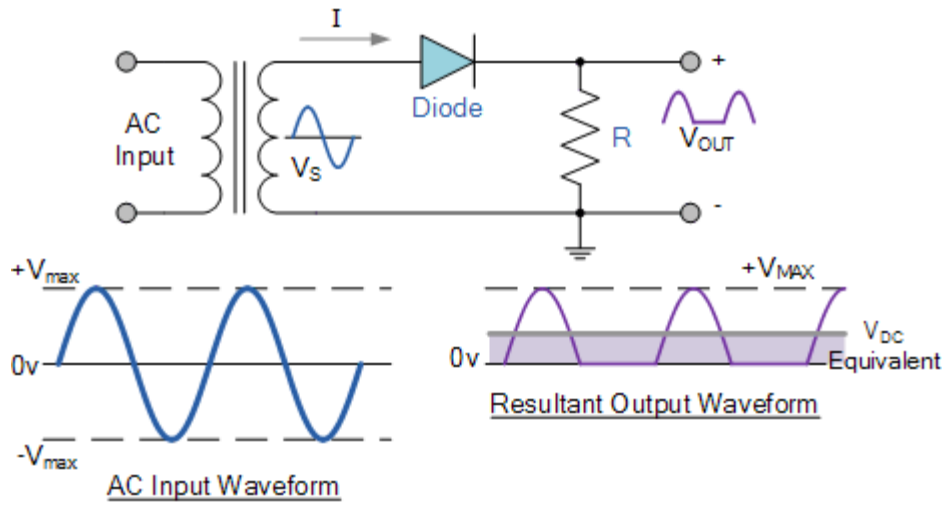
توجه کنید اگر لحیم کاری به صورت درست انجام شود، به صورت قیف معکوس بوده و پس از اتمام کار، از روغن لحیم برای تمیز کردن سطح لحیم کاری و برد الکترونیکی استفاده می شود.

آزمایش شماره ۱: یکسوساز نیم‌موج دیودی

هدف آزمایش: آشنایی با نحوه عملکرد یکسوساز دیودی و مشاهده و تحلیل شکل‌موج‌های آزمایشگاهی

کلیات و تئوری: یکسوسازها مبدل‌های الکترونیک قدرت هستند که برای تبدیل شکل‌موج AC به شکل‌موج DC به کار می‌روند. با توجه به اینکه شبکه برق در دسترس دارای ولتاژ AC است، برای تغذیه بارهای DC مانند موتورهای DC و مدارهای الکترونیکی باید از یکسوساز استفاده شود. یکسوسازها انواع و ساختارهای مختلفی دارند. یکسوسازها را می‌توان به دو گروه کنترل نشده (دیودی) و کنترل شده (تریستوری) تقسیم کرد. البته یکسوسازهای نیمه کنترل شده را نیز که در آن‌ها هم از دیود و هم از تریستور استفاده می‌شود، می‌توان جزو گروه کنترل‌شده در نظر گرفت. از نظر شکل‌موج نیز می‌توان آن‌ها را به دو دسته نیم‌موج و تمام‌موج تقسیم‌بندی کرد. همچنین از لحاظ تعداد فاز نیز می‌توان آن‌ها را به تک‌فاز و سه‌فاز تقسیم‌بندی کرد.

در یکسوساز تکفاز نیم موج دیودی از یک دیود استفاده می‌شود و بنابراین در شکل موج ولتاژ خروجی فقط نیم سیکل ظاهر می‌شود. شکل (۱-۱) یک یکسوساز نیم موج دیودی را به همراه شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی نشان می‌دهد. البته باید توجه کرد که شکل موج نشان داده شده در شکل مورد نظر فقط برای بار اهمی صحیح است و اگر بار غیر از قسمت اهمی دارای اندوکتانس نیز باشد، شکل موج ولتاژ خروجی متفاوت خواهد بود. همچنین اگر در خروجی یکسوساز یک خازن فیلتر قرار داده شود، شکل موج ولتاژ خروجی تغییر خواهد کرد.



شکل (۱-۱): یکسوساز تک فاز نیم موج دیودی و شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی آن با بار اهمی

در یکسوساز نیم موج دیودی با بار اهمی، رابطه مقدار متوسط ولتاژ خروجی (مقدار dc ولتاژ خروجی) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} \qquad (۱-۱)$$

که در آن، V_m دامنه ولتاژ ورودی یکسوساز و ω فرکانس زاویه‌ای آن است.

مقدار موثر ولتاژ خروجی (V_{rms}) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)} = \frac{V_m}{2} \qquad (۱-۲)$$

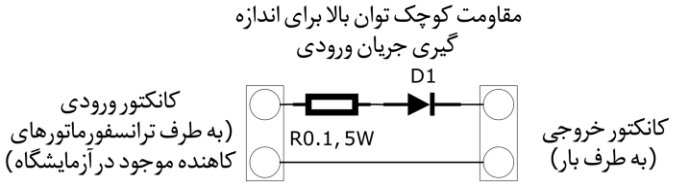
عملکرد یکسوسازها در حالت کلی با دو کمیت ضریب ریپل (RF)[1] و ضریب شکل (FF)[2] سنجیده می‌شود. روابط این دو کمیت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}}$$
$$RF = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1} \qquad (۱-۳)$$

هر چقدر ضریب شکل نزدیک به یک و ضریب ریپل نزدیک به صفر باشد، شکل موج ولتاژ خروجی به یک ولتاژ dc ایده‌آل نزدیکتر است. باید توجه کرد که حداقل مقدار ضریب شکل برابر با یک است.

شرح آزمایش:

مدار یکسوساز نیم‌موج دیودی را طبق نقشه نشان داده شده در شکل زیر روی فیبر سوراخ‌دار پیاده‌سازی کنید.



شکل (۲-۱): مدار آزمایشگاهی یکسوساز نیم‌موج دیودی

[1] Ripple Factor
[2] Form Factor

بعد از لحیم‌کاری و پیاده‌سازی مدار و اطمینان از درستی آن و بعد از کنترل آن توسط استاد درس، قبل از اتصال ترانسفورمانور به برق، خروجی ترانسفورماتور کاهنده را به کانکتور ورودی یکسوساز وصل کنید. در حالت‌های زیر، عکس شکل موج ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی، ولتاژ دو سر دیود (ولتاژ آند نسبت به کاتد) و همچنین جریان ورودی یکسوساز (ولتاژ دو سر مقاومت سری) را ذخیره کرده و در گزارش کار خود استفاده کنید.

توجه: حتماً از قسمت اندازه‌گیری اسیلوسکوپ استفاده کرده و مقادیر متوسط و موثر تمام شکل موج‌ها را در کنار شکل‌موج داشته باشید.

الف) بار اهمی

در این حالت، مقاومت بار را به کانکتور خروجی وصل کرده و سپس مدار را تغذیه کنید. شکل موج‌های اشاره شده در بالا را ثبت کنید.

ب) حالت بدون بار و دارای خازن فیلتر

در این حالت، خازن الکترولیتی دارای پلاریته را با رعایت پلاریته به خروجی مدار وصل کنید ولی بار (مقاومت) به خروجی وصل نکنید. در این حالت نیز تمام شکل موج‌های فوق را ثبت کنید.

ج) حالت دارای بار و خازن فیلتر

در این حالت، هم خازن و هم مقاومت بار را به خروجی وصل کرده و دوباره شکل موج‌های اشاره شده را ثبت کنید.

گزارش کار کامل از آزمایش تهیه کرده و تا شروع آزمایش بعدی به استاد درس ارسال کنید. در تهیه گزارش کار حتماً به موارد زیر دقت کنید.

- تمام شکل موج‌ها را قرار داده و به صورت کامل تحلیل کنید. منظور از تحلیل، توضیح کافی در مورد هر شکل موج است. بدیهی است صرفاً قرار دادن شکل موج‌ها در گزارش کافی نبوده و در مورد هر خروجی باید به صورت مجزا توضیح کافی داده شود. مثلاً وقتی شکل موج ولتاژ خروجی در یکسوساز قرار داده می‌شود باید توضیح داده شود که چرا شکل موج قسمت منفی ندارد. به عبارت دیگر، تفسیر کامل شکل موج‌ها باید در گزارش کار آورده شود. همچنین، مقایسه نتایج با روابط تئوری هم ضروری است.

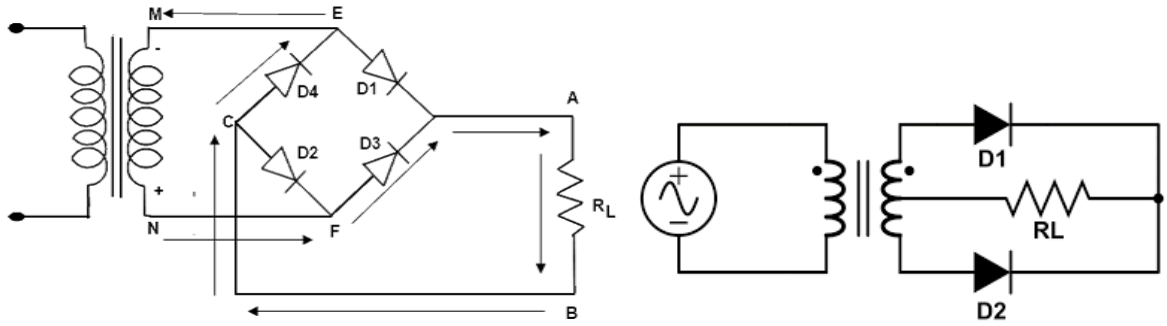
- ضریب شکل و ضریب ریپل ولتاژ خروجی را در تمام حالت‌های بالا بدست آورده و نتایج را در حالت‌های ذکر شده با هم مقایسه کنید.
- چرا جریان ورودی در سه حالت اشاره شده متفاوت است؟
- تاثیر مقدار ظرفیت خازنی در شکل‌موج ولتاژ خروجی و جریان ورودی چیست؟
- تاثیر مقاومت بار در شکل‌موج ولتاژ خروجی و جریان ورودی چیست؟
- همان طور که در نتایج مشاهده می‌کند، جریان ورودی در یکسوساز نیم موج مقدار متوسط (dc) قابل توجهی دارد، فکر می‌کنید جریان dc در شبکه برق ac چه مشکلاتی می‌تواند ایجاد کند؟

آزمایش شماره ۲ یکسوساز تمام موج دیودی

هدف آزمایش: آشنایی با نحوه عملکرد یکسوساز تمام موج دیودی و مقایسه آن با یکسوساز نیم موج

کلیات و تئوری: همان طور که در آزمایش قبلی مشاهده کردید، یکسوساز نیم موج دیودی دارای مشکلاتی است که از آن جمله می‌توان به ضریب ریپل و ضریب شکل بالا (تشابه کمتر به شکل موج dc ایده‌آل) و همچنین وجود مقدار متوسط در جریان ورودی (چرا عیب محسوب می‌شود؟) اشاره کرد. در این آزمایش، یکسوساز تمام موج دیودی (به عنوان یکسوساز بهبود یافته نسبت به نیم موج) پیاده‌سازی شده و آزمایش می‌شود تا نحوه عملکرد و و فرق آن با نوع نیم موج آشکار شود.

یکسوساز تمام موج به دو صورت در عمل قابل پیاده‌سازی است که در شکل زیر مشاهده می‌شود. یک حالت این است که از ترانسفورماتور سروسط و دو دیود به صورت نشان داده شده در شکل (۲-۱-الف) استفاده شود و حالت دیگر استفاده از یک پل دیودی (diode bridge) مطابق شکل (۲-۱-ب) است. پل دیودی شامل چهار دیود است که دو دیود بصورت کاتد مشترک و دو دیود به صورت آند مشترک هستند. از نظر شکل موج خروجی این دو ساختار یکسوساز تمام موج فرقی با همدیگر ندارند.



(ب) (الف)

شکل (۲-۱): یکسوساز تکفاز تمام موج دیودی، (الف) با ترانسفورماتور سر وسط، (ب) با پل دیودی

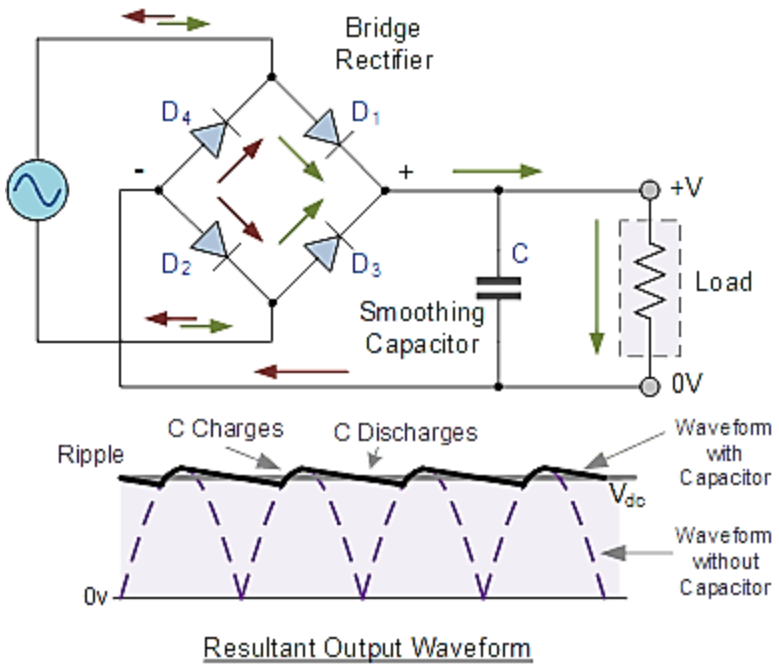
همان طور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، بر خلاف یکسوساز نیم‌موج، در یکسوساز تمام موج قسمت منفی شکل موج نیز قرینه شده و در خروجی ظاهر می‌شود و بنابراین بدیهی است که مقدار متوسط شکل موج خروجی نسبت به نیم موج افزایش پیدا می‌کند. در یکسوساز تمام موج روابط زیر را می‌توان نوشت:

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \qquad (۱-۲)$$

که در آن، V_m دامنه ولتاژ ورودی یکسوساز و ω فرکانس زاویه‌ای آن است.

مقدار موثر ولتاژ خروجی (V_{rms}) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_m^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \qquad (۲-۲)$$

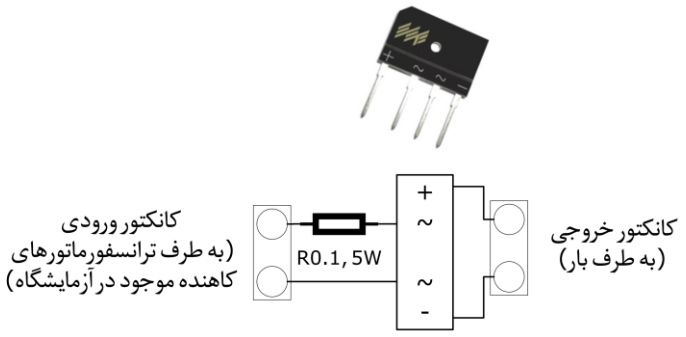


شکل (۲-۲): یکسوساز تکفاز تمام موج با پل دیودی و شکل‌موج ولتاژ خروجی آن

شرح آزمایش:

مدار را طبق نقشه زیر روی برد سوراخدار پیاده‌سازی کنید. توجه کنید که که به جای یک پل دیودی آماده می‌توان از چهار دیود استفاده کرد ولی برای راحتی پیاده‌سازی در آزمیشگاه از پل دیودی آماده استفاده می‌شود. بعد از لحیم‌کاری و پیاده‌سازی مدار و اطمینان از درستی آن و بعد از کنترل آن توسط استاد درس، قبل از اتصال ترانسفورمانور به برق، خروجی ترانسفورماتور کاهنده را به کانکتور ورودی یکسوساز وصل کنید. در حالت‌های زیر، عکس شکل موج ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی، ولتاژ دو سر یکی از دیودها (ولتاژ آند نسبت به کاتد) و همچنین جریان ورودی یکسوساز (ولتاژ دو سر مقاومت سری) را ذخیره کرده و در گزارش کار خود استفاده کنید.

توجه: حتماً از قسمت اندازه‌گیری اسیلوسکوپ استفاده کرده و مقادیر متوسط و موثر تمام شکل موج‌ها را در کنار شکل‌موج داشته باشید.



شکل (۲-۳): مدار آزمایشگاهی یکسوساز تک فاز تمام موج با پل دیودی

الف) بار اهمی

در این حالت، مقاومت بار را به کانکتور خروجی وصل کرده و سپس مدار را تغذیه کنید. شکل موج‌های اشاره شده در بالا را ثبت کنید.

ب) حالت بدون بار و دارای خازن فیلتر

در این حالت، خازن الکترولیتی دارای پلاریته را با رعایت پلاریته به خروجی مدار وصل کنید ولی بار (مقاومت) به خروجی وصل نکنید. در این حالت نیز تمام شکل موج‌های فوق را ثبت کنید.

ج) حالت دارای بار و خازن فیلتر

در این حالت، هم خازن و هم مقاومت بار را به خروجی وصل کرده و دوباره شکل موج‌های اشاره شده را ثبت کنید.

گزارش کار کامل از آزمایش تهیه کرده و تا شروع آزمایش بعدی به استاد درس ارسال کنید. در تهیه گزارش کار حتماً به موارد زیر دقت کنید.

- ضریب شکل و ضریب ریپل ولتاژ خروجی را در تمام حالت‌های بالا بدست آورده و نتایج را در حالت‌های ذکر شده با هم مقایسه کنید. همچنین نتایج بدست آمده از این آزمایش را با آزمایش قبلی مقایسه کنید.

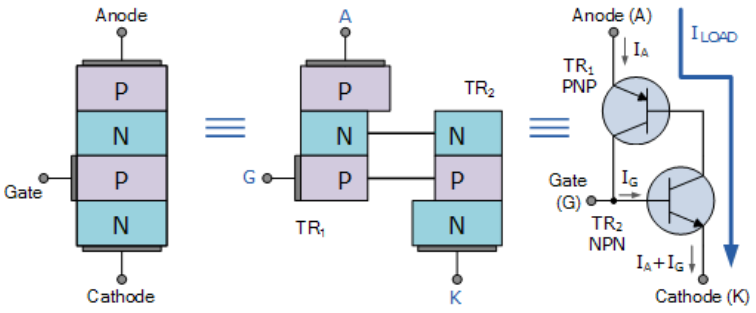
- چرا جریان ورودی در سه حالت اشاره شده متفاوت است؟
- تاثیر مقدار ظرفیت خازنی در شکل‌موج ولتاژ خروجی و جریان ورودی چیست؟
- تاثیر مقاومت بار در شکل‌موج ولتاژ خروجی و جریان ورودی چیست؟
- همان طور که در نتایج مشاهده می‌کند، جریان ورودی در یکسوساز نیم موج مقدار متوسط (dc) قابل توجهی ندارد، دلیل چیست؟ آیا این مزیت این یکسوساز نسبت به یکسوساز نیم موج است؟

آزمایش شماره ۳ آشنایی با عملکرد تریستور

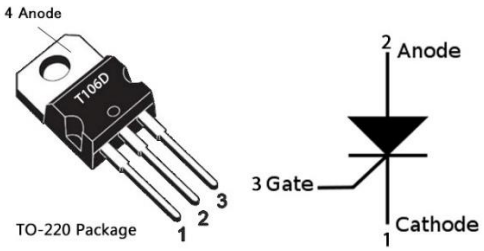
هدف آزمایش: آشنایی با تریستور و نحوه عملکرد و روشن و خاموش شدن آن

کلیات و تئوری: تریستور یا تایریستور (Thyristor)، یک نیمه‌رسانای قدرت سه پایه است که به صورت یک قطعه چهارلایه‌ای P-N-P-N ساخته می‌شود که در شکل (۳-۱-الف) نشان داده شده است. تریستور سه پایانه آند، کاتد و گِیت دارد. پایه آند با A، کاتد با K، و گیت با G نمایش داده می‌شوند (شکل ۳-۱-ب). ترتیب پایه‌ها در تریستورهای موجود در بازار نوعاً به صورت نشان داده شده در شکل (۳-۱-ب) است یعنی اگر از روبرو به تریستور نگاه شود، پایه‌های آن به ترتیب، کاتد، آند و گیت هستند. باید توجه شود که بدنه تریستور نیز به آند وصل است و این نکته باید در مدارهای ولتاژ بالا حتماً مدنظر قرار گرفته و بدنه با عایق‌های مخصوص از گرماگیر (هیت سینک) از لحاظ الکتریکی عایق شود.

آند و کاتد به مدار قدرت متصل می‌شوند و گیت به مدار کنترل وصل شده و جریان به مراتب کمتری می‌کشد. از تریستور در دو حالت پایدار روشن و خاموش استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۳-۱): (الف) ساختار نیمه‌هادی تریستور، (ب) نماد مداری و آرایش پایه‌های تریستورهای موجود در بازار

تریستور مشابه رله عمل می‌کند. همانگونه که در رله با اعمال ولتاژ به سیم‌پیچ، کنتاکتِ بازِ رله بسته می‌شود، در تریستور نیز با اعمال ولتاژ به پایه‌های کاتد و گِیت، جریان بین پایه‌های آند و کاتد برقرار می‌شود. از تفاوت‌های تریستور و رله این است که رله یک کلید الکترومکانیکی است اما تریستور یک کلید الکترونیکی که صدا و جرقه تولید نمی‌کند. از طرف دیگر تریستور یک کلید یک‌جهته است و جریان در آن همیشه از آند به کاتد برقرار می‌شود و اگر بخواهیم جریان دوطرفه داشته باشیم باید دو تریستور را، یکی برعکس دیگری، با هم موازی کنیم. تفاوت دیگر تریستور و رله در این است که بر خلاف رله‌ها که با قطع ولتاژ سیم‌پیچ، رله خاموش می‌شود، تریستور با قطع ولتاژ گیت خاموش نخواهد شد و باید آن را خاموش کرد.

برای اینکه تریستور در وضعیت هدایت قرار بگیرد باید شرایط زیر برقرار باشد:

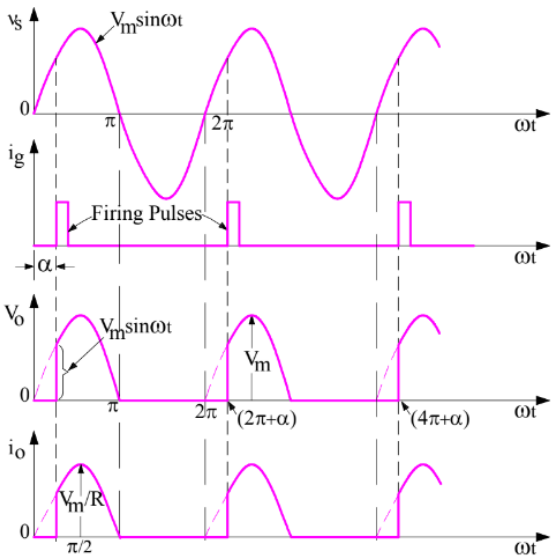
- ولتاژ آند نسبت به کاتد مثبت باشد.
- گیت یک پالس مثبت دریافت کند (ولتاژ گیت بیشتر از ولتاژ کاتد شود).

برای روشن ماندن تریستور جریان آند باید به اندازه کافی زیاد (بیشتر از جریان نگهدارنده (holding current)) باش که مقدار این جریان در برگه اطلاعات هر تریستور توسط سازنده مشخص شده است.

مداری که پالس جریان گیت را تولید می‌کند مدار آتش می‌نامند. پس از روشن‌شدن تریستور ولتاژ آند-کاتد بسیار ناچیز خواهد شد به طوری که در مقاصد عملی $V_{AK}\approx 0$ در نظر می‌گیرند و می‌توان گفت که تریستور در هنگام هدایت تقریباً مانند یک اتصال‌کوتاه عمل می‌کند. تریستور بسیار سریع روشن می‌شود، به مدت‌زمان لازم برای روشن کردن تریستور زمان روشن‌سازی می‌گویند که با t_{on} نمایش داده می‌شود و حدود ۱ تا ۳ میکروثانیه است. پهنای پالس جریان اعمالی به گیت که برای روشن‌شدن تریستور استفاده می‌شود حدود ۱۰ تا ۵۰ میکروثانیه است و دامنه‌ای حدود ۲۰ تا ۲۰۰ میلی‌آمپر دارد.

زاویه آتش

برای موج‌های متناوب ورودی می‌توان محور افقی که بیان‌گر فازِ موج است را برحسب درجه از صفر تا ۳۶۰ تقسیم‌بندی کرد (معادل صفر تا رادیان. اگر شرط مثبت بودن آند نسبت به کاتد برقرار باشد، می‌توان پالس اعمالی به گیت را به گونه‌ای تنظیم کرد که در لحظه‌ای به‌خصوص از شکل موج ورودی تریستور روشن شود که این لحظه معادل زاویه‌ای معین خواهد بود. به این زاویه، زاویه آتش تریستور می‌گویند. با تعیین زاویه آتش مناسب می‌توان مقدار مؤثر ولتاژ خروجی را تغییر داد که از آن در مدارهای کنترل دور موتورهای جریان مستقیم، یکسوکننده‌های کنترل‌شده و راه‌اندازهای نرم استفاده می‌شود. مفهوم زاویه آتش در شکل (۳-۲) قابل درک است.



شکل (۳-۲): مفهوم زاویه آتش و شکل موج ولتاژ ورودی، جریان گیت، ولتاژ خروجی و جریان خروجی در یک تریستور متصل به یک بار مقاومتی

روشن‌شدن با تغییر ناگهانی ولتاژ

اگر به صورت ناگهانی ولتاژ مستقیم زیادی به تریستور اعمال شود، حتی بدون وجود جریان گیت، تریستور ممکن است روشن شود، این پدیده را روشن‌سازی dv/dt می‌نامند که ممکن است در عملکرد مدارها مشکل ایجاد کند. برای جلوگیری از این اتفاق از یک مدار حفاظتی (اسنابر مقاومتی-خازنی RC) به همراه تریستور استفاده می‌شود.

خاموش‌شدن تریستور

به روش‌های خاموش‌کردن تریستور *کموتاسیون* می‌گویند. در مدارهای جریان متناوب به علت تغییر خودکار پلاریته دو سر آند و کاتد، تریستور به صورت خودکار خاموش می‌شود که به این حالت *کموتاسیون طبیعی* می‌گویند. در مقابل اگر جریان بالاجبار صفر شود *کموتاسیون اجباری* رخ داده است.

برای خاموش‌کردن تریستوری که روشن‌شده‌است باید یکی از شرایط زیر برقرار شود.

۱. ولتاژ آند نسبت به کاتد منفی شود.

۲. جریان عبوری از آند قطع شود (به کمتر از مقدار بحرانی برسد).

اگر تریستور روشن شده باشد، با به صفر رسیدن جریان گیت، خاموش نخواهد شد. در روش اول خاموش کردن تریستور، دو پیوند از سه پیوند آن در بایاس معکوس قرار می‌گیرند و پیوند سوم بایاس مستقیم خواهد داشت، در این حالت تریستور جریان نشتی کمی از خود نشان می‌دهد. اگر ولتاژ معکوس بیش از حد زیاد شود و مقدار آن به ولتاژ فروپاشی معکوس برسد، پدیده بهمنی در تریستور رخ خواهد داد که در صورت محدودنشدن، بر اثر تلفات توان ممکن است به تریستور آسیب برسد. در روش دوم، به جریان بحرانی آند که اگر از آن عبور کنیم تریستور خاموش می‌شود *جریان نگهدارنده* می‌گویند و آن را با I_h نمایش می‌دهند؛ در این حالت تریستور به حالت سدکننده مستقیم بازمی‌گردد.

مدار کموتاسیون

اگر بخواهیم به صورت ناگهانی جریان تریستور را در یک لحظه مشخص قطع کنیم، باید آن را در بایاس معکوس قرار دهیم (V_{AK} منفی شود). برای انجام این کار که به آن کموتاسیون اجباری می‌گویند، از مدار کموتاسیون استفاده می‌شود. در بیشتر مدار کموتاسیون خازنی از پیش شارژشده وجود دارد که ولتاژ آن به دو سر تریستور اعمال می‌شود تا در بایاس معکوس قرار بگیرد. پس از اعمال این ولتاژ جریان آند تریستور به سرعت کاهش یافته تا اینکه صفر می‌شود و برای لحظاتی جریان معکوس نیز برقرار می‌گردد .مدتی طول می‌کشد تا تریستور بتواند دوباره ولتاژ مستقیم را سد کند. مدت زمان بین صفرشدن جریان آند تا لحظه آماده شدن تریستور برای سد ولتاژ مستقیم را *زمان خاموش‌شدن* تریستور می‌گویند.

زمان خاموش‌شدن

اگر بلافاصله پس از صفرشدن جریان آند تریستور، ولتاژ بایاس مستقیم به آن اعمال شود، حتی با وجود صفر بودن جریان گیت، تریستور ممکن است دوباره هدایت کند .برای آنکه تریستور بتواند ولتاژ بایاس مستقیم را سد کند، باید برای مدتی معین تریستور را در حالت بایاس معکوس قرار داد. این مدت را که با t_{off} نمایش می‌دهند، *زمان خاموش‌شدن* تریستور می‌گویند. به عبارت دیگر زمان خاموش‌شدن تریستور، حداقل زمانی است که از لحظه صفرشدن جریان آند تا آمادگی تریستور برای سد ولتاژ مستقیم طول می‌کشد.

اگر تریستور در دسته کلیدهای کند قرار می‌گیرد و اگر تریستور در دسته کلیدهای سریع قرار می‌گیرد.

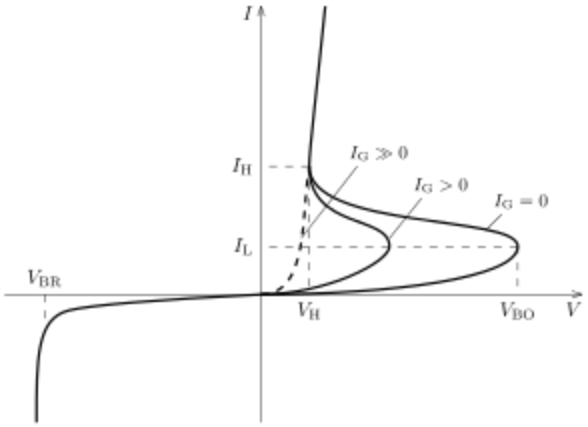
زمان قطع مدار

به فاصله زمانی بین لحظه صفرشدن جریان آند تا لحظه اعمال دوباره ولتاژ مستقیم به دو آند و کاتد، *زمان قطع مدار* می‌گویند و با t_q نمایش می‌دهند. در مدارهای عملی باید طراحی به گونه‌ای انجام شود که زمان قطع مدار از

زمان خاموش‌شدن دیود بیشتر باشد یعنی $t_q>t_{off}$ باشد، در غیر این صورت تریستور، ناخواسته روشن خواهد شد که به این حالت *کموتاسیون ناموفق* می‌گویند.

مشخصه ولتاژ-جریان

مشخصه نوعی جریان-ولتاژ تریستور در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. اگر جریان گیت تریستور (i_g) صفر و ولتاژ آند بیشتر از کاتد باشد، دو پیوند از سه پیوند نیمه‌هادی‌های موجود در تریستور در بایاس مستقیم قرار می‌گیرند، اما یکی از پیوندها در بایاس معکوس است و تریستور در مقابل جریان مقاومت زیادی از خود نمایش می‌دهد. اگر افزایش ولتاژ آند نسبت به کاتد ادامه پیدا کند، به ولتاژ بحرانی خواهد رسید و تریستور به مرحله هدایت قوی می‌رسد. این ولتاژ بحرانی را در تریستور *ولتاژ شکست مستقیم* یا *ولتاژ فروپاشی* می‌گویند. در شکل رو به رو این ولتاژ با V_{BO} نمایش داده شده‌است. با اعمال جریان به پایانه گیت می‌توان ولتاژ فروپاشی مستقیم را کاهش داد و در صورتی که این افزایش به اندازه کافی زیاد باشد ناحیه سد مستقیم به کلی از بین خواهد رفت و تریستور مشابه یک دیود عمل خواهد کرد.



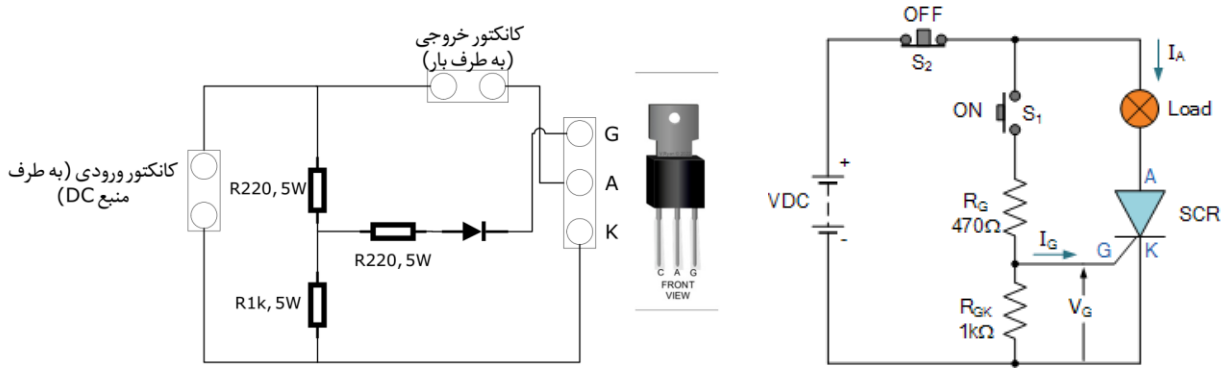
شکل (۳-۳): منحنی مشخصه ولتاژ-جریان تریستور.

اگر نرخ تغییرات جریان تریستور (di/dt) زیاد باشد، تریستور می‌سوزد. برای حفاظت تریستور در برابر تغییرات ناگهانی جریان از یک اندوکتانس (سلف) قبل از آن استفاده می‌کنند. میزان مجاز di/dt توسط کارخانه‌های سازنده تریستور اعلام می‌شود.

شرح آزمایش:

مدار نشان داده شده در شکل زیر در بردهای سوراخدار که در اختیارتان گذاشته می‌شود، ببندید. توجه کنید که همانند آزمایش‌های قبل، برای ورودی و خروجی ترمینال قرار می‌دهید تا اتصال بار و منبع به مدار به راحتی امکان‌پذیر باشد. کلید S1 از نوع کلید فشاری (push button) بهتر است قرار داده شود. وجود کلید S2 ضروری نیست. همچنین تاکید می‌شود برای اتصال تریستور به مدار از لحیم‌کاری مستقیم تریستور به مدار اجتناب کرده و از کانکتور سه پایه برای این کار استفاده کنید. در اتصال کانکتور به مدار، به ترتیب پایه‌های تریستوری که پایه‌های آن داخل کانکتور قرار خواهد گرفت حتماً باید توجه شود. مراحل زیر را انجام داده و با ثبت شکل موج ولتاژ دو سر بار، مشاهدات خود را شرح دهید.

- در مرحله اول آزمایش، اسیلوسکوپ را دو سر بار وصل کرده و بدون فشار دادن کلید، منبع dc را از صفر تا ۳۰ ولت افزایش دهید. مشاهدات خود را یادداشت کنید. آیا تریستور روشن می‌شود؟ چرا؟
- در مرحله دوم، کلید را فشار داده و نگه دارید و همزمان ولتاژ منبع dc را از صفر تا ۳۰ ولت افزایش دهید. مشاهدات و شکل موج ولتاژ دو سر بار را ثبت کنید.
- در مرحله سوم کلید را قطع کنید و باز هم شکل موج ولتاژ خروجی را ثبت کنید، آیا تریستور خاموش می‌شود؟ چرا؟
- در مرحله چهارم در حالی که کلید خاموش است، مقدار ولتاژ منبع dc را به آرامی کاهش دهید تا تریستور خاموش شود. چه نتیجه‌ای در مورد خاموش شدن تریستور می‌گیرید؟



شکل (۳-۴): مدار آزمایشگاهی تریستور

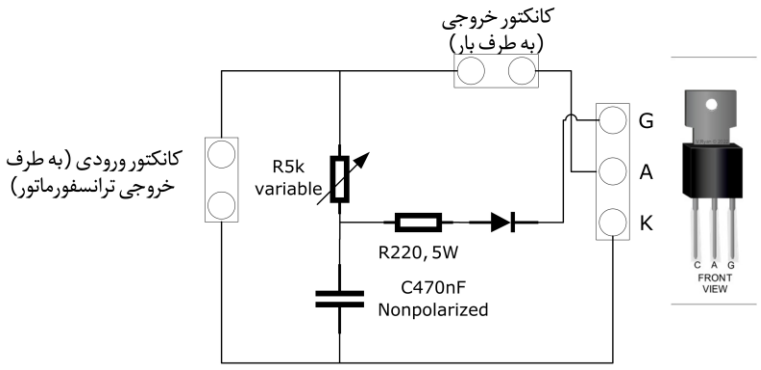
آزمایش شماره ۴: یکسوساز تریستوری

هدف آزمایش: آشنایی با تریستور و نحوه عملکرد و روشن و خاموش شدن آن

کلیات و تئوری: در یکسوسازهای تریستوری برخلاف یکسوسازهای دیودی، می‌توان با کنترل زاویه آتش تریستور مقدار متوسط و موثر ولتاژ خروجی (ولتاژ بار) را تغییر داد. از این ویژگی می‌توان در بسیاری از کاربردهای عملی مانند کنترل سرعت موتورهای DC و کنترل روشنایی لامپ استفاده کرد. در این آزمایش، با کنترل زاویه آتش در یک یکسوساز تریستوری آشنا می‌شوید.

شرح آزمایش:

مدار مورد نظر در این آزمایش، با اعمال تغییراتی در مدار آزمایش قبلی بدست می‌آید. با اعمال تغییرات مورد نیاز در مدار قبلی، مدار زیر را پیاده‌سازی کنید:



شکل (۴-۱): مدار آزمایشگاهی یکسوساز تریستوری

اسیلوسکوپ را به دو سر بار وصل کرده و مدار را از طریق کانکتور ورودی، به خروجی ترانسفورماتور کاهنده وصل کنید. با تغییر مقاومت متغیر، زاویه آتش تریستور تغییر یافته و بنابراین مقدار متوسط و موثر ولتاژ خروجی تغییر می‌یابد. با تغییر مقاومت متغیر، حداقل و حداکثر مقدار زاویه آتش این مدار عملی را از روی شکل موج ولتاژ خروجی محاسبه کنید. همچنین، شکل موج ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی (در سه زاویه آتش مختلف) و مقادیر متوسط و موثر آن، ولتاژ دو سر تریستور (ولتاژ آند نسبت به کاتد)، جریان گیت را ثبت کنید. در گزارش کار، نتایج و شکل موج‌های ثبت شده را به طور کامل شرح دهید و به سوالات زیر پاسخ دهید.

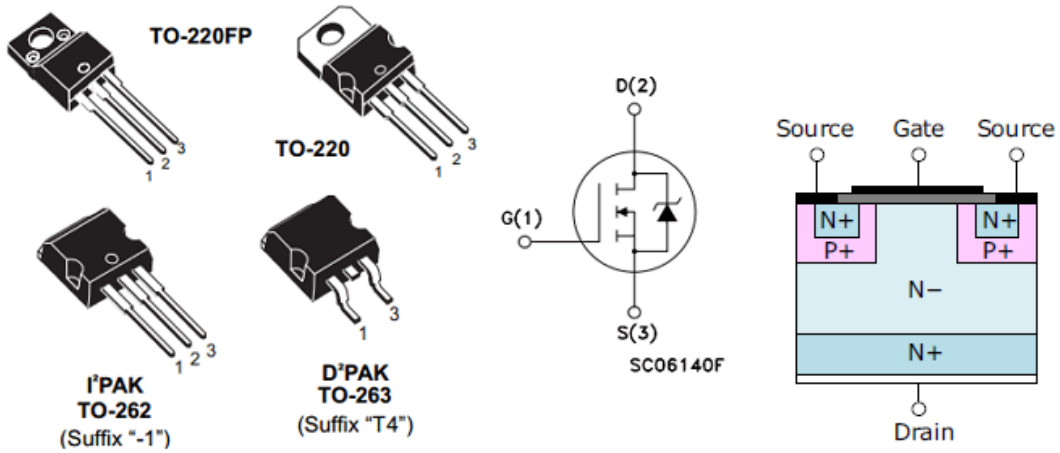
- زاویه آتش چه تاثیری در مقدار متوسط و موثر ولتاژ خروجی دارد؟
- چرا شکل موج جریان گیت سوزنی است؟

- چرا خازن به کار رفته در مدار باید از نوع بدون پلاریته باشد؟
- در سه زاویه آتش مختلفی که آزمایش انجام شد، ضریب شکل و ضریب ریپل ولتاژ خروجی را محاسبه کنید. ضریب ریپل چه ارتباطی با زاویه آتش دارد؟

آزمایش شماره ۵: آشنایی با عملکرد IGBT/MOSFET (یک جلسه)

هدف آزمایش: آشنایی با IGBT یا MOSFET و عملکرد و چگونگی روشن و خاموش کردن آن

کلیات و تئوری: ترانزیستور اثرِ میدانیِ نیم‌رسانا اکسید-فلز[3] یا ماسفِت (MOSFET) معروف‌ترین ترانزیستور اثر میدان در مدارهای الکترونیک آنالوگ و دیجیتال است. اصطلاح «اکسید-فلز» را نباید به اشتباه «اکسیدِ فلز» خواند. دلیل این نام‌گذاری این است که در ساختمان این ترانزیستور، یک لایه اکسیدِ سیلیسیوم (SiO_2) در زیر اتصال فلزیِ پایه گِیت قرار گرفته‌است (شکل زیر را ببینید).



شکل (۵-۱): ساختار نیمه‌هادی، نماد مداری و پکیج‌های صنعتی رایج برای MOSFET

این گونه از ترانزیستور اثر میدان نخستین بار در سال ۱۹۲۶میلادی معرفی شد. در آن هنگام، ساخت و به‌کارگیری این ترانزیستورها، به سبب نبود علم و ابزار و امکان، با دشواری همراه بود و از همین روی، برای پنج دهه فراموش شدند و از میدانِ پیشرفت‌های الکترونیک بر کنار ماندند. در آغازِ دهه ۷۰، بارِ دیگر نگاه‌ها به ماسفت‌ها افتاد و برای ساختنِ مدارهای مجتمع به کار گرفته شدند.

در مدارهای الکترونیکی، ترانزیستور اثر میدان (FET) را با سه‌پایه به نام‌های گِیت (Gate)، دِرِین (Drain)، و سورس (Source) در نظر می‌گیرند. در این ترانزیستور، گیت (پایه کنترلی)، جریانی نمی‌کشد، و چنان‌که از نام ترانزیستور پیداست، تنها با اعمال ولتاژ و ایجاد میدان الکتریکی درون نیم‌رسانا، جریان عبوری از FET کنترل می‌شود. از همین روی، وقتی گیت به عنوان ورودی این ترانزیستور در نظر گرفته می‌شود، هیچ اثر بارگذاری بر روی طبقات قبلی خود در مدار نمی‌گذارد و ترانزیستور در این حالت امپدانس ورودی بسیار بالایی دارد. عمده

[3] Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)

تفاوت ماسفت با ترانزیستور JFET در این است که گیت ترانزیستورهای ماسفت توسط لایه‌ای از اکسید سیلیسیم (SiO_2) از کانال مجزا شده‌است. به این دلیل به ماسفت‌ها، فِت با گیت مجزا (IGFET)[4] نیز گفته می‌شود.

مدارهای مجتمع بر پایه فناوری ماسفت را می‌توان بسیار ریزتر و ساده‌تر از مدارهای مجتمع بر پایه ترانزیستورهای دوقطبی ساخت، بی آن که (حتی در مدارها و تابع‌های پیچیده و مقیاس‌های بزرگ) نیازی به مقاومت، دیود یا دیگر قطعه‌های الکترونیکی داشته باشند. همین ویژگی، تولیدِ انبوهِ آن‌ها را آسان می‌کند، چندان که هم‌اکنون بیش از ۸۵ درصدِ مدارهای مجتمع، بر پایه فناوریِ MOS طراحی و ساخته می‌شوند.

ترانزیستورهای MOS، بسته به کانالی که در آن‌ها شکل می‌گیرد، کانال N یا کانال P نامیده می‌شوند. در آغازِ کار، کانال P ترانزیستورِ پرکاربردتر در فناوری MOS بود. اما از آن جا که ساختنِ کانال N آسان‌تر است و مساحتِ کم‌تری هم می‌گیرد، از کانال P پیشی گرفت. بر خلافِ ترانزیستورهای دوقطبی، در ترانزیستورهای ماسفت، جریان، نتیجه شارشِ تنها یک حامل (الکترون یا حفره) در میانِ پیوندها است و از این رو، این ترانزیستورها را تک‌قطبی هم می‌نامند.

فت دارای سه‌پایه با نام‌های درینD ، سورس S و گیت G است که پایه گیت، جریان عبوری از درین به سورس را کنترل می‌کند. فت‌ها دارای دو نوع N کانال و P کانال هستند. در فت نوع N کانال زمانی که گیت نسبت به سورس مثبت باشد جریان از درین به سورس عبور می‌کندFET .ها معمولاً بسیار حساس بوده و حتی با الکتریسیته ساکن بدن نیز تحریک می‌گردند. به همین دلیل نسبت به نویز بسیار حساس هستند. نوع دیگر ترانزیستورهای اثر میدانی ماسفت‌ها هستند. یکی از اساسی‌ترین مزیت‌های ماسفت‌ها نویز کمتر آن‌ها در مدار است.

برای تست کردن فت کانال N با مولتی‌متر، نخست پایه گیت را پیدا می‌کنیم؛ یعنی پایه‌ای که نسبت به دوپایه دیگر در یک جهت مقداری رسانایی دارد و در جهت دیگر مقاومت آن بی‌نهایت است. معمولاً مقاومت بین پایه درین و گیت از مقاومت پایه درین و سورس بیشتر است که از این طریق می‌توان پایه درین را از سورس تشخیص داد.

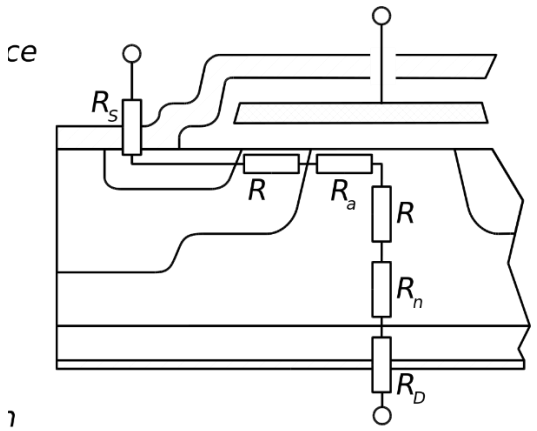
ماسفت قدرت[5] نوعی خاصی از ترانزیستور ماسفت است که به منظور کارکرد در توان‌های بالا طراحی شده‌است.

[4] Insulated Gate FET (IGFET)
[5] Power MOSFET or VMOSFET

در مقایسه با دیگر ادوات الکترونیک قدرت مانند (IGBT) یا تریستور، مهم‌ترین مزایای ماسفت قدرت، سرعت سوئیچینگ بالا و کارایی خوب در ولتاژهای پایین است. همانند IGBT، در ماسفت قدرت هم از گیت عایق شده‌استفاده شده‌است که این امر عمل راه اندازی ترانزیستور را آسان می‌کند. این ماسفت در بهره کم نیز بکار می‌رود تا جایی که بعضاً لازم است ولتاژ گیت ترانزیستور بیشتر از ولتاژ تحت کنترل باشد.

ماسفت قدرت، پرکاربردترین کلید مورد استفاده در ولتاژهای پایین (کمتر از ۲۰۰ ولت) است که معمولاً در مدارات منابع تغذیه، مبدل‌های DC به AC و کنترل‌کننده‌های موتور بکار می‌رود.

زمانی که ماسفت قدرت در حالت روشن قرار دارد، مقاومتی را مابین پایه‌های درین و سورس از خود نشان می‌دهد. همانطورکه در شکل (۵-۲) دیده می‌شود، این مقاومت که $R_{DS,on}$ نامیده می‌شود، مجموعی از چندین مقاومت است.



شکل (۵-۲): اجزای تشکیل دهنده مقاومت حالت روشن درین-سورس ماسفت ($R_{DS,on}$)

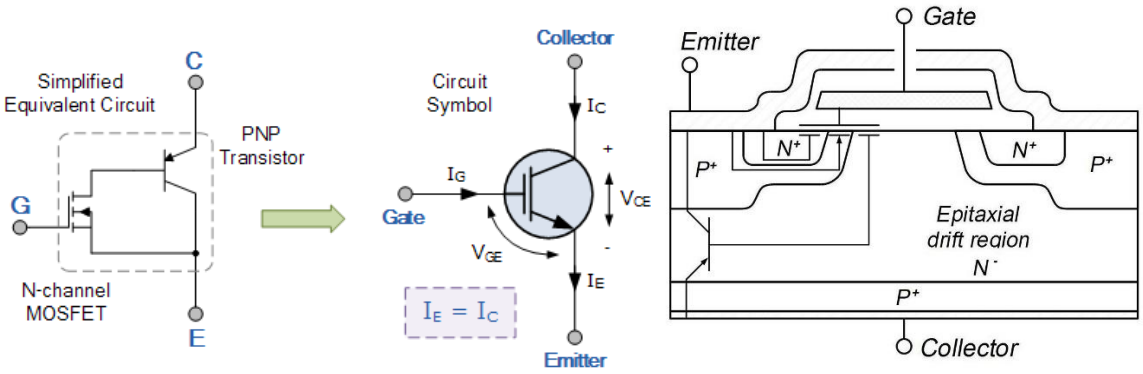
ترانزیستور دو قطبی با گِیت عایق شده (IGBT)[6] از نیمه‌هادیهای قدرت است که دارای قابلیت عملکرد در ولتاژها و جریان‌های بالا و نیز سوئیچینگ سریع است. این ترانزیستور در بسیاری از لوازم مدرن از جمله خودروی برقی، قطار، یخچال‌ها، دستگاه‌های تهویه مطبوع، سیستم‌های استریو و تقویت کننده‌های قدرت استفاده می‌شود. همچنین در ساخت اینورترها، ترانس جوشکاری و منبع تغذیه UPS نیز کاربرد دارد.

با سوییچ کردن ترانزیستورها در فرکانس‌های بالا می‌توان از آن‌ها برای کنترل سطح ولتاژ DC استفاده کرد. به این منظور، ترانزیستور باید بتواند ولتاژها و جریان‌های زیاد و نیز فرکانس سوئیچینگ زیاد را تحمل کند. به همین دلیل برای این منظور از از ترانزیستور ماسفت قدرت (Power Mosfet) استفاده می‌شود. اما با بالا رفتن قدرت،

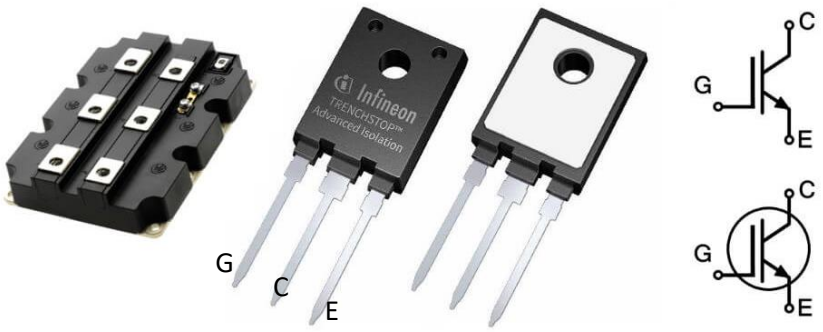
[6] Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

تلفات آن زیاد می‌شود. برای رفع این مشکل از IGBT استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر به دلیل ارزانی و مزایای این قطعه از آن استفاده زیادی شده‌است.

همان طور که در شکل (۵-۳) نشان داده شده است، IGBT ترکیبی از دو ترانزیستور BJT و ماسفت است. IGBT از دید ورودی، یک ماسفت، و از دید خروجی یک BJT است. BJT و ماسفت دارای خصوصیاتی هستند که از نقطه نظرهایی یکدیگر را تکمیل می‌کنند.



(الف)



(ب)

شکل (۵-۳): (الف) ساختار نیمه‌هادی و مدار معادل IGBT، (ب) شکل مداری و پکیج‌های صنعتی موجود برای IGBT

BJTها در حالت روشن (وصل) دارای تلفات هدایتی کمتری هستند، درحالیکه زمان سوئیچینگ آن‌ها به خصوص هنگام خاموش شدن طولانی‌تر است. ماسفت‌ها قادرند که به مراتب سریعتر قطع و وصل شوند، بنابراین تلفات هدایت آن‌ها بیشتر است IGBT .ترانزیستوری است که مزایای BJT و ماسفت را باهم دارد؛ مانند

- امپدانس ورودی بالا (مانند ماسفت)
- افت ولتاژ و تلفات کم مانند (BJT)
- ولتاژ حالت روشن (وصل) کم مانند (BJT)

نام پایه‌های IGBT هم از نام پایه‌های BJT و ماسفت گرفته شده‌است؛ گِیت از ماسفت، و کلکتور و امیتر هم از BJT گرفته شده است. سرعت سوییچ کردن IGBT محدود است، به‌طور نمونه 1KHz تا 50KHz که در کل بین سرعت کلیدزنی BJT و ماسفت قرار می‌گیرد.

مهم‌ترین و تقریباً تنها کارایی IGBT، سوییچینگ جریان‌های بالا است.

در جدول زیر سه نوع کلید مهم الکترونیک قدرت با هم مقایسه شده‌اند.

جدول (۵-۱): مقایسه IGBT، ماسفت قدرت و BJT قدرت

مشخصه قطعه	BJT قدرت	ماسفت قدرت	IGBT
بازه ولتاژ	High <1kV	High <1kV	Very high >1kV
بازه جریان	High <500A	High >500A	High >500A
Input drive	Current ratio h_{FE} ۲۰– ۲۰۰	Voltage V_{GS} 3-10 V	Voltage V_{GE} 4-8 V
امپدانس ورودی	Low	High	High
امپدانس خروجی	Low	Medium	Low
سرعت سوئیچینگ	Slow (µs)	Fast (ns)	Medium
هزینه	Low	Medium	High

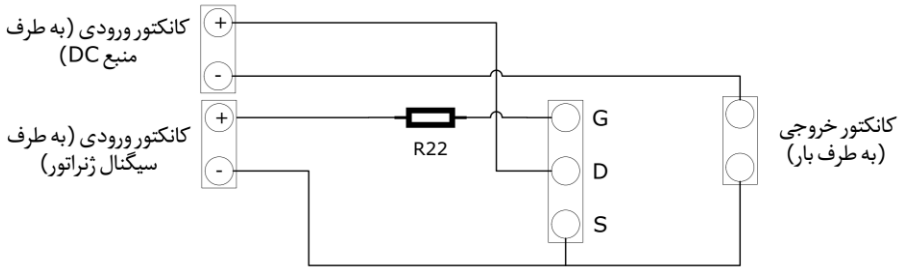
شرح آزمایش:

مدار شکل زیر را روی برد سوراخدار ببندید. بعد از کنترل اتصالات مدار و اطمینان از درستی آن‌ها، بار و منبع تغذیه را وصل کنید. فعلاض منبع تغذیه باید خاموش باشد. با اتصال سیگنال ژنراتور به اسیلوسکوپ، یک پالس مربعی با دامنه ۱۰ ولتی و فرکانس ۲۰ تا ۳۰ کیلوهرتز و چرخه کاری (duty cycle) ٪۵۰ را تنظیم کنید. پس از حصول اطمینان از سیگنال مربعی، خروجی سیگنال ژنراتور را به کانکتور مربوط به خودش متصل کنید. سپس اسیلوسکوپ را به دو سر بار وصل کنید. منبع تغذیه را روش کرده و ولتاژ آن را به آرامی تا ۳۰ ولت افزایش دهید. مشاهدات خود را ثبت کنبد. همچنین، شکل موج ولتاژ بار، ولتاژ DS ماسفت، ولتاژ GS و جریان گیت ماسفت را ثبت کنبد. در مرحله بعد بدون تغییر در دامنه و فرکانس، چرخه کاری پالس مربعی را تغییر دهید، مشاهدات خود را ثبت کرده و شکل موج‌های اشاره شده یکبار دیگر در یک D متفاوت نیز ثبت کنید. مقدار متوسط ولتاژ خروجی چه تغییری می‌کند؟

در مرحله بعدی آزمایش، در حالی که منبع تغذیه DC همچنان به مدار وصل بوده و روشن است، خروجی سیگنال ژنراتور را قطع کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟

گزارش کار کامل با تفسیر و توضیح کامل مشاهدات و نتایج و شکل‌موج‌ها را تهیه کنید و به سوالات زیر نیز پاسخ دهید.

- یک ماسفت و یا IGBT به چه صورتی روشن و خاموش می‌شود و از این نظر چه تفاوتی با تریستور دارد؟
- همان طور که مشاهده کردید در واقع از ماسفت و یا IGBT برای قطع و وصل جریان استفاده می‌شود. همین کار را یک رله الکترومغناطیسی و یا کنتاکتور هم انجام می‌دهد، آیا می‌توان به جای IGBT و یا ماسفت در مدارهای الکترونیک قدرت از رله و یا کنتاکتور استفاده کرد؟ چرا؟



شکل (۵-۴): مدار آزمایشگاهی برای آشنایی با MOSFET یا IGBT

آزمایش شماره ۶: مبدل DC-DC افزاینده (دو جلسه)

هدف آزمایش: آشنایی با مدار راه‌انداز گیت کلید الکترونیک قدرت و مبدل DC-DC افزاینده

کلیات و تئوری: مبدل DC-DC افزاینده (boost DC-DC converter) یکی از انواع مبدل‌های DC-DC است که برای افزایش ولتاژ DC به کار می‌رود. این نوع مبدل کاربردهای عملی زیادی دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از آن در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی فتوولتاییک اشاره کرد. مدار یک مبدل DC-DC افزاینده در شکل (۶-۱) و برخی از شکل‌موج‌های آن به صورت نوعی در شکل (۶-۲) نشان داده شده است. اساس کار این مبدل به این صورت است که وقتی که کلید روشن است، واضح است که جریان سلف افزایش می‌یابد و به این ترتیب انرژی در میدان مغناطیسی سلف ذخیره می‌شود. هنگامی که کلید خاموش می‌شود، دیود روشن شده و انرژی ذخیره شده در سلف به خروجی راه می‌یابد. با استفاده از قوانین مداری و قانون آمپر-ثانیه و ولت-ثانیه می‌توان ثابت کرد که در حالت عملکرد دائم ولتاژ خروجی بیشتر از ولتاژ ورودی خواهد بود وبدیت ترتیب این یک مبدل افزاینده است. خازن خروجی در این مبدل نقش فیلتری داشته و باعث محدود شدن ریپل ولتاژ خروجی می‌شود. همچنین سلف موجود در مدار علاوه بر عملکرد اصلی خودش که همان ذخیره و انتقال انرژی بود، موجب محدود شدن ریپل جریان ورودی هم می‌شود. در مد جریان پیوسته (که در آن جریان سلف پیوسته است)، رابطه ایده‌آل (منظور از ایده‌آل چیست؟) بین ولتاژ ورودی و خروجی به صورت زیر است:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \qquad (۱-۶)$$

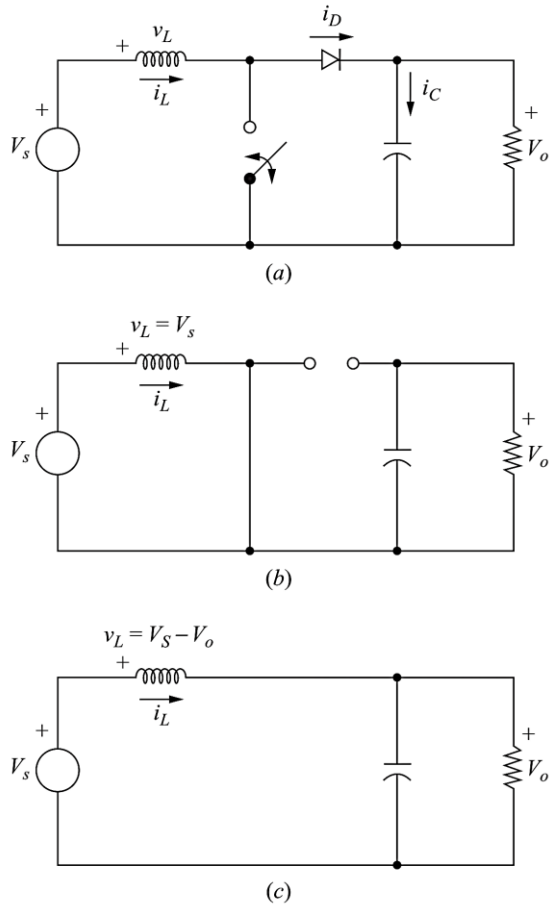
برای طراحی و محاسبه مقدار سلف و خازن در مبدل افزاینده می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$L = \frac{D(1-D)^2}{\Delta i_{L,pu} R f} \qquad (۲-۶)$$

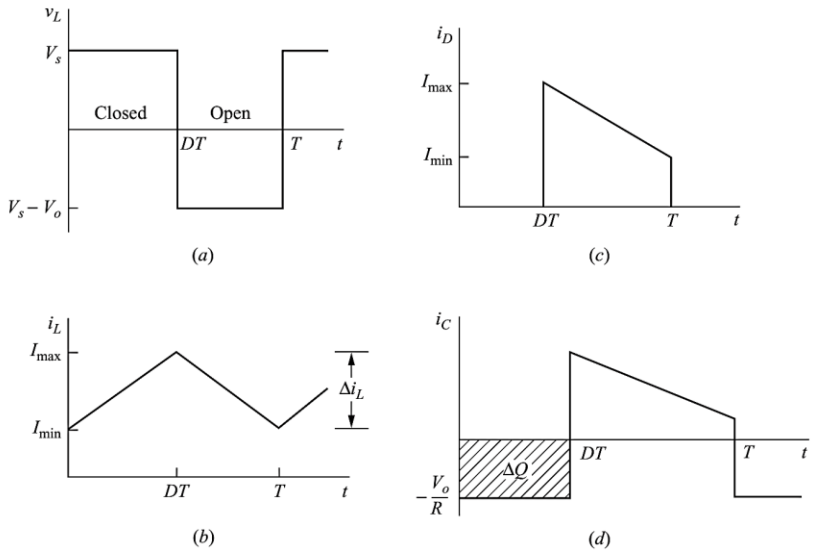
$$C = \frac{D}{R \Delta V_{o,pu} f} \qquad (۳-۶)$$

همچنین مقدار بحرانی سلف برای اینکه جریان آن پیوسته باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2}{2Rf} \qquad (۴-۶)$$



شکل (۶-۱): (الف) مدار مبدل افزاینده، (ب) مدار در مد کلید روشن، (ج) مدار در مد کلید خاموش



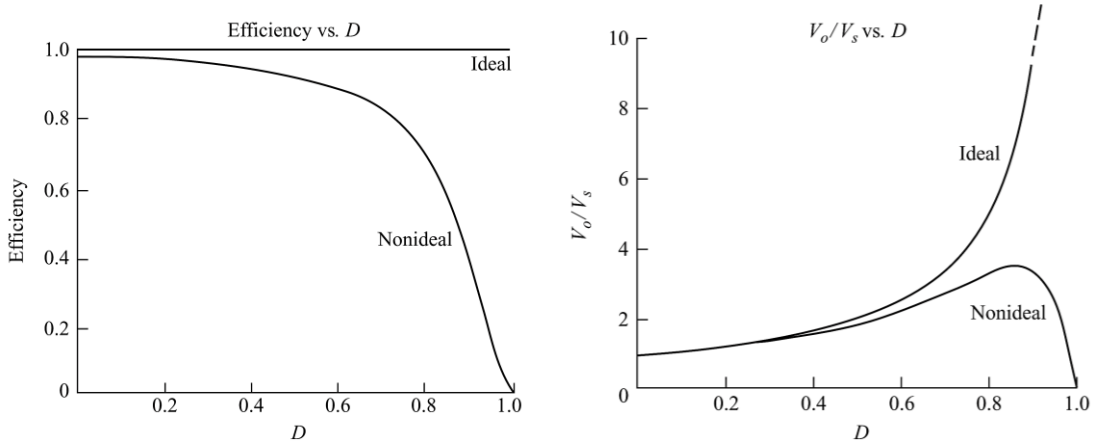
شکل (۶-۲): شکل‌موج‌های مهم در مبدل افزاینده، (الف) ولتاژ دو سر سلف، (ب) جریان سلف، (ج) جریان دیود، (د) جریان خازن

روابط فوق در حالت ایده‌آل صحیح هستند. در حالت واقعی، اجزای مختلف مدار دارای تلفات توان هستند. مثلاً سلف موجود در مدار در عمل دارای مقاومت بوده و بنابراین انرژی تلف می‌کند که به صورت گرما ظاهر شده و موجب گرم شدن آن می‌شود. علاوه بر آن، نیمه‌هادی‌های به کار رفته در مدار (دیود و کلید الکترونیک قدرت) نیز دارای تلفات توان هستند. در دیود عمدتاً دو نوع تلف انرژی رخ می‌دهد که یکی تلفات هدایتی نامیده می‌شود و به دلیل افت ولتاژ مستقیم دیود و مقاومت معادل سری دیود است و دیگری به دلیل بازیابی معکوس در دیود که به زمان بازیابی معکوس دیود (t_{rr}) وابسته است. این نوع تلفات در لحظات روش و خاموش شدن اتفاق می‌افتد. اگر فقط مقاومت سلف در نظر گرفته شود، رابطه ولتاژ خروجی به صورت زیر است:

$$V_o = \left(\frac{Vs}{1-D}\right)\left(\frac{1}{1+r_L/[R(1-D)^2]}\right) \qquad (۵-۶)$$

در رابطه فوق، R و r_L به ترتیب مقاومت بار خروجی و مقاومت معادل سری (ESR) سلف است. همان طور که رابطه فوق نشان می‌دهد، هر چقدر نسبت مقاومت سلف به مقاومت بار خروجی بیشتر باشد، افت ولتاژ ناشی از مقاومت سلف بیشتر خواهد شد. همچنین در چرخه‌های کاری بالاتر نیز اثر مقاومت سلف بیشتر می‌شود.

در شکل (۶-۳-الف) بهره ولتاژ در دو حالت ایده‌آل و غیر ایده‌آل (با در نظر گرفتن مقاومت سلف) نشان داده شده است. همان طور که این شکل نشان می‌دهد، در حالت ایده‌آل با نزدیک شدن چرخه کاری کلید به ۱، مقدار بهره ولتاژ به سمت بی‌نهایت میل می‌کند در صورتی که در عمل به دلیل افزایش شدید تلفات توان در چرخه‌های کاری بالاتر و افت ولتاژ روی المان‌های مدار، مقدار بهره ولتاژ کاهش پیدا می‌کند. همچنین، در حالت غیر ایده‌آل، مقدار بازده نیز با افزایش چرخه کاری، کاهش می‌یابد. در نتیجه، از لحاظ عملی نمی‌توان مبدل افزاینده را در چرخه‌های کاری نزدیک ۱ بهره‌برداری کرد.

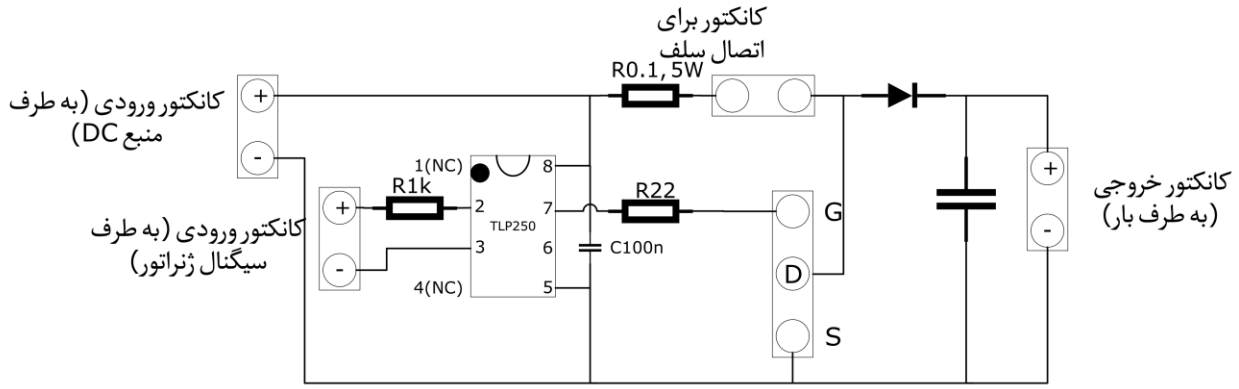


(ب) (الف)

شکل (۶-۳): (الف) بهره ولتاژ مبدل افزاینده در دو حالت ایده‌آل و غیر ایده‌آل، (ب) بازده مبدل افزاینده در دو حالت ایده‌آل و غیر ایده‌آل

شرح آزمایش:

مدار شکل زیر را به دقت روی برد سوراخدار پیاده کنید. توصیه می‌شود حتماً از لحیم کردن مستقیم IC راه‌انداز ماسفت (در اینجا TLP250) بر روی برد خودداری کرده و سوکت IC هشت پایه را با رعایت ترتیب پایه‌ها بر روی مدار لحیم کنید تا بعد از اتمام کار IC مورد نظر درون سوکت IC قرار گیرد.



شکل (۶-۴): مدار آزمایشگاهی مبدل DC-DC افزاینده

بعد از اتمام پیاده‌سازی مدار و اطمینان از درستی آن مراحل زیر را انجام دهید.

- ابتدار بار مقاومتی (۲۵ تا ۱۰۰ اهم) را به کانکتور مخصوص خود وصل کنید.

- سیگنال ژنراتور را به اسیلوسکوپ وصل کرده و یک پالس مربعی با دامنه ۵ ولت و آفست صفر و فرکانس از ۲۰ تا ۳۰ کیلوهرتز ایجاد کنید و به کانکتور مربوطه وصل کنید.
- منبع DC را به کانکتور مربوطه وصل کرده و روشن کنیدو سپس به آرامی شروع به افزایش ولتاژ DC کنید. در هر مرحله اگر جریان زیادی از منبع کشیده شود، منبع را خاموش کرده و مدار خود را بازبینی کنید. اگر جریان به طور غیر عادی زیاد از منبع کشیده نمی‌شود، افزایش ولتاژ DC را تا حدود ۱۵ ولت ادامه دهید.
- با اسیلوسکوپ سیگنال خروجی IC درایور را مشاهده کنید، اگر این سیگنال یک موج مربعی با همان فرکانس و چرخه کاری سیگنال خروجی سیگنال ژنراتور ولی با دامنه حدود ۱۵ ولت است، IC درست کار می‌کند و کارتان را ادامه دهید وگرنه از اتصالات مربوط به IC و همچنین از عدم خرابی IC بررسی کرده و عیب‌یابی کنید.
- اگر IC راه‌انداز درست کار می‌کند، ولتاژ درین-سورس ماسفت را نگاه کنید، باید یک شکل موج مربعی با همان فرکانس سیگنال کلیدزنی و با دامنه‌ای برابر با ولتاژ خروجی مشاهده کنید، وگرنه ممکن است در ماسفت و اتصالات آن ایرادی وجود داشته باشد.
- با فرض اینکه IC و ماسفت به درستی کار می‌کنند، ولتاژ خروجی را مشاهده کنید، این ولتاژ باید یک شکل‌موج DC با ریپل‌های ریز و حتماً بیشتر از ولتاژ ورودی باشد. در غیر این صورت مدارتان به درستی کار نمی‌کند.
- بعد از اطمینان از صحت عملکرد مدار، مطالعات زیر را انجام دهید:
- شکل‌موج ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی، ولتاژ دو سر سلف، جریان سلف، ولتاژ دو سر دیود، ولتاژ درین-سورس ماسفت، ولتاژ گیت-سورس ماسفت، و جریان گیت را در دو مقدار D مختلف (مثلاً ۰.۲ و ۰.۶، البته گروه‌های مختلف اعداد مختلفی را انتخاب کنند) ثبت کنید.

- جدول زیر را تکمیل و منحنی ولتاژ خروجی بر حسب D را رسم کنید.

D	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ولتاژ خروجی									

- به ازای یک مقدار D مشخص (مثلاً 0.3)، با تغییر فرکانس کلیدزنی، جدول زیر را تکمیل کنید

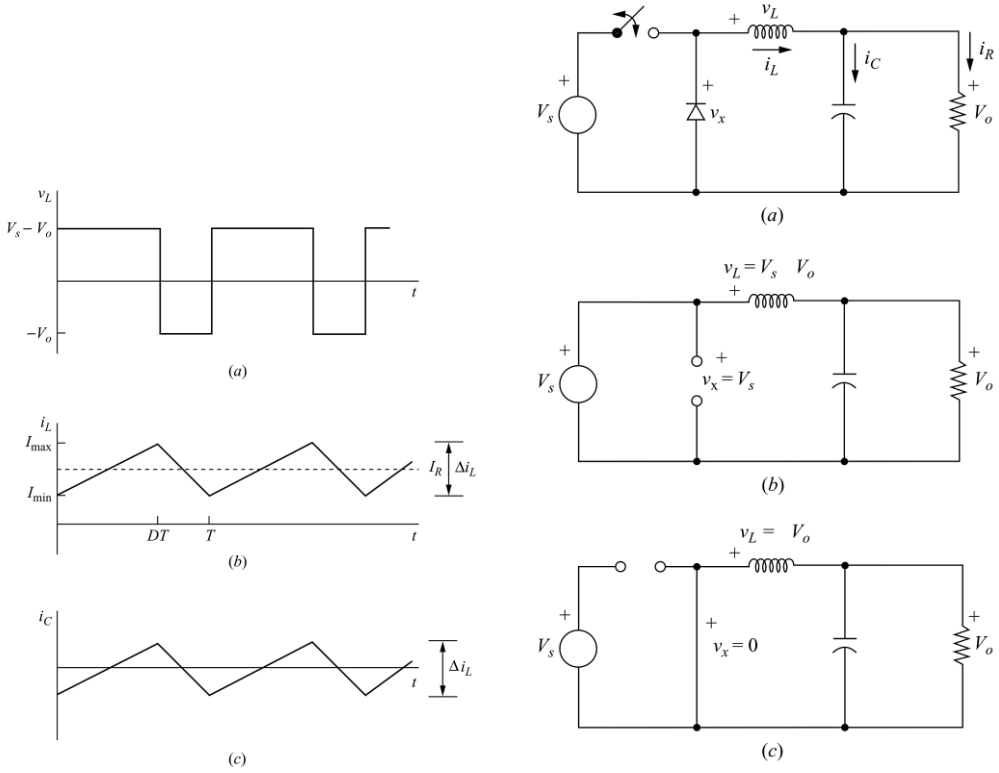
فرکانس کلیدزنی (کیلوهرتز)	۲۰	۲۵	۳۰
ریپل جریان سلف			
ریپل ولتاژ خروجی			

نتایج، شکل‌موج‌ها، منحنی‌های و جداول بدست آمده را در یک گزارش‌کار کامل ارائه داده و آن‌ها تفسیر کنید.

آزمایش شماره ۷: مبدل DC-DC کاهنده (Buck) (دو جلسه)

هدف آزمایش: آشنایی با طرز کار مبدل کاهنده (Buck)

کلیات و تئوری: مبدل کاهنده یکی از مبدل‌های پایه‌های است که برای کاهش ولتاژ به کار می‌رود. مدار این مبدل به همراه دو مد کاری آن در شکل (۷-۱) نشان داده شده است. در این مبدل وقتی کلید روشن است، دیود خاموش بوده و اختلاف ولتاژ ورودی و خروجی دو سر سلف می‌افتد. هنگامی که کلید خاموش می‌شود، جریان سلفی باعث روشن شدن دیود شده ولتاژ دو سر سلف برابر با قرینه ولتاژ خروجی می‌شود. با استفاده از قانون ولت-ثانیه اثبات می‌شود که در حالت عملکرد دائم، ولتاژ خروجی کمتر از ولتاژ ورودی خواهد بود.



شکل (۷-۱): سمت راست: (الف) مدار مبدل کاهنده، (ب) مدار معادل مبدل کاهنده در حالت روشن بودن کلید، (ج) مدار معادل مبدل کاهنده در حالت خاموش بودن کلید، سمت چپ: (الف) ولتاژ دو سر سلف، (ب) جریان سلف، (ج) جریان خازن

در این مبدل، در حالت ایده‌آل و در CCM، رابطه ولتاژ خروجی به صورت زیر است:

$$V_o = DV_s \tag{۱-۷}$$

همچنین برای تعیین اندازه سلف و خازن می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$L = \frac{R(1-D)}{\Delta i_{L,pu} f} \tag{۲-۷}$$

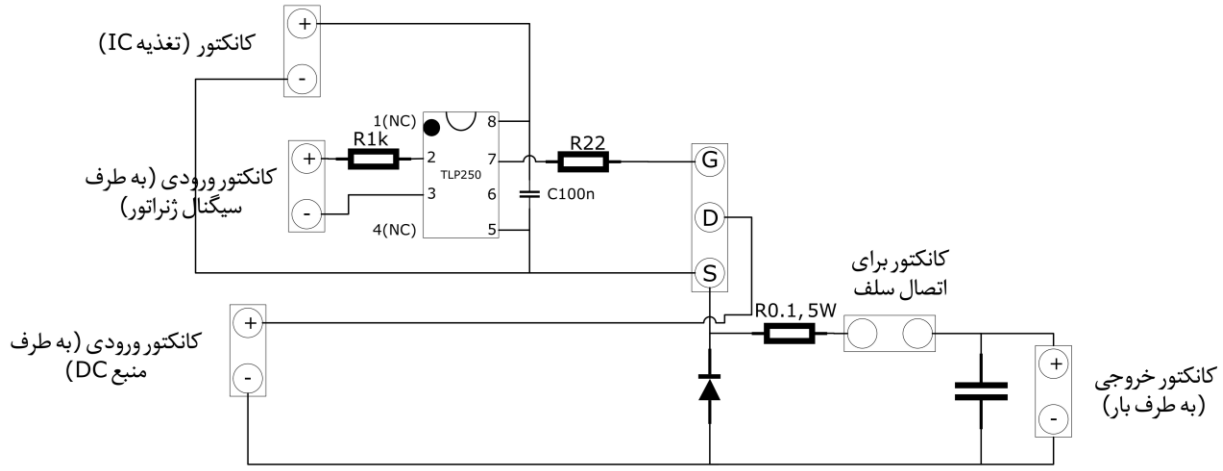
$$C = \frac{1-D}{8L\Delta V_{o,pu} f^2} \tag{۳-۷}$$

همچنین، مقدار بحرانی سلف برای اینکه مبدل در CCM باشد، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L = \frac{R(1-D)}{2f} \tag{۴-۷}$$

شرح آزمایش:

مدار شکل زیر را پیاده‌سازی کنید.



شکل (۷-۲): مدار آزمایشگاهی مبدل کاهنده

باید توجه کنید که در این مبدل برخلاف مبدل افزاینده تغذیه ورودی مدار قدرت نمی‌تواند مشترک با تغذیه IC باشد چرا که در این مدار، نقطه مشترکی بین تغذیه IC و منبع تغذیه مدار قدرت وجود ندارد. در صورتی که در مبدل افزاینده، پلاریته منفی تغذیه IC مشترک با پلاریته منفی منبع تغذیه قدرت است (اصطلاحاً زمین مشترک

دارند) و بنابراین در آزمایشگاه می‌توان از یک منبع استفاده کرد. در مبدل کاهنده، پلاریته منفی تغذیه IC متصل به پلاریته منفی منبع تغذیه ورودی مدار قدرت نیست (اصطلاحاً زمین مشترک ندارند) و بنابراین نمی‌توان از یک منبع تغذیه برای آن دو استفاده کرد.

مانند آزمایش قبلی، یک موج مربعی با دامنه ۵ ولت، آفست صفر و فرکانس کلیدزنی ۲۰ کیلوهرتز توسط سیگنال ژنراتور ایجاد کنید. بعد از اینکه همه قطعات و بار را را وصل کردید، سیگنال ژنراتور را به کانکتور مخصوص به آن وصل کنید. بعد از تغذیه IC را نی زبه کانکتور مربوطه متصل کرد و ولتاژ آن را به آرامی تا ۱۵ ولت افزایش دهید. در هر مرحله‌های اگر جریان غیر عادی از منبع کشیده شد، سریع آن را خاموش کرده و مدار خود را بازبینی کنید. سیگنال خروجی IC باید مانند آزمایش قبل، یک موج مربعی با دامنه حدود ۱۵ ولت باشد. حال، منبع تغذیه مدار قدرت را نیز وصل کرده و آن را روشن کنید و به آرامی ولتاژ آن را تا حدود ۳۰ ولت افزایش دهید.

برای یک مقدار مشخص D، شکل موج ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی، ولتاژ دو سر سلف، جریان سلف، ولتاژ دو سر دیود، ولتاژ درین-سورس ماسفت، ولتاژ گیت-سورس ماسفت و همچنین جریان گیت ماسفت را ثبت کنید. همچنین ریپل جریان سلف و ریپل ولتاژ خروجی را نیز یادداشت کنید.

جدول زیر را تکمیل کرده و منحنی آن را رسم و با منحنی ایده‌آل مقایسه کنید.

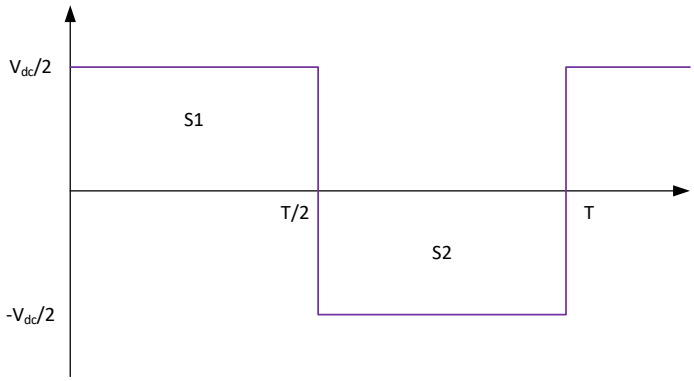
D	۰.۱	۰.۲	۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۶	۰.۷	۰.۸	۰.۹
ولتاژ خروجی									

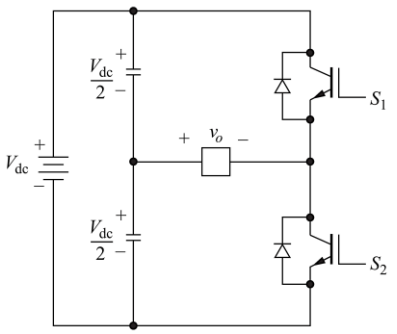
با استفاده از نتایج بدست آمده، گزارش کار جامعی تهیه کنید. در گزارش کار خود به مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری نیز پرداخته و هرگونه اختلاف آن‌ها را توجیه و تفسیر کنید.

آزمایش شماره ۸: اینورتر نیم پل (Half-bridge) (دو جلسه)

هدف آزمایش: آشنایی با اینورتر و درایو کلیدهای نیم‌پل

کلیات و تئوری: اینورتر یکی از انواع اساسی مبدل‌های الکترونیک قدرت است که برای تبدل ولتاژ/جریان DC به AC به کار می‌رود. اینورتر در عمل کاربردهای زیادی از جمله کنترل سرعت موتورهای AC و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (برای مثال تبدیل ولتاژ DC خروجی PV به ولتاژ AC) دارد. اساس کار اینورتر به این صورت است که با کلیدزنی مناسب، ولتاژ DC را به ولتاژ متناوب تبدیل می‌کند. ساده‌ترین ساختار یک اینورتر تکفاز، اینورتر نیم‌پل (half-bridge) است که در شکل (۸-۱-الف) نشان داده شده است. همان طور که این شکل نشان می‌دهد، اینورتر نیم‌پل از از دو کلید الکترونیک قدرت تشکیل شده است که به صورت مکمل هم روشن می‌شوند و نباید باهم روشن شوند (چرا؟) جدول کلیدزنی این اینورتر در جدول زیر نشان داده شده است. مطابق جدول مذکور، فقط دو حالت کلیدزنی مجاز (منظور از حالت کلیدزنی مجاز چیست؟) وجود دارد و بنابراین ولتاژ خروجی فقط می‌تواند دو مقدار $+V_{dc}/2$ و یا $-V_{dc}/2$ داشته باشد. اگر هدف فقط تبدیل DC به متناوب در ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین حالت ممکن مدنظر باشد، شکل موج ولتاژ خروجی یک شکل موج مربعی خواهد بود که در شکل (۸-۱-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، در نصف دوره تناوب ولتاژ خروجی، کلید S1 روشن شده و ولتاژ خروجی برابر با +Vdc/2 می‌باشد و در نصف دیگر دوره تناوب، کلید S2 روشن شده و ولتاژ خروجی برابر با -Vdc/2 است. باید توجه شود که در تبدیل DC به AC باید نهایت دقت صورت گیرد تا ولتاژ خروجی دارای مقدار متوسط (DC) نباشد (چرا؟). بدین منظور، زمان روشن بودن کلیدها باید دقیقاً باهم یکسان باشد. دوره تناوب ولتاژ خروجی را فرکانس مورد نظر ولتاژ خروجی تعیین می‌کند. برای مثال اگر بخواهیم مولفه اصلی (؟) ولتاژ خروجی دارای فرکانس ۵۰ هرتز باشد، دوره تناوب کلیدزنی 1/50=20ms می‌باشد که در 10ms یک کلید و در 10ms دیگر کلید دیگر روشن می‌شود.





(الف) (ب)

شکل (۸-۱): (الف) مدار اینورتر نیم‌پل، (ب) شکل موج ولتاژ خروجی

جدول (۸-۱): جدول کلیدزنی اینورتر نیم‌پل

کلید روشن	ولتاژ خروجی
S_1	$V_{dc}/2$
S_2	$-V_{dc}/2$

در عمل هدایت کلیدها نباید حتی برای چند میکروثانیه هم همپوشانی داشته باشد. بر عکس، در عمل باید بین خاموش شدن یک کلید و روشن شدن کلید دیگر یک تاخیر زمانی مشخص وجود داشته باشد تا از عدم اتصال کوتاه ناشی از هدایت همزمان کلیدها اطمینان حاصل شود. به این تاخیر زمانی بین پالس کلیدزنی کلیدهای اینورتر، زمان مرده (dead time) می‌گویند که بر حسب مورد (وابسته به روش و فرکانس کلیدزنی و مشخصات کلیدهای استفاده شده) ممکن است از چند ده نانوثانیه تا چند میکروثانیه باشد.

کیفیت شکل‌موج خروجی اینورتر با میزان هارمونیک‌های آن سنجیده می‌شود. هارمونیک در واقع مولفه‌هایی از ولتاژ و یا جریان هستند که فرکانس آن‌ها مضرب صحیحی از فرکانس پایه (اصلی) است. در حقیقت، با استفاده از بسط فوریه، هر شکل‌موج متناوب غیرسینوسی را می‌توان به بی‌نهایت شکل‌موج سینوسی با دامنه و فرکانس مخلف تجزیه کرد که یکی از این سینوسی‌ها را مولفه اصلی و بقیه را هارمونیک می‌نامند. شکل‌موج سینوسی ایده‌آل هیچ هارمونیکی ندارد ولی هر شکل موج متناوب غیرسینوسی دارای هارمونیک‌هایی است که می‌توان با استفاده از بسط فوریه بدست آورد. مثلاً شکل‌موج مربعی ولتاژ خروجی اینورتر نیم‌پل دارای هارمونیک‌های فرد است. به دلیل اینکه نمی‌توان تک تک هارمونیک‌ها را در مورد یک شکل‌موج غیرسینوسی بیان کرد، شاخصی به نام اعوجاج هارمونیکی کل[7] (THD) ارائه شده که بیانگر میزان نزدیکی هر شکل‌موج متناوب به شکل‌موج سینوسی است. به عبارت دیگر هر چقدر مقدار THD کمتر باشد، شکل موج به سینوسی نزدیکتر است (هارمونیک‌های کمتری دارد).

[7] Total Harmonic Distortion (THD)

طبق بسط فوریه، هر شکل‌موج متناوب غیرسینوسی را می‌توان به صورت مجموع بی‌نهایت شکل‌موج سینوسی بیان کرد، به عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$v_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \qquad (۱-۸)$$

در رابطه فوق، n مرتبه هارمونیک، V_n دامنه هارمونیک nام، ω_0 فرکانس زاویه‌های مولفه اصلی (هارمونیک اصلی، هارمونیک اول) و θ_n فاز هارمونیک nام می‌باشد. در حالت کلی، روابط زیر را می‌توان برای محاسبه دامنه هارمونیک‌ها نوشت:

$$A_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v(t)\cos(n\omega t)d(\omega t)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} v(t)\sin(n\omega t)d(\omega t) \qquad (۲-۸)$$

$$V_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

برای شکل‌موج مربعی ولتاژ خورجی اینورتر نیم‌پل، بسط فوریه ولتاژ خروجی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$v_o(t) = \sum_{n=1,3,5,\cdots}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi}\sin n\omega_0 t \qquad (۳-۸)$$

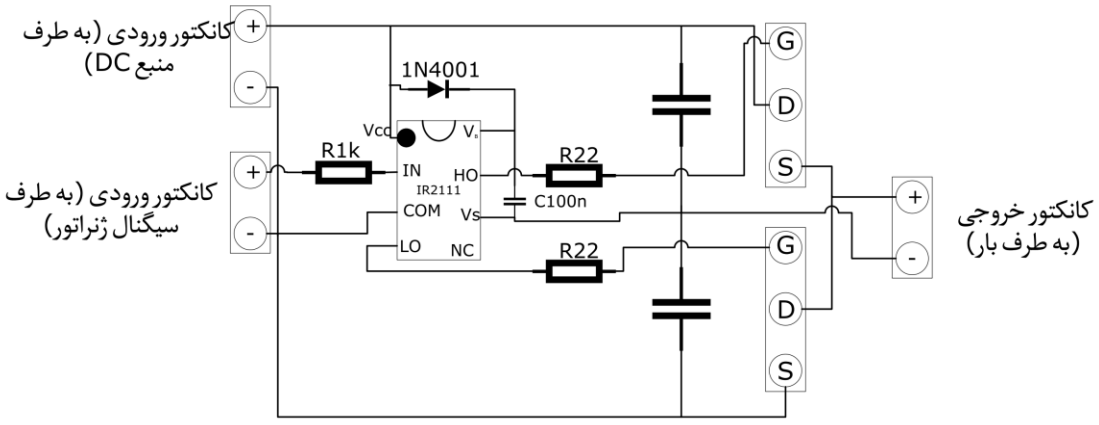
با داشتن بسط فوریه، رابطه THD را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}\left(V_{n,rms}\right)^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} \qquad (۴-۸)$$

شرح آزمایش:

در این آزمایش، از IC درایور نیم‌پل استفاده می‌شود. سازنده‌های مختلف ICهای متفاوتی را به صورت تجاری تولید کرده‌اند که در بازار وجود دارد. یکی از ICهای درایور نیم‌پل که ضمن ساده بودن و موجود بودن، کاربردی هم هست، IR2111 است که در این آزمایش مورد استفاده قرار خواهد گرفت. اکیداً توصیه می‌شود دیتاشیت این IC قبل از شروع آزمایش مورد مطالعه قرار گیرد.

مدار شکل زیر را بسازید.



شکل (۸-۲): مدار آزمایشگاهی اینورتر نیم‌پل

به جای IC راه‌انداز از سوکت IC هشت پایه استفاده کنید تا تعویض آن راحت‌تر باشد. بار را به خروجی مدار وصل کنید. با استفاده از سیگنال ژنراتور یک پالس مربعی با فرکانس ۵۰ هرتز، چرخه کاری ۵۰ درصد، دامنه ۵ ولت و آفست صفر ایجاد کنید و آن را به کانکتور مربوطه وصل کنید. سپس، منبع تغذیه DC را به کانکتور مربوطه وصل کنید (توجه کنید که در این مدار منبع تغذیه DC هم مدار قدرت و هم مدار راه‌انداز را تغذیه می‌کند). به آرامی ولتاژ منبع تغذیه DC را تا ۲۰ ولت افزایش دهید (طبق دیتاشیت مربوطه، آستانه تحمل IC راه‌انداز ۲۵ ولت است). اگر جریان غیر عادی از منبع تغذیه کشیده می‌شود سریع آن را خاموش کرده و مدار خود را بازبینی کنید. اگر همه کارها درست انجام شده باشد و مدار به درستی کار کند، باید شکل‌موج خروجی مربعی با دامنه ۲۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز در خروجی مشاهده کنید.

شکل‌موج ولتاژ DC، ولتاژ خروجی، و ولتاژ گیت-سورس و ولتاژ درین-سورس هر دو ماسفت را ثبت کنید. همچنین مقدار متوسط و موثر ولتاژ خروجی را نیز ثبت کنید. با طلاعات موجود، مقدار موثر مولفه اصلی ولتاژ خروجی و همچنین THD آن را محاسبه کنید.

در حالی که شکل‌موج ولتاژ خروجی را مشاهده می‌کنید، فرکانس موج مربعی خروجی سیگنال ژنراتور را تغییر داده و مشاهدات خود را ثبت کنید.

با استفاده از نتایج و مشاهدات ثبت شده، گزارش کار کاملی را تدوین کنید. در گزارش کار خود به سوالات زیر نیز پاسخ دهید:

- چرا THD ولتاژ خروجی مقدار بالایی دارد؟ برای کاهش آن چه می‌توان کرد؟
- آیا مقدار موثر ولتاژ خروجی توسط این مدار قابل کنترل است؟ چرا؟
- فرکانس شکل‌موج چه تاثیری در مقدار موثر آن دارد؟